Electricidad y Electrónica

Electrotecnia

Pablo Alcalde San Miguel



7.ª edición

TÉCNICO EN INSTALACIONES ELÉCTRICAS Y AUTOMÁTICAS

Paraninfo

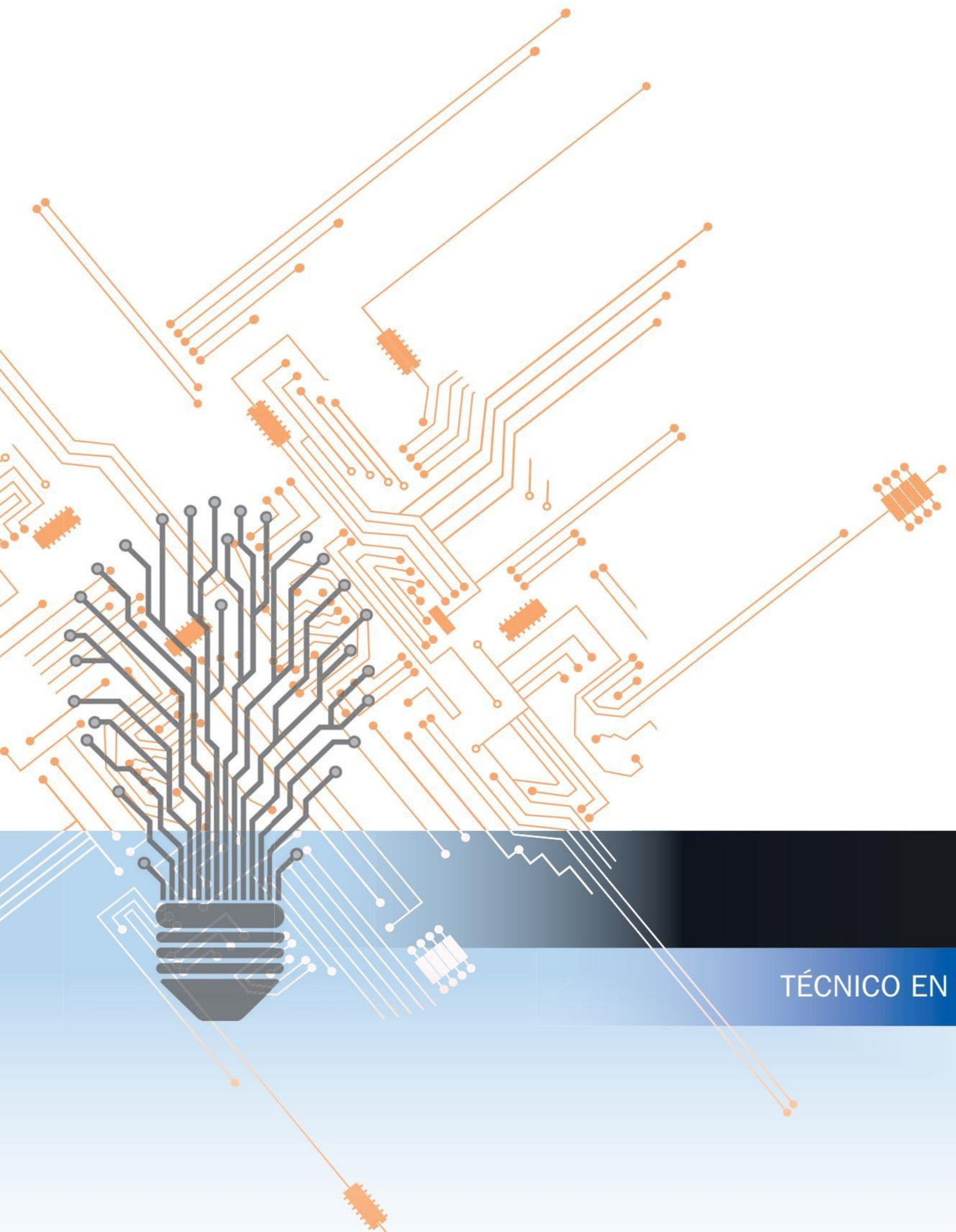
Disponibles materiales y recursos
previo registro en www.paraninfo.es

Electrotecnia

Electricidad y Electrónica

Electrotecnia

Pablo Alcalde San Miguel



TÉCNICO EN INSTALACIONES ELÉCTRICAS Y AUTOMÁTICAS

Paraninfo

Paraninfo

Electrotecnia

© Pablo Alcalde San Miguel

Gerente Editorial
María José López Raso

Equipo Técnico Editorial
Paola Paz Otero
Sofía Durán Tamayo

Editora de Adquisiciones
Carmen Lara Carmona

Producción
Nacho Cabal Ramos

Diseño de cubierta
Ediciones Nobel

Preimpresión
Montytexto

Reservados los derechos para todos los países de lengua española. De conformidad con lo dispuesto en el artículo 270 del Código Penal vigente, podrán ser castigados con penas de multa y privación de libertad quienes reprodujeren o plagiaren, en todo o en parte, una obra literaria, artística o científica fijada en cualquier tipo de soporte sin la preceptiva autorización. Ninguna parte de esta publicación, incluido el diseño de la cubierta, puede ser reproducida, almacenada o transmitida de ninguna forma, ni por ningún medio, sea este electrónico, químico, mecánico, electro-óptico, grabación, fotocopia o cualquier otro, sin la previa autorización escrita por parte de la Editorial.

Todas las marcas comerciales mencionadas en este texto son propiedad de sus respectivos dueños.

COPYRIGHT © 2022 Ediciones Paraninfo, SA
7.ª edición, 2022

C/ Sierra de Guadarrama 35. Naves 2, 3, 4 y 5
Polígono Industrial San Fernando II
28830 San Fernando de Henares
Teléfono: 914 463 350
clientes@paraninfo.es / www.paraninfo.es

ISBN: 978-84-1366-155-1
Depósito legal: M-2700-2022
(23.868)

Impreso en España / ***Printed in Spain***
Lavel Industria Gráfica
(Humanes de Madrid, Madrid)

La editorial recomienda que el alumnado realice las actividades sobre el cuaderno y no sobre el libro.

Presentación

Este libro desarrolla los contenidos del módulo profesional de **Electrotecnia,** del Ciclo Formativo de grado medio de Instalaciones Eléctricas y Automáticas, perteneciente a la familia profesional de Electricidad y Electrónica.



Las unidades del libro se acompañan de multitud de **recursos didácticos** que ayudarán al futuro profesional a comprender la materia y acercarlo a su inminente realidad laboral:

- Abundantes actividades resueltas.
- Numerosas ilustraciones y fotografías con gran nivel de detalle.
- Recuadros de texto con información relevante.
- Gran cantidad de actividades prácticas de laboratorio.
- Abundantes actividades propuestas.
- Actividades de comprobación de tipo test y de desarrollo.
- Enlaces web de interés.



Este libro dispone de los siguientes **materiales y recursos** disponibles en línea para el **profesorado** que **confirme su adopción** como libro de texto para impartir la materia:

- **Programación de aula.**
- **Solucionario.**
- **Material y documentación extra.**
- **Presentación en PowerPoint.**
- **Examina.**
- **LDP (Libro Digital Proyectable).**





Este libro dispone además de **materiales y recursos previo registro** disponibles en línea para el **alumnado:**

- **Material y documentación extra.**

© Ediciones Paraninfo

Índice

Introducción a la 7.ª edición XIX

Introducción XXI

1. La electricidad. Conceptos generales 1

1.1. Producción y consumo de electricidad 2
- **1.1.1.** Producción de energía eléctrica 2
- **1.1.2.** Las centrales eléctricas. 2
- **1.1.3.** El generador eléctrico 3
- **1.1.4.** El transporte de la electricidad. 4

1.2. Efectos de la electricidad 5

1.3. La electricidad 6

1.4. Electricidad estática 7

1.5. Carga eléctrica 8
- **1.5.1.** Ley de Coulomb 8
- **1.5.2.** Campo eléctrico 8

1.6. Movimiento de electrones 9
- **1.6.1.** Electricidad atmosférica 9

1.7. El circuito eléctrico 10

1.8. Formas de producir electricidad 11
- **1.8.1.** Producción de electricidad por frotamiento 11
- **1.8.2.** Producción de electricidad por reacción química. 12
- **1.8.3.** Producción de electricidad por presión 12

© Ediciones Paraninfo

1.8.4. Producción de electricidad por acción de la luz. 13
1.8.5. Producción de electricidad por acción del calor 13
1.8.6. Producción de electricidad por acción magnética 14
1.9. Intensidad de la corriente eléctrica 14
1.10. Sentido real y convencional de la corriente. 14
1.11. Movimiento de electrones en un circuito 14
1.12. Medida de la intensidad de la corriente eléctrica 15
1.13. Corriente continua (C.C.) 15
1.14. Corriente alterna (C.A.). 16
1.15. Tensión eléctrica y fuerza electromotriz 16
1.16. Medida de la tensión 17
Comprobación práctica en el laboratorio 18
Actividades de comprobación 19
Actividades de ampliación. 19

2. Resistencia eléctrica 21

2.1. Conductores y aislantes. 22
2.2. Resistencia eléctrica 22
2.3. Medida de la resistencia eléctrica 23
2.4. La ley de Ohm. 24
2.5. Resistencia de un conductor. 25
2.6. Conductancia y conductividad 27
2.7. Influencia de la temperatura sobre la resistividad 27
2.8. Resistencia de los aislantes. 29
2.9. Rigidez dieléctrica 29
2.10. Manejo del polímetro 30
2.10.1. Medida de tensión 30
2.10.2. Medida de intensidad de corriente 31
2.10.3. Medida de resistencia. 31
2.10.4. Medida de continuidad y diodos 31
2.10.5. Medida de capacidad de un condensador 31
2.10.6. Medida de la ganancia de un transistor. 32
2.10.7. Multímetro con selección automática de rango 32
Comprobación práctica en el laboratorio 33
Actividades de comprobación 34
Actividades de ampliación. 35

3. Potencia y energía eléctrica 37

3.1. Potencia eléctrica 38
3.2. Medida de la potencia eléctrica 40
3.3. Energía eléctrica 40
3.4. Medida de la energía eléctrica 41
3.4.1. Funcionamiento del contador de energía digital 41
Comprobación práctica en el laboratorio 43
Actividades de comprobación 44
Actividades de ampliación. 45

© Ediciones Paraninfo

4. Efecto térmico de la electricidad 47

4.1. Efecto Joule 48
4.2. Calor específico. 48
4.3. Cálculo de la sección de conductores 50
4.3.1. Cálculo de la sección teniendo en cuenta el calentamiento de los conductores. 50
4.3.2. Densidad de corriente de un conductor 52
4.3.3. Por qué se emplean altas tensiones en el transporte de energía eléctrica. 52
4.3.4. Caída de tensión en las líneas eléctricas. 53
4.3.5. Cálculo de la sección teniendo en cuenta la caída de tensión 54
4.3.6. Cálculo de la sección teniendo en cuenta la norma UNE-HD 60364-5-52 55
4.3.7. Cálculo de la sección de conductores teniendo en cuenta la conductividad 55
4.3.8. La caída de tensión según el Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión 56
Actividades de comprobación 58
Actividades de evaluación resueltas 59
Actividades de ampliación. 59

5. Aplicaciones del efecto térmico 61

5.1. Elementos de caldeo 62
5.2. Transmisión de calor 62
5.2.1. Calefacción por suelos y techos radiantes. 63
5.2.2. Calefacción por acumulación 63
5.2.3. El termo eléctrico 64
5.3. Inconvenientes del efecto térmico 64
5.3.1. El cortocircuito 64
5.3.2. La sobrecarga 65
5.3.3. Protección de los circuitos contra cortocircuitos y sobrecargas. 66
5.3.4. Fusibles. 66
5.3.5. Los interruptores automáticos 68
5.3.6. Funcionamiento de un interruptor automático 69
5.3.7. Los motores pueden producir sobrecargas en su funcionamiento 70
Comprobación práctica en el laboratorio 72
Actividades de comprobación 73

6. Circuitos serie, paralelo y mixto 75

6.1. Acoplamiento de receptores en serie. 76
6.1.1. Aplicaciones prácticas del acoplamiento en serie. . . . 79
6.2. Acoplamiento de receptores en paralelo 80
6.3. Circuitos mixtos 83
Comprobación práctica en el laboratorio 87
Actividades de comprobación 88
Actividades de evaluación resueltas 89
Actividades de ampliación. 90

© Ediciones Paraninfo

7. Resolución de circuitos con varias mallas 91

7.1. Leyes de Kirchhoff 92
7.2. Ecuaciones de las mallas o de Maxwell 95
7.3. Resolución de circuitos mediante transformaciones de triángulo a estrella 98
7.4. Resolución de circuitos mediante transformaciones de estrella a triángulo 99
7.5. Teorema de la superposición 100
7.6. Teorema de Thévenin 102
Comprobación práctica en el laboratorio 104
Actividades de comprobación 105
Actividades de evaluación resueltas 106
Actividades de ampliación 108

8. Generadores electroquímicos y fotovoltaicos 109

8.1. Electrólisis 110
8.2. Recubrimientos galvánicos 110
8.3. Pilas eléctricas 110
8.3.1. Características de las pilas 111
8.3.2. Tipos de pilas eléctricas 111
8.4. Acumuladores 112
8.4.1. Acumuladores de plomo 112
8.4.2. Constitución de un acumulador 113
8.4.3. Capacidad de un acumulador 113
8.4.4. Tensión y corriente de carga de un acumulador 114
8.4.5. Tensión y corriente de descarga 114
8.4.6. Resistencia interna 114
8.4.7. Vida de un acumulador 114
8.4.8. Autodescarga de un acumulador 115
8.4.9. Acumuladores alcalinos 115
8.4.10. Acumuladores de ion-litio 115
8.4.11. Baterías de acumuladores para el coche eléctrico . . . 116
8.5. Conexión de pilas y acumuladores 117
8.5.1. Tensión en bornes del generador 117
8.5.2. Potencia del generador 117
8.5.3. Rendimiento eléctrico de un generador 117
8.5.4. Conexión de generadores en serie 118
8.5.5. Conexión de generadores en paralelo 118
8.5.6. Conexión mixta de generadores 119
8.6. Energía solar fotovoltaica 120
8.6.1. Características eléctricas de los paneles fotovoltaicos 121
8.6.2. Tipos de paneles fotovoltaicos 122
8.6.3. Instalaciones aisladas de la red eléctrica 123
8.6.4. Instalaciones conectadas a la red eléctrica 124
8.6.5. Autoconsumo fotovoltaico 125

© Ediciones Paraninfo

Comprobación práctica en el laboratorio 126
Actividades de comprobación 127
Actividades de ampliación. 128

9. Los condensadores 129

9.1. Funcionamiento de un condensador 130
9.2. Capacidad de un condensador 131
9.3. Carga de un condensador. 132
9.4. Descarga de un condensador 133
9.5. Constante de tiempo de carga y descarga de un condensador 133
9.6. Especificaciones técnicas de los condensadores 134
9.7. Tipos de condensadores 134
9.7.1. Condensadores de papel impregnado 134
9.7.2. Condensadores de papel metalizado 135
9.7.3. Condensadores de plástico 135
9.7.4. Condensadores cerámicos. 135
9.7.5. Condensadores de mica 135
9.7.6. Condensadores electrolíticos de aluminio 135
9.8. Identificación de los valores de los condensadores. 136
9.9. Asociación de condensadores. 137
9.9.1. Asociación de condensadores en serie 137
9.9.2. Asociación en paralelo 138
Comprobación práctica en el laboratorio 140
Actividades de comprobación 141
Actividades de evaluación resueltas 142
Actividades de ampliación. 143

10. Magnetismo y electromagnetismo . . . 145

10.1. Imanes. 146
10.1.1. Polos de un imán 146
10.1.2. Brújula. 146
10.1.3. Clases de imanes. 146
10.1.4. Teoría molecular de los imanes 147
10.1.5. Campo magnético de un imán 147
10.2. Electromagnetismo 148
10.2.1. Campo magnético creado por un conductor cuando es atravesado por una corriente eléctrica. . . . 148
10.2.2. Campo magnético en un conductor en forma de anillo 149
10.2.3. Campo magnético formado por una bobina 149
10.3. Magnitudes magnéticas 150
10.3.1. Flujo magnético (Φ). 150
10.3.2. Inducción magnética (B) 150
10.3.3. Fuerza magnetomotriz ($\mathcal{F}$) 150
10.3.4. Intensidad de campo magnético (H) 151
10.3.5. Reluctancia ($\Re$) 152
10.4. Curva de magnetización. Saturación 152
10.5. Permeabilidad magnética 153
10.6. Histéresis magnética 154

© Ediciones Paraninfo

10.7. Cálculo de circuitos magnéticos 155
10.8. Electroimanes 157
10.8.1. Aplicaciones prácticas de los electroimanes 158
Comprobación práctica en el laboratorio 160
Actividades de comprobación 161
Actividades de evaluación resueltas 162
Actividades de ampliación 163

11. Interacción entre la corriente eléctrica y un campo magnético 165

11.1. Inducción electromagnética 166
11.1.1. Experiencia de Faraday 167
11.1.2. Sentido de la f. e. m. inducida. Ley de Lenz 168
11.1.3. Fuerza electromotriz inducida en un circuito próximo . . . 169
11.1.4. Aplicaciones prácticas de la inducción electromagnética 170
11.2. Corrientes parásitas o de Foucault 173
11.3. Autoinducción. Bobinas 174
11.3.1. Coeficiente de autoinducción 175
11.3.2. Aplicaciones prácticas de la autoinducción 176
11.4. Fuerza sobre una corriente eléctrica en el seno de un campo magnético 177
11.4.1. Fuerza entre dos corrientes paralelas 179
11.4.2. Definición electromagnética de amperio 180
Comprobación práctica en el laboratorio 181
Actividades de comprobación 182
Actividades de evaluación resueltas 184
Actividades de ampliación 184

12. La corriente alterna 185

12.1. Ventajas de la corriente alterna 186
12.2. Producción de una corriente alterna 186
12.3. Valores característicos de la C.A. 189
12.3.1. Valor instantáneo 189
12.3.2. Valor máximo de la tensión 189
12.3.3. Tensión eficaz 189
12.3.4. Intensidad eficaz 189
12.3.5. Valor medio del ciclo completo 190
12.3.6. Ciclo o periodo 190
12.3.7. Frecuencia 190
12.3.8. Relación entre la frecuencia y la velocidad angular 191
12.4. Receptores elementales en corriente alterna 191
12.4.1. Circuito con resistencia pura 191
12.4.2. Circuito con bobina 193
12.4.3. Circuito con condensador 195
12.4.4. Resumen de los efectos producidos por los receptores elementales 197
Comprobación práctica en el laboratorio 198
Actividades de comprobación 200
Actividades de ampliación 201

© Ediciones Paraninfo

13. Circuitos serie R-L-C en C.A. 203

13.1. Acoplamiento en serie de bobinas y resistencias 204
13.1.1. Triángulo de tensiones 205
13.1.2. Triángulo de impedancias 205
13.1.3. Potencia en un circuito R-L 206
13.2. Acoplamiento en serie de resistencias y condensadores 208
13.3. Circuito serie R-L-C 211
13.4. Importancia práctica del factor de potencia (cos φ) 213
13.4.1. Corrección del factor de potencia mediante condensadores 214
13.4.2. Tipos de compensación de la energía reactiva 216
13.5. Caída de tensión en las líneas eléctricas monofásicas de C.A. 217
Comprobación práctica en el laboratorio 219
Actividades de comprobación 220
Actividades de evaluación resueltas 221
Actividades de ampliación. 222

14. Resolución de circuitos paralelos y mixtos en C.A. 223

14.1. Acoplamiento de receptores en paralelo en C.A. 224
14.2. Instalaciones monofásicas de varios receptores 224
14.3. Resolución de circuitos de C.A. mediante el cálculo vectorial con números complejos 226
14.3.1. Representación de un número complejo. 227
14.3.2. Operaciones con números complejos. 227
14.3.3. Aplicación de los números complejos a la resolución de circuitos 228
14.3.4. Potencia compleja 231
14.4. Circuitos oscilantes 232
14.4.1. Resonancia 232
14.4.2. Variación de la impedancia con la frecuencia. Representación gráfica 233
14.4.3. Resonancia en serie. 233
14.4.4. Resonancia en paralelo 234
Comprobación práctica en el laboratorio 235
Actividades de comprobación 235
Actividades de evaluación resueltas 237
Actividades de ampliación. 240

15. Sistemas trifásicos 241

15.1. Ventajas del uso de sistemas trifásicos 242
15.2. Generación de un sistema de C.A. trifásica 242
15.2.1. Conexión del alternador en estrella 244
15.3. Conexión de los receptores 245
15.3.1. Carga equilibrada en estrella. 245
15.3.2. Carga equilibrada en triángulo. 248
15.4. Corrección del factor de potencia 251
15.5. Instalaciones trifásicas de varios receptores 252
15.6. Caída de tensión en las líneas trifásicas de C.A. 254

© Ediciones Paraninfo

15.7. Cálculo de la sección de conductores en líneas con varios receptores según el REBT 255
15.8. Componentes armónicas en C.A. 257
15.8.1. Características de los armónicos 257
15.8.2. Efectos que producen los armónicos 258
15.8.3. Medida de los armónicos 259
15.8.4. Sistemas para la compensación de armónicos 259
Comprobación práctica en el laboratorio 261
Actividades de comprobación 262
Actividades de evaluación resueltas 263

16. Medidas eléctricas 265

16.1. Errores en la medida 266
16.1.1. Errores absolutos y relativos 266
16.1.2. Precisión de un aparato de medida 266
16.2. Normas generales para la toma de medidas eléctricas 267
16.3. Instrumentos de medida analógicos y digitales 267
16.4. Sistemas de medida 268
16.4.1. Bobina móvil 269
16.4.2. Bobina móvil con rectificador 269
16.4.3. Bobina móvil con convertidor incorporado 270
16.4.4. Hierro móvil 270
16.4.5. Electrodinámico 270
16.4.6. Ferrodinámico 271
16.4.7. Inducción 271
16.4.8. Bimetálico 271
16.4.9. Láminas vibrantes 271
16.5. Medida de intensidad de corriente 271
16.5.1. Ampliación del alcance de un amperímetro mediante *shunt* 272
16.5.2. Ampliación del alcance de amperímetros mediante transformadores de intensidad 273
16.6. Medidas de tensión 275
16.6.1. Ampliación del alcance de un voltímetro mediante resistencias adicionales en serie 275
16.6.2. Ampliación del alcance de un voltímetro mediante transformadores de tensión 276
16.7. El polímetro 277
16.8. Medidas de potencia 277
16.8.1. Medida de la potencia reactiva con vármetro 278
16.8.2. Medida de potencia activa en C.A. trifásica 278
16.9. Medida de energía en sistemas trifásicos 280
16.10. Medida de la frecuencia 282
16.11. Medida del factor de potencia 282
16.12. Medida de resistencias eléctricas 282
16.12.1. Medida de resistencias con óhmetro amperimétrico 282
16.12.2. Medida de resistencias mediante puentes de medida 283
16.12.3. Medida de resistencias de aislamiento 284
16.12.4. Medida de resistencia de una toma de tierra 285

© Ediciones Paraninfo

16.13. Sistemas avanzados de medida 286
16.13.1. Analizador de red trifásico. 286
16.13.2. Comprobador de instalaciones eléctricas de baja tensión 286
16.13.3. Cámara termográfica 287
16.14. El osciloscopio 287
16.14.1. Manejo del osciloscopio 289
Comprobación práctica en el laboratorio 290
Actividades de comprobación 292
Actividades de evaluación resueltas 293
Actividades de ampliación. 294

17. Lámparas eléctricas 295

17.1. Magnitudes luminosas de las lámparas eléctricas 296
17.1.1. Flujo luminoso 296
17.1.2. Eficacia luminosa 296
17.1.3. Índice de reproducción cromático (IRC) 296
17.1.4. Temperatura de color (K). 297
17.1.5. Iluminancia o nivel de iluminación (*E*) 297
17.2. Tipos de lámparas eléctricas 298
17.2.1. Lámparas incandescentes 298
17.2.2. Lámparas incandescentes con halógenos 299
17.2.3. Lámparas fluorescentes 300
17.2.4. Lámparas fluorescentes compactas o de bajo consumo 302
17.2.5. Lámparas de vapor de mercurio de color corregido 303
17.2.6. Lámparas de vapor de mercurio con halogenuros metálicos 304
17.2.7. Lámparas de vapor de sodio a alta presión 304
17.2.8. Lámparas de vapor de sodio a baja presión 304
17.2.9. Lámparas de descarga de gas a baja presión por inducción 305
17.2.10. Lámparas led. 305
17.3. Proyectos de alumbrado de interiores 306
17.3.1. Programas informáticos para el cálculo del alumbrado 308
Comprobación práctica en el laboratorio 309
Actividades de comprobación 310

18. El transformador 311

18.1. El transformador monofásico 312
18.1.1. Funcionamiento de un transformador ideal. 313
18.1.2. Transformador real 316
18.1.3. Ensayo en vacío del transformador 317
18.1.4. Transformador real en carga 318
18.1.5. Circuito equivalente en cortocircuito del transformador. 319
18.1.6. Ensayo del transformador en cortocircuito 320
18.1.7. Corriente de cortocircuito accidental 322

© Ediciones Paraninfo

18.1.8. Caída de tensión de un transformador 322
18.1.9. Rendimiento de un transformador 325
18.1.10. Características nominales de un transformador 326
18.2. Autotransformadores 327
18.2.1. Autotransformadores de regulación 327
18.3. Transformadores trifásicos 328
18.3.1. Conexiones de los transformadores trifásicos 328
18.3.2. Desfase entre el primario y el secundario de transformadores trifásicos 329
18.3.3. Ensayo en vacío de un transformador trifásico 330
18.3.4. Ensayo en cortocircuito de un transformador trifásico 330
18.3.5. Conexión en paralelo de transformadores 332
18.3.6. Refrigeración de los transformadores 332
18.3.7. Características de un transformador 333
18.4. Ensayos para transformadores monofásicos y trifásicos 334
Comprobación práctica en el laboratorio 335
Actividades de comprobación 336
Actividades de evaluación resueltas 337
Actividades de ampliación 338

19. Máquinas eléctricas de corriente continua 339

19.1. Clasificación de las máquinas eléctricas 340
19.2. Principio de funcionamiento de los generadores de C.C. 340
19.3. Constitución de una máquina de C.C. 342
19.3.1. Circuito magnético de una máquina de C.C. 343
19.3.2. Reacción del inducido 344
19.3.3. Devanado de compensación 344
19.4. Fuerza electromotriz generada por una dinamo 345
19.5. Tipos de excitación de las dinamos 345
19.5.1. Dinamos de excitación independiente 345
19.5.2. Dinamos autoexcitadas 346
19.5.3. Dinamo con excitación en derivación (*shunt*) 346
19.5.4. Dinamo con excitación en serie 347
19.5.5. Dinamo con excitación *compound* 347
19.6. Ensayos en una dinamo 348
19.7. Principio de funcionamiento del motor de C.C. 349
19.8. Características de los motores de C.C. 349
19.8.1. Fuerza contraelectromotriz 350
19.8.2. Corriente del inducido 350
19.8.3. Corriente absorbida en el arranque 350
19.8.4. Rendimiento de un motor eléctrico 351
19.8.5. Par motor 352
19.8.6. Velocidad de giro 353
19.9. Conexión de los motores de C.C. 353
19.9.1. Motor con excitación independiente 353
19.9.2. Motor con excitación derivación o *shunt* 353
19.9.3. Motor con excitación en serie 355
19.9.4. Motor de excitación *compound* 357
19.10. Inversión del sentido de giro de los motores de C.C. 358

© Ediciones Paraninfo

19.11. Regulación y control de los motores de C.C.. 358
19.12. Ensayos de los motores de C.C. 359
Comprobación práctica en el laboratorio 360
Actividades de comprobación 361
Actividades de evaluación resueltas 362

20. Máquinas eléctricas de corriente alterna 363

20.1. El alternador trifásico. 364
20.1.1. Constitución de un alternador de inducido fijo 364
20.1.2. Magnitudes características de un alternador 365
20.1.3. Acoplamiento de alternadores. 367
20.2. El motor asíncrono trifásico 368
20.2.1. Principio de funcionamiento del motor asíncrono trifásico 368
20.2.2. Motor asíncrono trifásico de rotor en cortocircuito 369
20.2.3. Sistemas de arranque de los motores asíncronos trifásicos de rotor en cortocircuito 374
20.3. Motor asíncrono de rotor bobinado o de anillos rozantes 377
20.4. Arrancadores estáticos (electrónicos) 378
20.5. Inversión de giro de un motor asíncrono trifásico 380
20.6. Regulación de velocidad de los motores asíncronos trifásicos 380
20.6.1. Motores de dos velocidades en conexión Dahlander 380
20.6.2. Motor de dos velocidades con dos devanados separados 381
20.7. Motores monofásicos 381
20.7.1. Motor monofásico de inducción de rotor en cortocircuito 381
20.7.2. Motor asíncrono monofásico de fase partida 382
20.7.3. Motor asíncrono monofásico con condensador de arranque. 382
20.7.4. Motor monofásico con espira en cortocircuito 384
20.7.5. Motor trifásico como monofásico. 384
20.7.6. Motor universal 384
20.8. Motor síncrono trifásico 385
20.8.1. Motor Brushless con síncrono. 386
20.8.2. Motor síncrono para el vehículo eléctrico 387
20.9. Motores especiales. 387
20.9.1. Motor paso a paso. 387
20.9.2. Servomotor 388
20.10. El alternador asíncrono de inducción 388
20.11. Ensayos de los motores de C.A. 389
Comprobación práctica en el laboratorio 390
Actividades de comprobación 391
Actividades de evaluación resueltas 392
Actividades de ampliación. 392

© Ediciones Paraninfo

21. Seguridad en las instalaciones electrotécnicas 393

21.1. Riesgo eléctrico. 394
21.2. Efectos fisiológicos producidos por la corriente eléctrica. 394
21.3. Factores que influyen en el riesgo eléctrico 395
21.3.1. Intensidad de la corriente y tiempo de duración del contacto. 396
21.3.2. Recorrido o trayectoria de la corriente a través del cuerpo 396
21.3.3. Impedancia o resistencia del cuerpo humano 396
21.3.4. Tensión de contacto 397
21.3.5. Tipo de corriente y frecuencia. 397
21.4. Tipos de contactos eléctricos y sistemas de protección 398
21.4.1. Contacto eléctrico directo 398
21.4.2. Sistemas de protección para evitar los contactos directos 399
21.4.3. Contacto eléctrico indirecto 401
21.4.4. Sistemas de protección contra contactos indirectos. 402
21.5. Riesgos de la electricidad sobre los materiales 409
21.5.1. Protección contra sobreintensidades 409
21.5.2. Protección contra sobretensiones. 410
21.6. Normativa sobre seguridad. 410
21.6.1. Ley de Prevención de Riesgos Laborales 410
21.6.2. Normativa sobre seguridad en el sector eléctrico 410
21.7. Normas de seguridad para la realización de trabajos eléctricos 411
21.7.1. Normas generales 411
21.7.2. Trabajos en ausencia de tensión 412
21.7.3. Trabajos en tensión. 417
21.8. Primeros auxilios en los accidentes eléctricos 418
Comprobación práctica en el laboratorio 419
Actividades de comprobación 420
Actividades de ampliación. 422

Solución a las actividades de comprobación 423

Recursos de aprendizaje en el material web 428

© Ediciones Paraninfo

Introducción a la 7.ª edición

Deseo dedicar esta nueva edición a todo el profesorado, el alumnado y los profesionales que siguen confiando en esta obra desde hace ya más de 15 años desde su primera edición. Espero que este sea un camino lleno de éxitos y que nos sea de ayuda para alcanzar los conocimientos necesarios para nuestro desarrollo profesional y personal.

En esta nueva edición se han revisado, ampliado y actualizado los contenidos que han ido evolucionando gracias a los avances tecnológicos; publicación de nuevas normas UNE referidas al sector eléctrico, o modificaciones del Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión. Además, se han añadido en el texto nuevas **Actividades resueltas** que ayuden a la comprensión de los contenidos.

Así, por ejemplo, se abordan temas referidos a los nuevos contadores de energía digitales, baterías de iones-litio y motores para el vehículo eléctrico, nuevo marcado de cables por su reacción al fuego, etcétera.

Al igual que en anteriores ediciones, además de la gran cantidad de **Actividades resueltas** incluidas en cada unidad, se propone el enunciado para la resolución de más de 100 actividades, denominadas **Actividades de evaluación resueltas**, en las que se puede consultar su proceso de resolución accediendo al MATERIAL WEB creado para este texto.

Dentro de los materiales de apoyo que se aportan en el MATERIAL WEB, se pueden encontrar más de 250 **Actividades de evaluación propuestas de ampliación** en las que se pone a prueba la habilidad del alumnado para la resolución de problemas que presentan mayor dificultad.

© Ediciones Paraninfo

Introducción

El objetivo de este texto es el de servir como herramienta básica de trabajo en el módulo de Electrotecnia para alumnos que vayan a cursar el ciclo formativo de grado medio de Técnico en Instalaciones Eléctricas y Automáticas. También será de gran ayuda a todos aquellos profesionales que desean ampliar y reforzar sus conocimientos en la materia.

Por supuesto, con ello no pretendemos dar unas reglas fijas de trabajo, sino que entendemos que es el profesor, en último caso, quien debe desarrollar y organizar el conjunto del módulo en función de la propia personalidad del grupo destinatario y de los recursos didácticos que se encuentren a su alcance. Se ha realizado un esfuerzo global para elaborar la herramienta docente más adecuada para este proceso de aprendizaje, basándonos para ello en las más modernas tendencias pedagógicas.

Por otro lado, entendemos que el módulo es muy amplio, y que es el profesor quien deberá decidir en todo momento qué aspectos del módulo son más relevantes, para poder incidir en ellos con más insistencia y hacer una reducción didáctica en caso de que el tiempo lectivo disponible no sea suficiente.

La competencia general del título de Técnico en Instalaciones Eléctricas y Automáticas consiste en montar y mantener infraestructuras de telecomunicación en edificios, instalaciones eléctricas de baja tensión, máquinas eléctricas y sistemas automatizados, aplicando normativa y reglamentación vigente, protocolos de calidad, seguridad y riesgos laborales, asegurando su funcionalidad y respeto al medioambiente.

La Electrotecnia es la disciplina tecnológica que estudia las aplicaciones de la electricidad, y abarca el estudio de los fenómenos eléctricos y

© Ediciones Paraninfo

electromagnéticos desde el punto de vista de la utilidad práctica de la electricidad incluidos en tres grandes campos de conocimiento y experiencia: 1) los conceptos y leyes científicas que explican el funcionamiento y comportamiento de los distintos aparatos, receptores y máquinas eléctricas, respecto a los fenómenos físicos que en ellos se producen; 2) las leyes, teoremas, principios y técnicas de análisis, cálculo y predicción del comportamiento de los circuitos eléctricos y electrónicos; y 3) los elementos con los que se montan y construyen circuitos, aparatos y máquinas eléctricas: representación, disposición, normalización, conexiones y características.

En el Real Decreto se expresan los siguientes resultados de aprendizaje:

1. *Realiza cálculos en circuitos eléctricos de corriente continua, aplicando principios y conceptos básicos de electricidad.*

2. *Reconoce los principios básicos del electromagnetismo, describiendo las interacciones entre campos magnéticos y conductores eléctricos y relacionando la Ley de Faraday con el principio de funcionamiento de las máquinas eléctricas.*

3. *Realiza cálculos en circuitos eléctricos de corriente alterna (CA) monofásica, aplicando las técnicas más adecuadas.*

4. *Realiza cálculos de las magnitudes eléctricas básicas de un sistema trifásico, reconociendo el tipo de sistema y la naturaleza y tipo de conexión de los receptores.*

5. *Reconoce los riesgos y efectos de la electricidad, relacionándolos con los dispositivos de protección que se deben emplear y con los cálculos de instalaciones.*

6. *Reconoce las características de los transformadores realizando ensayos y cálculos y describiendo su constitución y funcionamiento.*

7. *Reconoce las características de las máquinas de corriente continua realizando pruebas y describiendo su constitución y funcionamiento.*

8. *Reconoce las características de las máquinas rotativas de corriente alterna realizando cálculos y describiendo su constitución y funcionamiento.*

Para alcanzar estos resultados de aprendizaje se han incluido en este texto 21 unidades donde se tratan los aspectos fundamentales del módulo de «Electrotecnia»: 1, «La electricidad. Conceptos generales»; 2, «Resistencia eléctrica»; 3, «Potencia y energía eléctrica»; 4, «Efecto térmico de la electricidad»; 5, «Aplicaciones del efecto térmico»; 6, «Circuitos serie, paralelo y mixto»; 7, «Resolución de circuitos con varias mallas»; 8, «Generadores electroquímicos y fotovoltaicos»; 9, «Los condensadores»; 10, «Magnetismo y electromagnetismo»; 11, «Interacción entre la corriente eléctrica y un campo magnético»; 12, «La corriente alterna»; 13, «Circuitos serie R-L-C en C.A.»; 14, «Resolución de circuitos paralelos y mixtos en C.A.»; 15, «Sistemas trifásicos»; 16, «Medidas eléctricas»; 17, «Lámparas eléctricas»; 18, «El transformador» 19, «Máquinas eléctricas de C.C.»; 20, «Máquinas eléctricas de C.A.»; 21, «Seguridad en las instalaciones electrotécnicas».

En todas las unidades se ha intentado incluir una serie de experiencias y actividades de tipo práctico con la idea de integrar la teoría y la práctica como dos elementos de un mismo proceso de aprendizaje, mediante el cual se le presenta al alumno un material significativo para que pueda darle sentido a

© Ediciones Paraninfo

lo que aprende. De esta forma se emplea una metodología activa y por descubrimiento, como proceso de construcción de capacidades que integre conocimientos científicos (conceptuales), tecnológicos (concretos) y organizativos (individualmente y en equipo), con el fin de que el alumno se capacite para aprender por sí solo.

Se ha procurado que los contenidos desarrollados sean presentados a un nivel fundamental con un lenguaje sencillo y claro, procurando que sean significativos y que respondan a los problemas y situaciones de la realidad tecnológica actual y de los propios integrantes del proceso formativo. También se ha procurado que dichos contenidos sean interdisciplinares, dando oportunidad para que los alumnos influyan en la realidad presentada en los mismos. También, se ha hecho un importante esfuerzo para no incluir procesos de desarrollo matemático que resulten ser demasiado complejos para el nivel de los alumnos y que se aparten de los objetivos generales marcados.

Aparte de la unidad dedicada a las medidas eléctricas, debido a la importancia que este tema merece y con el objeto de dar a estos contenidos el sentido más práctico posible, se ha introducido el concepto de medida y, lo que es más importante, los procedimientos de utilización de los aparatos de medida en cada uno de los momentos del proceso de aprendizaje.

En las diferentes unidades se han incluido, aparte de los propios contenidos del módulo, una serie de **Actividades experimentales,** que, realizadas de una forma organizada en el laboratorio, ayudarán a acercar los contenidos abstractos del módulo a la realidad cotidiana de los alumnos. Estas experiencias sirven, en la mayoría de las ocasiones, como presentación de los contenidos que se van a tratar en cada una de las unidades (los alumnos observan, manipulan, miden y analizan elementos reales de la «Electrotecnia»).

Aquí también se sugiere el apoyo de estas fases de presentación con otro tipo de recursos: visualización de vídeos temáticos, visitas a instalaciones propias del centro educativo y a instalaciones industriales, etcétera.

Acompañando a los contenidos propios de la asignatura, se presenta una serie de **Actividades resueltas** con las que se pretende «ejemplificar» la solución de aquellos ejercicios que resulten más relevantes para la comprensión del módulo. A este respecto se han seleccionado, en todo momento, ejemplos que sean lo más cercanos a la realidad tecnológica y a los propios participantes del proceso de aprendizaje, huyendo en todo momento de ejercicios exclusivamente teóricos.

Además, se sugiere que el profesor proponga a los alumnos la resolución en el aula de las **Actividades propuestas** que aparecen en las diferentes unidades, con el fin de que los alumnos puedan comprobar al instante los conocimientos recién adquiridos. En el MATERIAL WEB que se ha preparado para este texto se incluye la solución a estas actividades, para que los alumnos puedan comprobar lo acertado de su proceso de resolución.

Al final de cada una de las unidades se sugieren una serie de actividades de **Comprobación práctica en el laboratorio** de carácter eminentemente práctico, que ayudarán a trasladar a la realidad todo aquello que se estudia en la teoría. Por supuesto, será el profesor el que decida qué tipos de ejercicios prácticos conviene llevar a cabo y cuándo es más conveniente hacerlo. Los ejercicios prácticos que aquí se incorporan son totalmente orientativos.

© Ediciones Paraninfo

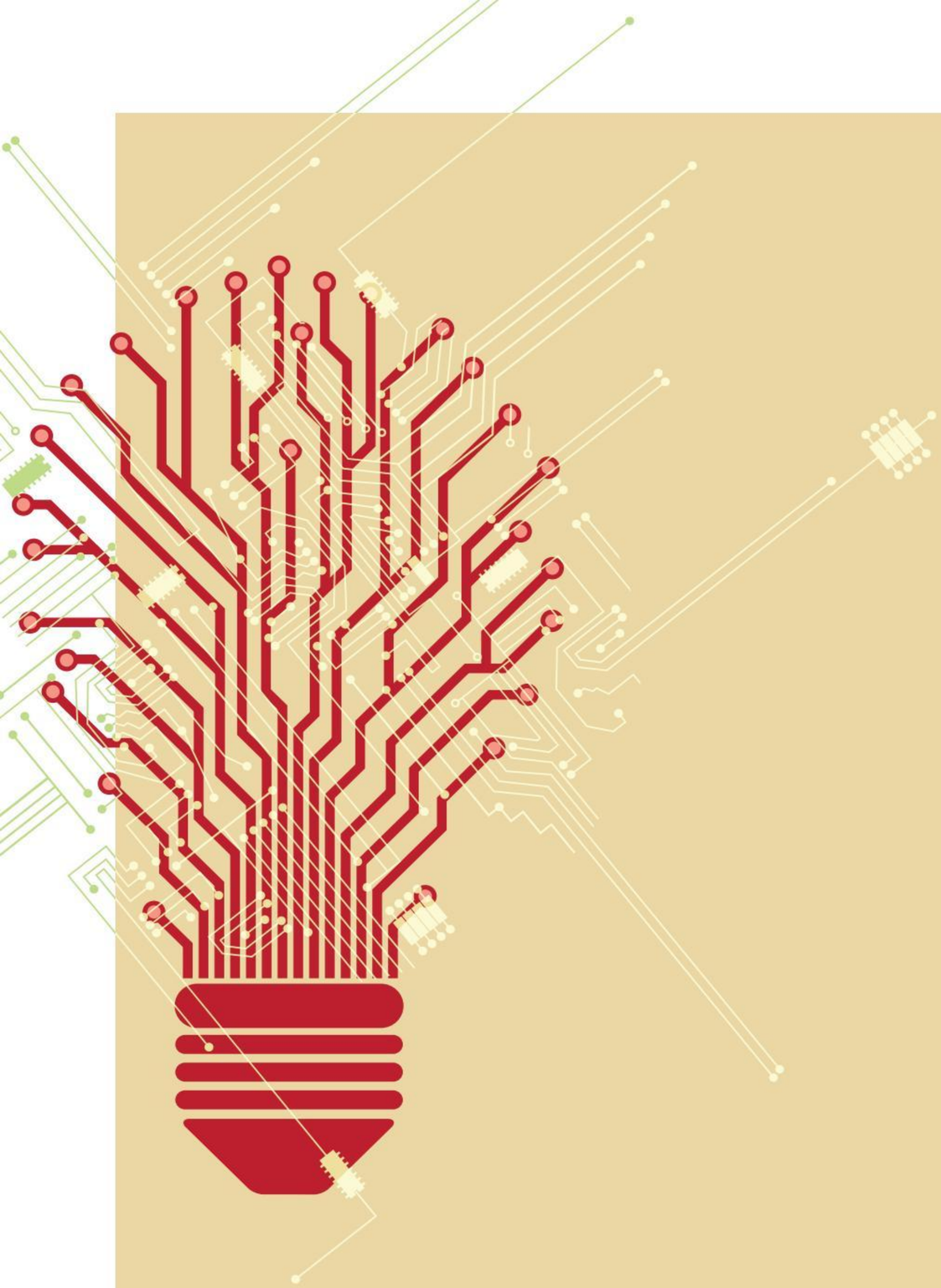
En cada una de las unidades se incorpora un apartado dedicado a **Actividades de comprobación.** Aquí se propone una serie de preguntas y ejercicios, en los que se aporta el resultado al final del texto con el fin de que los alumnos puedan autoevaluarse.

En todo momento se incentivará a los alumnos para que trabajen en grupo, planificando el desarrollo de las experiencias, ejercicios y actividades que a lo largo del curso se lleven a cabo en el laboratorio de «Electrotecnia». Al finalizar cada una de estas actividades es conveniente que los alumnos presenten un «informe-memoria» sobre la actividad desarrollada, indicando los resultados obtenidos y estructurándolos en los apartados necesarios para una adecuada documentación de las mismas (descripción del proceso seguido, medios utilizados, esquemas y planos utilizados, cálculos, medidas, etc.), exponiendo al resto del grupo sus trabajos.

Otro aspecto que cabe resaltar es que siempre resulta de gran interés que sean los propios alumnos los que investiguen ciertos procesos tecnológicos y busquen informaciones técnicas en las diferentes fuentes de información, estimulando así la curiosidad y el afán por saber. A este respecto, conviene dotar al aula con una completa biblioteca técnica, donde se incluyan manuales de uso de diferentes dispositivos electrotécnicos, así como una gran variedad de informaciones técnicas, tales como catálogos comerciales, revistas técnicas, reglamentos y normas vigentes en el campo de la Electrotecnia, proyectos ejemplo extraídos de la realidad, etcétera.

Si desean realizar algún comentario o sugerencia, pueden contactar con el autor escribiendo a la siguiente dirección electrónica: pablo.alcalde@hotmail.es

© Ediciones Paraninfo



1 La electricidad. Conceptos generales

Contenidos

- **1.1.** Producción y consumo de electricidad
- **1.2.** Efectos de la electricidad
- **1.3.** La electricidad
- **1.4.** Electricidad estática
- **1.5.** Carga eléctrica
- **1.6.** Movimiento de electrones
- **1.7.** El circuito eléctrico
- **1.8.** Formas de producir electricidad
- **1.9.** Intensidad de la corriente eléctrica
- **1.10.** Sentido real y convencional de la corriente
- **1.11.** Movimiento de electrones en un circuito
- **1.12.** Medida de la intensidad de la corriente eléctrica
- **1.13.** Corriente continua (C.C.)
- **1.14.** Corriente alterna (C.A.)
- **1.15.** Tensión eléctrica y fuerza electromotriz
- **1.16.** Medida de la tensión

La electricidad es una de las formas de energía que más ventajas y comodidades aporta a los seres humanos en la actualidad. Con ella conseguimos que funcionen, entre otras, las siguientes aplicaciones: luz con las lámparas eléctricas; calor con cocinas, hornos y calefacciones; frío con frigoríficos y equipos de aire acondicionado; fuerza motriz con motores (ascensores, máquinas herramientas, vehículos eléctricos, electrodomésticos, etc.); sistemas de información, automatización y telecomunicación con ordenadores, microprocesadores, sistemas robotizados, televisores, radio, etc., y muchas otras aplicaciones que con el paso de los años aparecerán.

Objetivos

- Entender los procedimientos de producción, transporte y consumo de la electricidad.
- Identificar las partes de un circuito eléctrico.
- Relacionar las magnitudes de un circuito eléctrico con su unidad de medida correspondiente, así como entender el papel de las mismas en el circuito y los aparatos de medida que las miden.
- Diferenciar una C.C. de una C.A.
- Emplear el voltímetro y el amperímetro de una forma adecuada.

1.1. Producción y consumo de electricidad

Hoy en día, la electricidad es una de las formas de energía más utilizada por el hombre. Con ella conseguimos hacer funcionar: lámparas eléctricas, calefacciones, cocinas, frigoríficos, ascensores, televisores, ordenadores, máquinas herramientas, lavadoras, aparatos de electromedicina..., !y muchas cosas más!

1.1.1. Producción de energía eléctrica

En la naturaleza se encuentran a disposición de las personas energías de muy diferentes tipos. Para realizar el trabajo se necesita gastar energía. La humanidad, durante siglos, hubo de cubrir sus necesidades a base de su propio esfuerzo (utilización de esclavos), animales domésticos, y máquinas de bajo rendimiento. Con el tiempo ha sabido aprovechar la energía, que se encuentra en la naturaleza para realizar el trabajo mas eficazmente y sin tanto esfuerzo.

El paso más importante fue cuando se consiguió transformar estas energías en una de más fácil transporte y consumo. Estamos hablando de la **energía eléctrica.**

1.1.2. Las centrales eléctricas

La electricidad se produce fundamentalmente en las centrales eléctricas. Su misión consiste en transformar cualquier forma de energía primaria (hidráulica, térmica, nuclear, solar, etc.) en energía eléctrica. Dada la facilidad con que se transporta la electricidad, por medio de las líneas eléctricas, la ventaja fundamental que conseguimos con esto es que producimos energía eléctrica en las zonas donde podemos acceder con facilidad a la energía primaria, para luego consumirla en ciudades, empresas o cualquier otro centro de consumo (Figura 1.1).

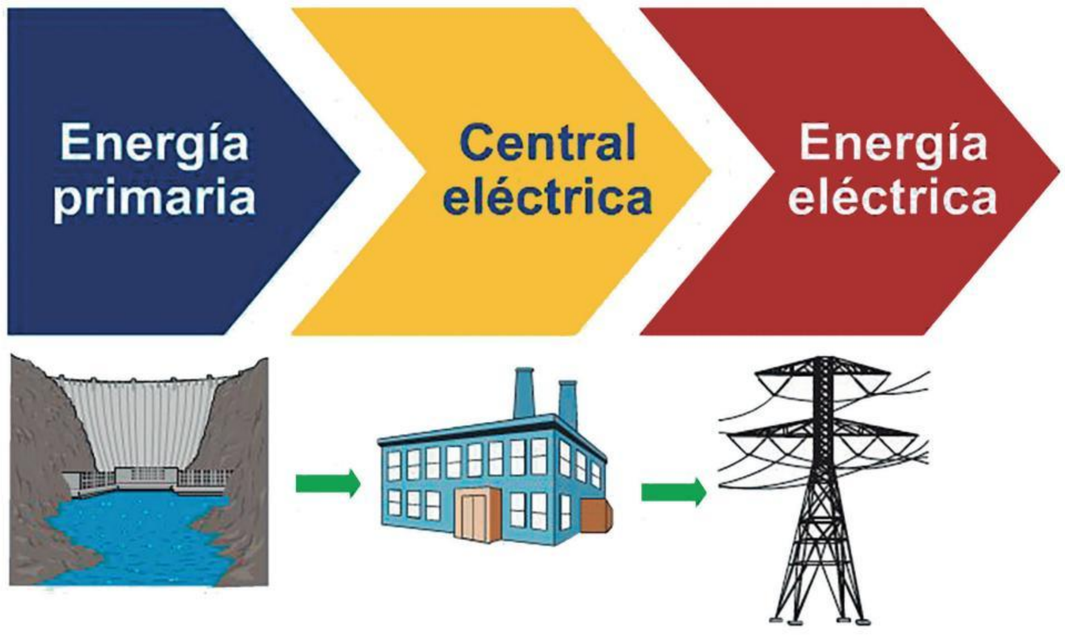


Figura 1.1. Diagrama de una central eléctrica.

Dependiendo de la energía primaria que utilicemos, tendremos los diferentes tipos de centrales eléctricas, tal como se puede apreciar en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1.

Nombre de la central	Energía primaria
Central hidráulica	Salto de agua
Central térmica clásica	Calor producido al quemar carbón, derivados del petróleo, gas natural, residuos urbanos, etc.
Central térmica nuclear	Calor producido en una reacción nuclear de fisión o de fusión
Central eólica	Viento
Central termosolar	Calor producido por el sol
Central solar fotovoltaica	Luz del sol
Central mareomotriz	Mareas
Central geotérmica	Calor de la tierra
Biomasa	Residuos forestales, agrícolas y orgánicos

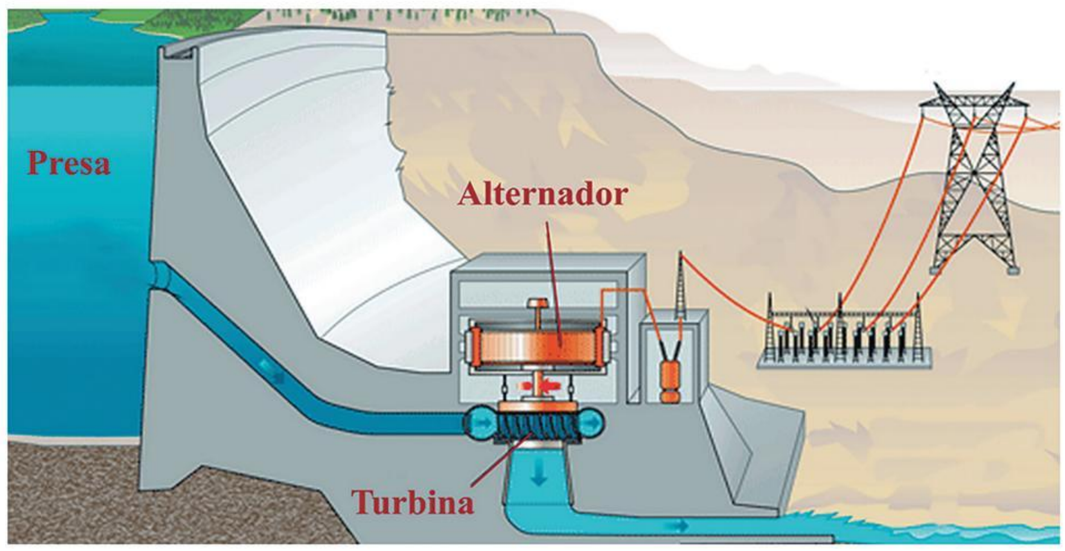


Figura 1.2. Las paletas de la turbina giran cuando el agua se mueve impulsada por la gravedad.

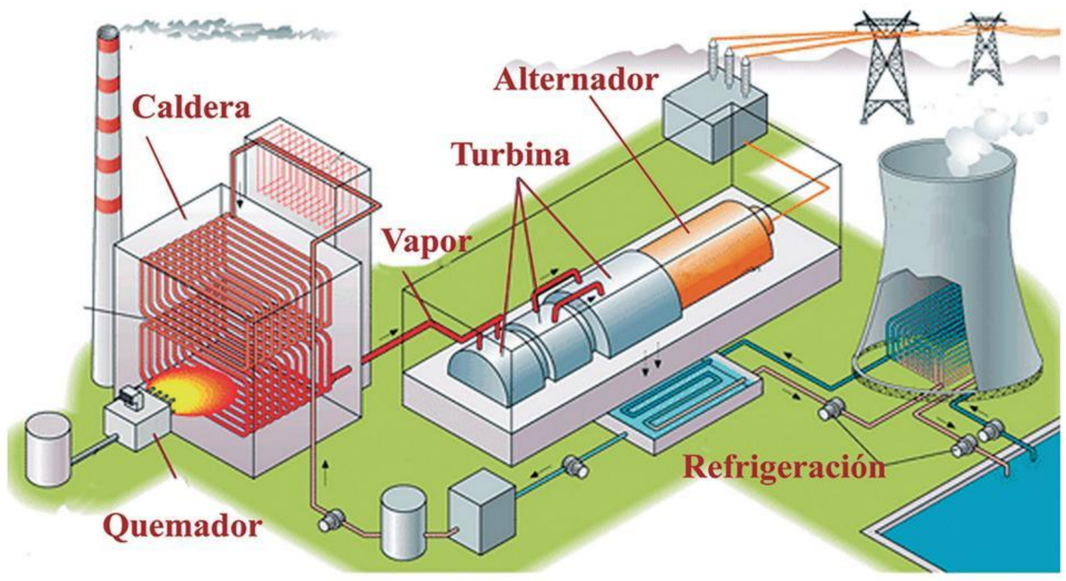


Figura 1.3. Los álabes de la turbina se mueven impulsados por el vapor a presión que se produce en la caldera.

© Ediciones Paraninfo

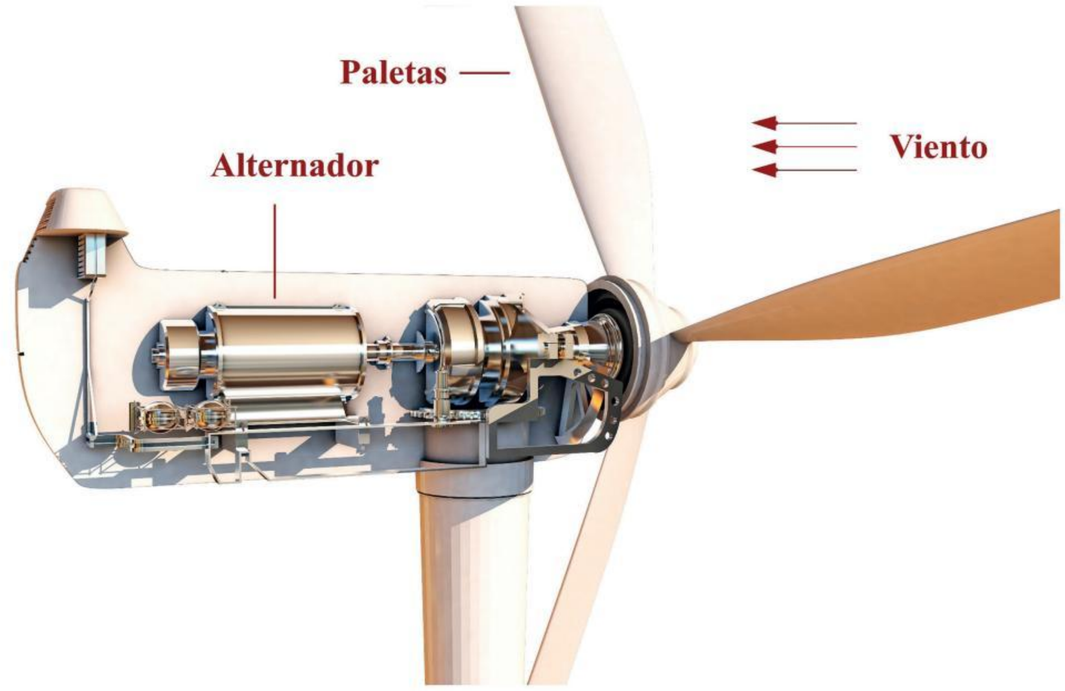


Figura 1.4. En un generador eólico, el viento mueve las paletas que hace girar el alternador.

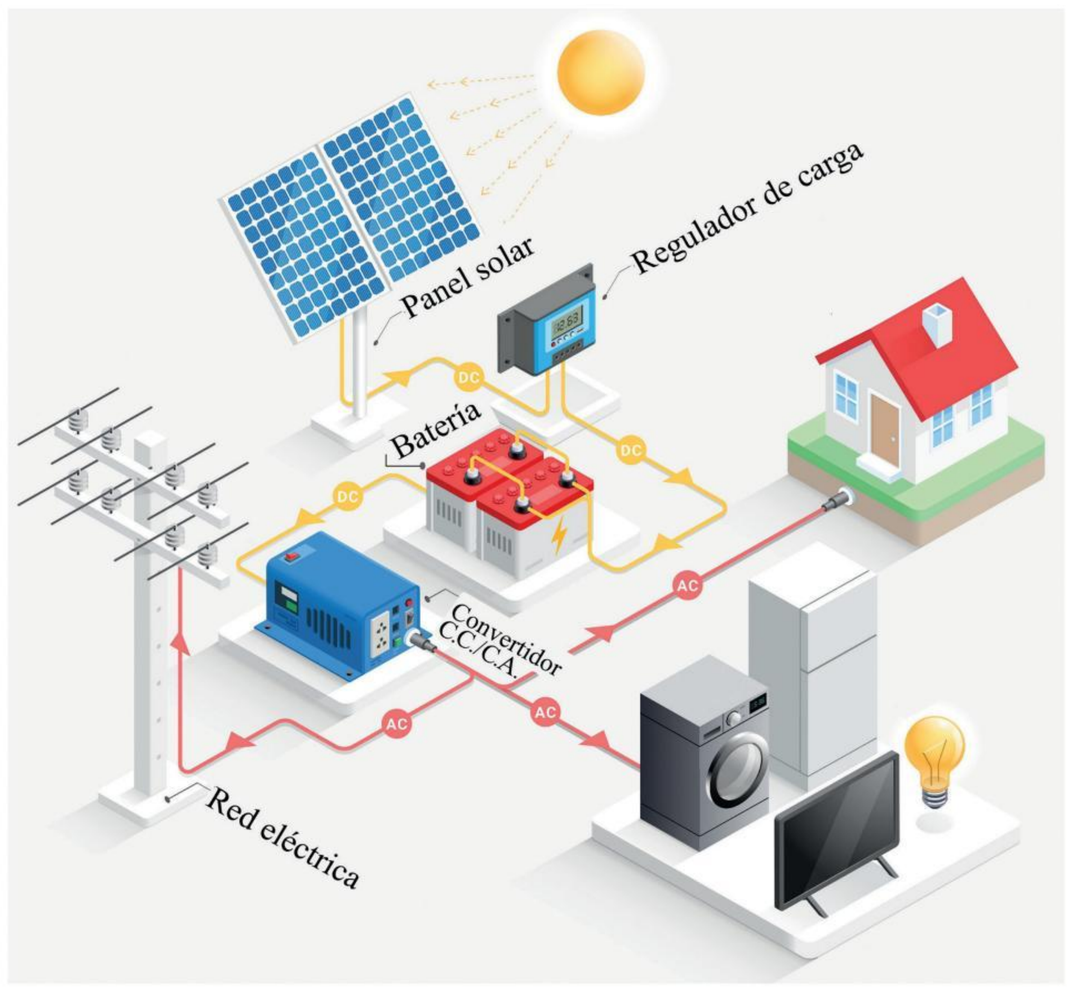


Figura 1.5. En una central fotovoltaica, la luz del sol produce electricidad gracias a los paneles solares.

1.1.3. El generador eléctrico

Los generadores eléctricos que se utilizan habitualmente en una central eléctrica se basan en un fenómeno que fue descubierto en 1820, por Faraday.

«Cuando se mueve un conductor eléctrico (hilo metálico), en el seno de un campo magnético (imán o electroimán) aparece una corriente eléctrica por dicho conductor. Lo mismo ocurre si se mueve el imán y se deja fijo el conductor» (Figuras 1.6 y 1.7).

En un generador eléctrico de corriente continua (dinamo) se hacen girar bobinas dentro del campo magnético producido por imanes o electroimanes. Las bobinas están conectadas a un anillo de cobre (colector) dividido en dos partes. Las escobillas de grafito se ponen en contacto con el anillo, y extraen la corriente al circuito exterior (Figura 1.8).

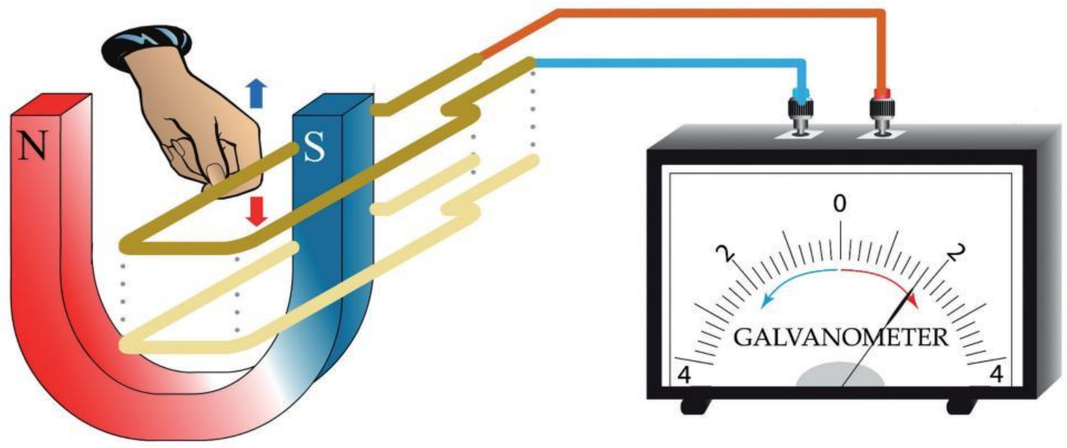


Figura 1.6. Cuando se mueve el conductor dentro de un campo magnético se produce electricidad.



Figura 1.7. Cuando se mueve un imán dentro de un conductor se produce electricidad.

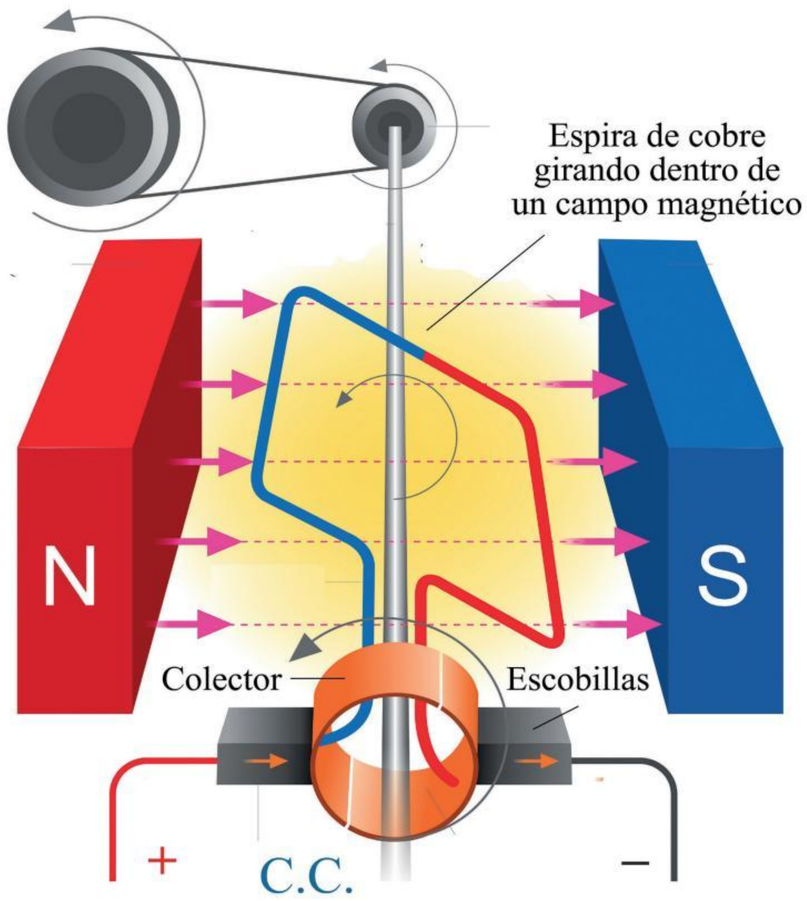


Figura 1.8. Generador de corriente continua o dinamo.

En un generador eléctrico de corriente alterna (alternador elemental) también se hacen girar las bobinas dentro

© Ediciones Paraninfo

de un campo magnético, pero en este caso la electricidad producida se recoge mediante dos anillos colectores de cobre (Figura 1.9).

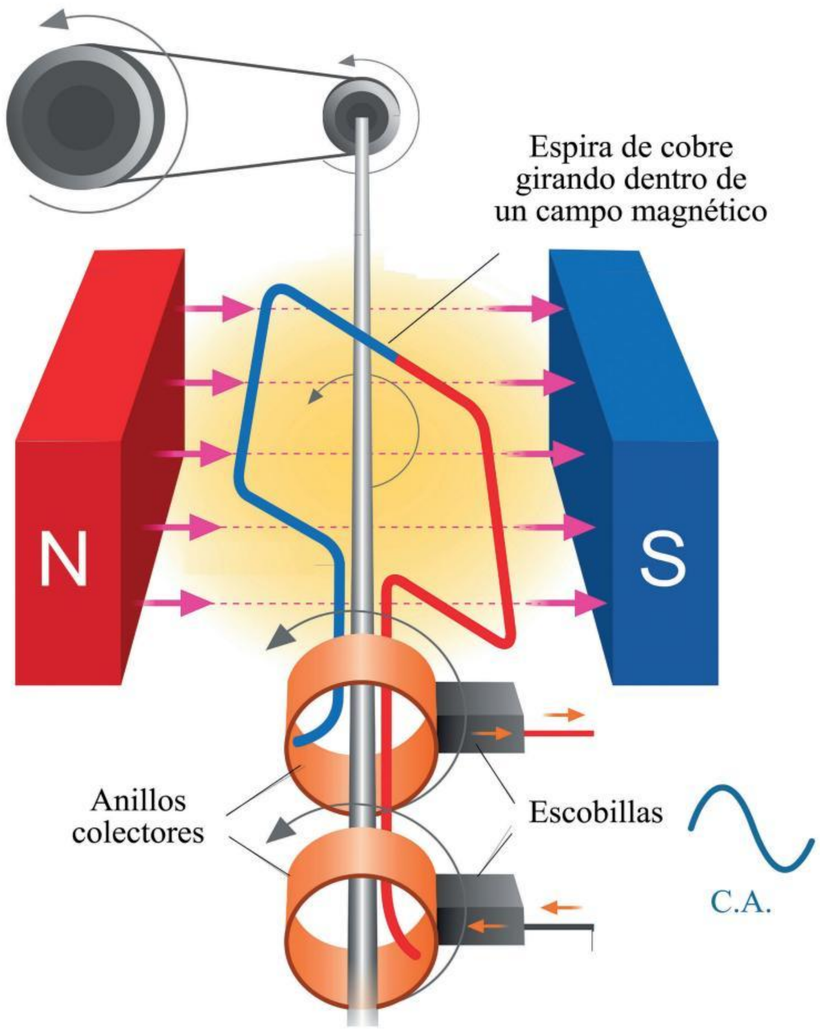


Figura 1.9. Generador de corriente alterna o alternador.

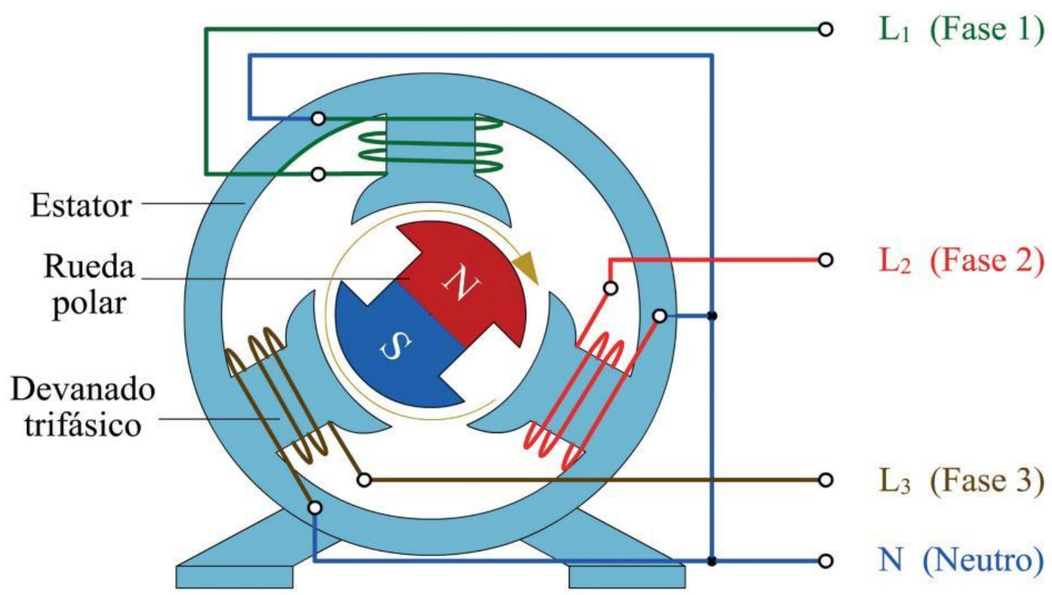


Figura 1.10. En un alternador trifásico un potente imán o un electroimán gira en el rotor. El campo magnético en movimiento produce en cada una de las tres bobinas del estator una corriente alterna trifásica con tres fases y un neutro.

En las primeras centrales eléctricas se utilizaba la dinamo como generador de corriente continua. Para poder transportar la electricidad a grandes distancias sin grandes pérdidas es necesario elevar la tensión a miles de voltios. Esta elevación solamente es posible con los transformadores que solo funcionan con la corriente alterna. Actualmente los generadores utilizados son los alternadores trifásicos, que generan corriente alterna trifásica (Figura 1.10).

1.1.4. El transporte de la electricidad

Los alternadores de las centrales proporcionan la energía eléctrica a una tensión de 10.000 a 20.000 voltios. Una vez producida la electricidad por estos, hay que transportarla hasta las ciudades, industrias, y todo tipo de centros de consumo que, casi siempre, se encuentran a mucha distancia. El transporte se realiza a través de líneas eléctricas. Como estas no son perfectas, ya que poseen resistencia eléctrica, se producen grandes pérdidas de energía en forma de calor.

Para reducir estas pérdidas se utilizan líneas de alta tensión (220.000, 380.000 voltios). De esta forma, se disminuye la intensidad de la corriente eléctrica y la electricidad puede recorrer grandes distancias con pocas pérdidas (véase Figura 1.11).

El generador produce la energía eléctrica a una tensión de 10.000 a 20.000 V. En la estación transformadora se eleva dicha tensión a 220.000 o 380.000 V, dependiendo de la cantidad de energía que hay que transportar.

Los aparatos que consiguen elevar la tensión son los **transformadores eléctricos.** Estos dispositivos solamente funcionan para la corriente alterna.

Las **líneas eléctricas de alta tensión** transportan la energía eléctrica desde las centrales hasta las proximidades de los centros de consumo. Estas líneas constan de tres conductores eléctricos (por lo general son de aluminio reforzados con acero) sujetos a torres metálicas de celosía y de gran altura. Las altas tensiones son muy peligrosas, por eso cuanto mayor es el valor de la tensión de la línea, mayor altura tienen dichas torres.

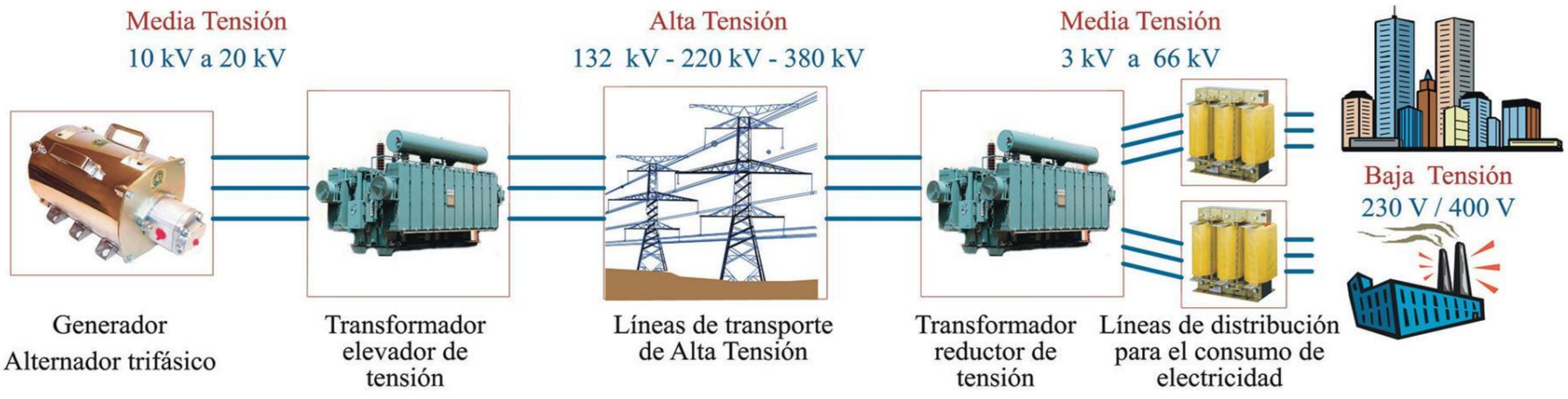


Figura 1.11. Sistema de producción, transporte y distribución de la energía eléctrica.

© Ediciones Paraninfo

Las **subestaciones de transformación** preparan la energía eléctrica para ser distribuida, en un mayor número de líneas, hacia los centros de consumo (grandes industrias, pequeñas poblaciones, sectores de una ciudad, etc.). Esto se lleva a cabo con varios transformadores reductores que proporcionan media tensión en su salida. Las líneas de media tensión, que distribuyen la energía por los mencionados centros de consumo, suelen ser subterráneas. De esta manera, se reduce el peligro de las mismas. Por último, se sitúan transformadores reductores cerca de los consumidores y se lleva a cabo la última reducción de la tensión, suministrando 230 o 400 voltios (baja tensión). Estas tensiones son ya mucho menos peligrosas para las personas que utilizan la electricidad.

La **red eléctrica** une todos los centros generadores de energía con los de consumo de un país. De esta forma, se consigue un gran equilibrio entre la cantidad de energía consumida y la producida por las centrales eléctricas, con lo que se logra dar estabilidad al suministro de energía eléctrica. Así, por ejemplo, si una central tuviese que parar por fallo técnico, o por falta de energía primaria, siempre habrá otras que se encarguen de suministrar la energía eléctrica que esta dejó de producir.

Incluso, todos los países de un continente se interconectan a través de la red eléctrica. Para que esto sea posible, todos los generadores de las centrales tienen que producir electricidad del mismo tipo. Así, por ejemplo, en la red eléctrica europea se utiliza la corriente alterna trifásica a una frecuencia de 50 Hz (en América 60 Hz).

Gracias a la red eléctrica es posible que un país compre o venda energía a otro. Todo dependerá de las necesidades que tenga cada uno de los países en cada momento. Incluso puede darse el caso de que, por ejemplo, Francia venda energía eléctrica a Portugal a través de la red eléctrica española.

1.2. Efectos de la electricidad

Pero ¿qué es exactamente la electricidad? Podríamos decir que es lo que hace girar los motores, lucir las lámparas, etc.; en definitiva, una fuerza que, como tal, es invisible y de la cual solo se notan sus efectos.

Los efectos fundamentales que se conocen de la corriente eléctrica son:

Efecto térmico: al fluir la corriente eléctrica por ciertos materiales conductores, llamados resistivos, como el carbón, se produce calor en ellos, por lo que pueden construirse, gracias a este efecto, calefacciones, cocinas, hornos, calentadores de agua, planchas, secadores, etc. (Figura 1.12).

Efecto luminoso: en una lámpara eléctrica incandescente, al fluir por su filamento resistivo una corriente eléctrica, este se calienta a altas temperaturas, irradiando luz (Figura 1.13).

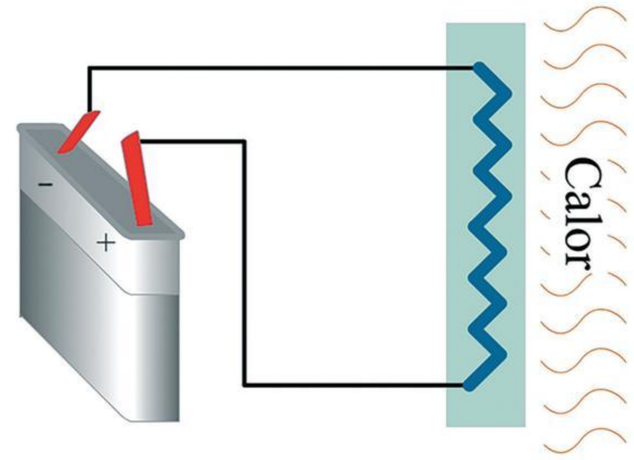


Figura 1.12. Efecto térmico de la electricidad.

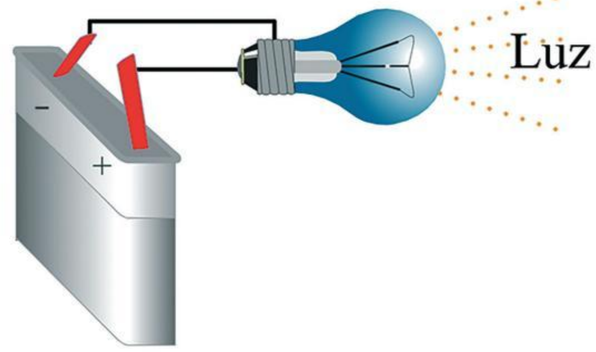


Figura 1.13. Efecto luminoso de la electricidad.

Efecto químico: al fluir la corriente eléctrica por ciertos líquidos, estos se disgregan, y a este proceso se le da el nombre de electrólisis. Gracias a este efecto se pueden producir productos químicos y metales, baños metálicos (galvanización) y recarga de baterías de acumuladores (Figura 1.14).

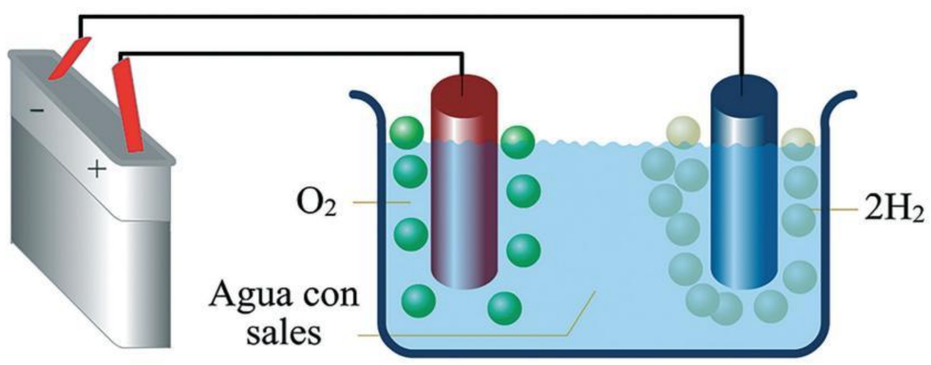


Figura 1.14. Efecto químico de la electricidad.

Efecto magnético: al conectar una bobina a un circuito eléctrico, aquella produce un campo magnético similar al de un imán, lo que origina un efecto de atracción sobre ciertos metales. Aprovechando este efecto se pueden construir electroimanes, motores eléctricos, altavoces, instrumentos de medida, etc. (Figura 1.15).

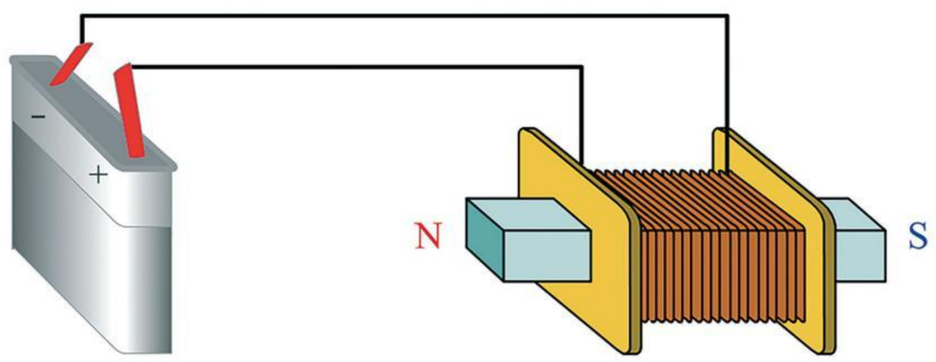


Figura 1.15. Efecto magnético de la electricidad.

© Ediciones Paraninfo

1.3. La electricidad

La electricidad es una manifestación física que tiene que ver con las modificaciones que se dan en las partes más pequeñas de la materia, en los átomos, y más concretamente en el electrón. Seguidamente estudiaremos los fenómenos de electrización que se dan en los materiales.

Actividad experimental 1.1

Consigue un bolígrafo de plástico y frótalo con un paño de lana. Seguidamente, acércalo a unos pedacitos de papel (Figura 1.16).

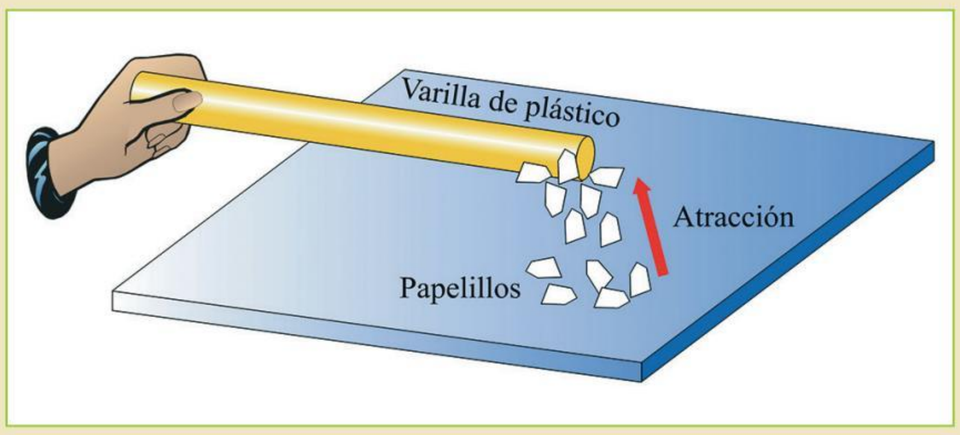


Figura 1.16. Atracción eléctrica por frotamiento.

Después de frotar el bolígrafo los trozos de papel son atraídos por aquel, lo que indica que como consecuencia del frotamiento se han desarrollado determinadas fuerzas debido a las cargas eléctricas, que previamente no existían.

Para explicar el fenómeno de electrización observado en la Actividad experimental 1.1 es necesario comprender los cambios que se han producido en las partes más pequeñas de la materia.

Los materiales están compuestos básicamente por moléculas, siendo estas las partículas más pequeñas que poseen todas las propiedades físicas y químicas del material original. A su vez, estas moléculas se componen de otras partículas más pequeñas, llamadas átomos. Así, por ejemplo, la molécula de agua se compone de dos átomos de hidrógeno y de uno de oxígeno, tal como indica su fórmula química H_2O.

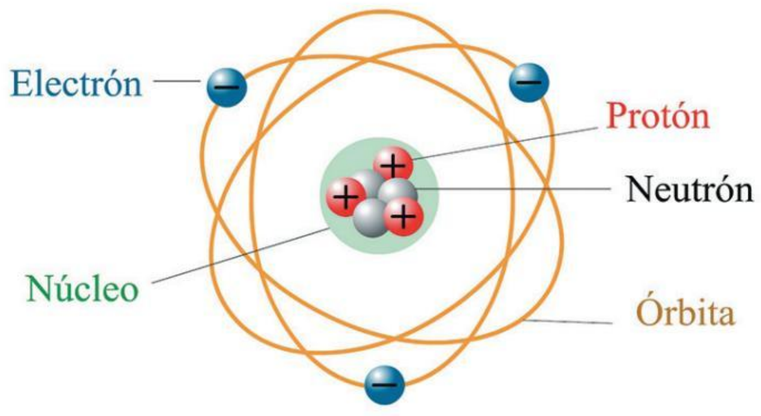


Figura 1.17. Estructura del átomo.

El átomo es muy pequeño, del orden de una diezmillonésima parte de 1 milímetro. Está compuesto de partes todavía más pequeñas, como el núcleo y los electrones. El núcleo del átomo está formado por partículas elementales, tales como los protones y neutrones (Figura 1.17).

Los electrones giran a gran velocidad en órbitas alrededor del núcleo.

Si fuera posible situar un electrón frente a un protón, se podría observar un fenómeno de atracción. Al contrario, si enfrentamos dos electrones o dos protones, estos se repelen (Figura 1.18). Esto nos indica que tanto el electrón como el protón poseen una propiedad que se manifiesta en forma de fuerzas de atracción y de repulsión; nos estamos refiriendo a la carga eléctrica. Esta carga eléctrica es de diferente signo para el electrón y para el protón:

- *El protón tiene carga eléctrica positiva.*
- *El electrón tiene carga eléctrica negativa.*

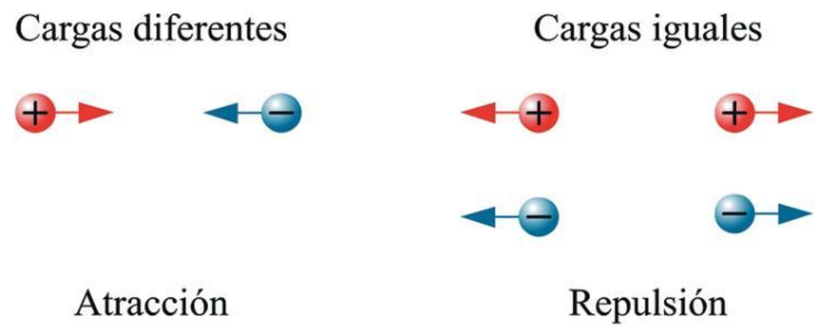


Figura 1.18. Fenómenos de atracción y repulsión en las cargas eléctricas.

En un átomo, los protones se concentran en el núcleo junto a los neutrones y algunas partículas atómicas. A pesar de que los protones poseen carga positiva y entre ellos existe una gran fuerza repulsiva, estos se mantienen confinados y muy próximos entre sí en el núcleo, debido a las enormes fuerzas de carácter nuclear. Los neutrones no poseen carga eléctrica y aportan masa al núcleo del átomo.

Los fenómenos que se dan en un átomo son comparables a los que se dan en el sistema solar. El planeta es el electrón y el sol es el núcleo. En un átomo los electrones giran a gran velocidad dentro de sus respectivas órbitas alrededor del núcleo. La fuerza centrífuga que los electrones desarrollan en su giro se ve compensada por la fuerza de atracción que aparece entre los protones de carga positiva situados en el núcleo y dichos electrones.

El electrón posee una masa muy pequeña, en torno a algo más de la milésima parte de la masa de un protón. Además, los electrones más alejados del núcleo son atraídos con menor fuerza por este, lo que hace posible su movilidad hacia otros átomos.

Átomo con carga neutra: un átomo en estado normal posee el mismo número de electrones que de protones. Esto hace que exista un equilibrio entre las fuerzas de carácter

© Ediciones Paraninfo

eléctrico que se dan entre protones y neutrones, y por tanto que dicho átomo permanezca eléctricamente neutro. Así, por ejemplo, un átomo de litio posee 3 protones y 3 electrones: 3(+) + 3(–) = 0 (Figura 1.19).

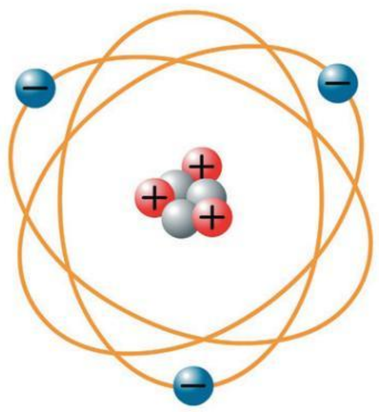


Figura 1.19. Átomo con carga neutra.

Átomo con carga positiva: si por algún medio consiguiésemos arrancar electrones de las últimas órbitas de los átomos, surgiría un desequilibrio entre el número de cargas negativas y positivas; estas últimas serían mayores y conferirían, por tanto, una carga positiva a dicho átomo. Así, por ejemplo, al frotar con un paño el litio, es posible que se arranque un electrón de su última órbita, quedando el átomo cargado positivamente por poseer un defecto de electrones: 3(+) + 2(–) = 1(+) (Figura 1.20).

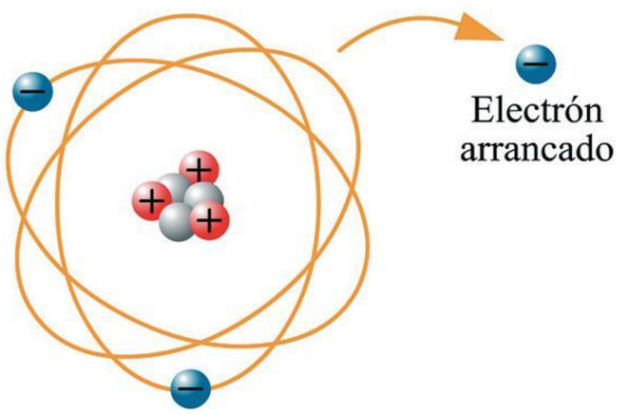


Figura 1.20. Átomo con carga positiva.

Átomo con carga negativa: de la misma manera, si por algún procedimiento conseguimos agregar electrones a un átomo eléctricamente neutro, este exceso de electrones produce una carga negativa en el átomo. En el ejemplo del litio, al añadir un electrón en su última órbita se origina en él una carga negativa: 3(+) + 4(–) = 1(–) (Figura 1.21).

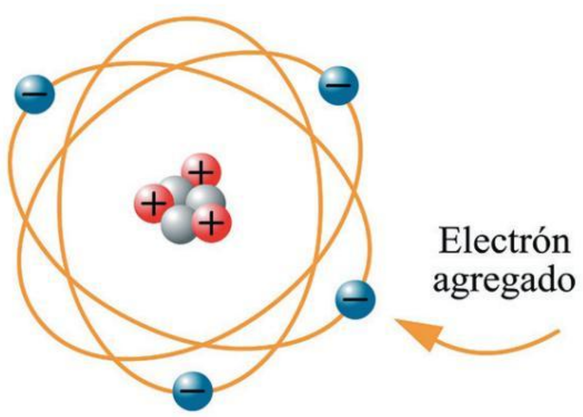


Figura 1.21. Átomo con carga negativa.

1.4. Electricidad estática

Al frotar determinados materiales aislantes, estos pierden o ganan electrones, lo que origina cargas eléctricas estáticas en dichos materiales. Este tipo de electricidad es el que se da, por ejemplo, en la Actividad experimental 1.1, realizada anteriormente.

Al frotar el bolígrafo de plástico con el paño, se transfieren electrones de un elemento a otro, quedando el bolígrafo cargado eléctricamente. Cuando acercamos el bolígrafo, cargado con electricidad estática, este atrae a los papelitos, como es propio de los cuerpos electrizados.

El tipo de carga (positiva o negativa) con la que se electrizan los materiales después de haber sido frotados depende de los materiales que se empleen en el proceso. Así, por ejemplo, si se frota una barra de vidrio con un paño de lana, los electrones se transfieren del vidrio hacia el paño, quedando electrizado el primero con carga positiva (Figura 1.22).

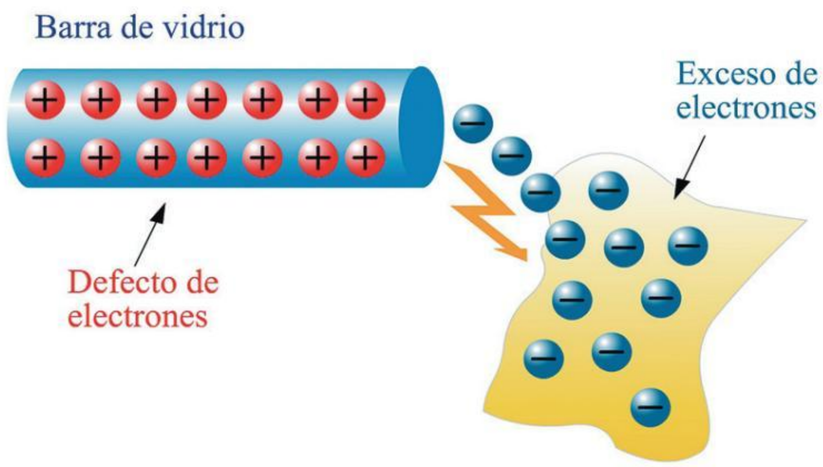


Figura 1.22. Al frotar, el vidrio se electriza con carga positiva.

Por otro lado, si lo que frotamos es una barra de ebonita con una piel de animal, los electrones son transferidos de la piel a la ebonita, quedando esta última cargada negativamente (Figura 1.23).

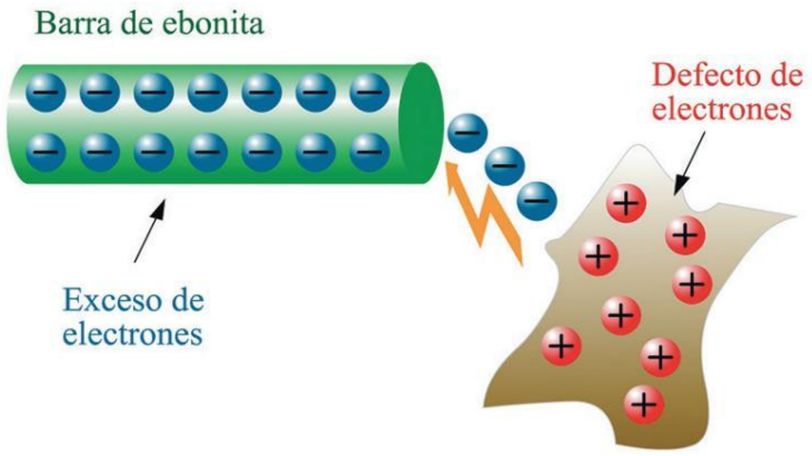


Figura 1.23. Al frotar la ebonita se electriza con carga negativa.

¿Qué ocurre si después de frotar dos barras de vidrio se acercan? (véase la Figura 1.24).

¿Qué ocurre si después de frotar una barra de vidrio y una de ebonita las barras se acercan? (véase la Figura 1.25).

© Ediciones Paraninfo

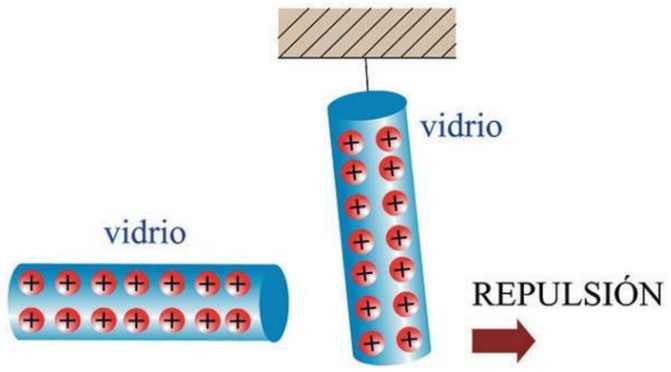


Figura 1.24. Dos barras cargadas positivamente se repelen.

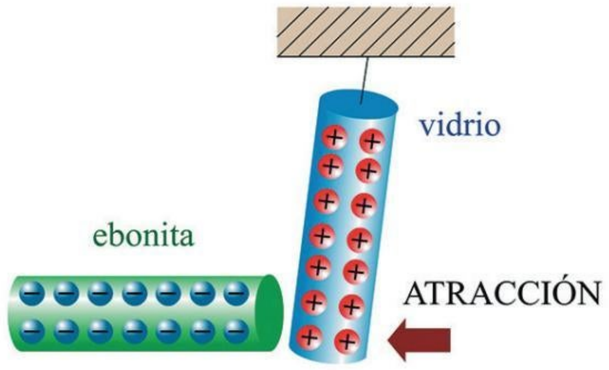


Figura 1.25. Dos barras cargadas con diferente carga se atraen.

El causante en todo momento de la electrización de los cuerpos es el electrón, ya que posee carga y movilidad para poder desplazarse por los materiales. A partir de estos dos conceptos es posible que exista la electricidad.

1.5. Carga eléctrica

Se conoce como carga eléctrica de un cuerpo al exceso o defecto de electrones que este posee:

- *Carga negativa significa exceso de electrones.*
- *Carga positiva significa defecto de electrones.*

La unidad de carga eléctrica es el **culombio.**

Un culombio equivale aproximadamente a un exceso o defecto de 6 trillones de electrones (1 culombio = $6{,}3 \cdot 10^{18}$ electrones).

Actividad resuelta 1.1

Determina la carga eléctrica que tiene una barra de ebonita si una vez frotada posee un exceso de $25{,}2 \cdot 10^{18}$ electrones:

Solución:

$$Q = \frac{25{,}2 \cdot 10^{18}}{6{,}3 \cdot 10^{18}} = 4 \text{ culombios de carga negativa}$$

1.5.1. Ley de Coulomb

Coulomb consiguió medir la fuerza que desarrollan las cargas eléctricas cuando se encuentran muy próximas. De esta forma, dedujo que:

Dos cargas eléctricas puntuales Q_1 y Q_2 ejercen una sobre otra fuerzas de atracción y repulsión que son directamente proporcionales al producto de dichas cargas e inversamente proporcionales al cuadrado de la distancia que las separa (Figura 1.26).

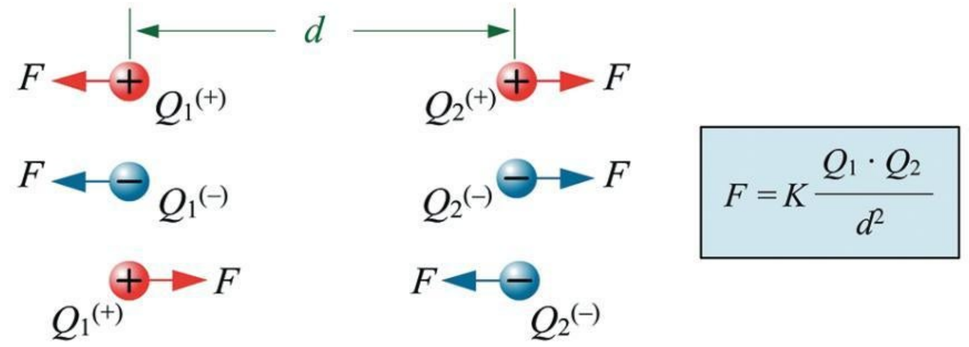


Figura 1.26. Fuerzas de atracción y repulsión entre cargas eléctricas.

Si expresamos la fuerza (F) en newtons, las cargas Q_1 y Q_2 en culombios y la distancia (d) en metros, la constante de proporcionalidad (K) para el vacío o el aire será:

$$K = 8{,}987 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$$

1.5.2. Campo eléctrico

Cuando frotamos el bolígrafo y este atrae a los papelillos, ello es debido a que el bolígrafo ha desarrollado un campo de fuerzas eléctricas. Estamos hablando del campo eléctrico. Así, se puede decir que:

Un campo eléctrico es una región del espacio en la que una carga eléctrica está sometida a una fuerza de carácter eléctrico.

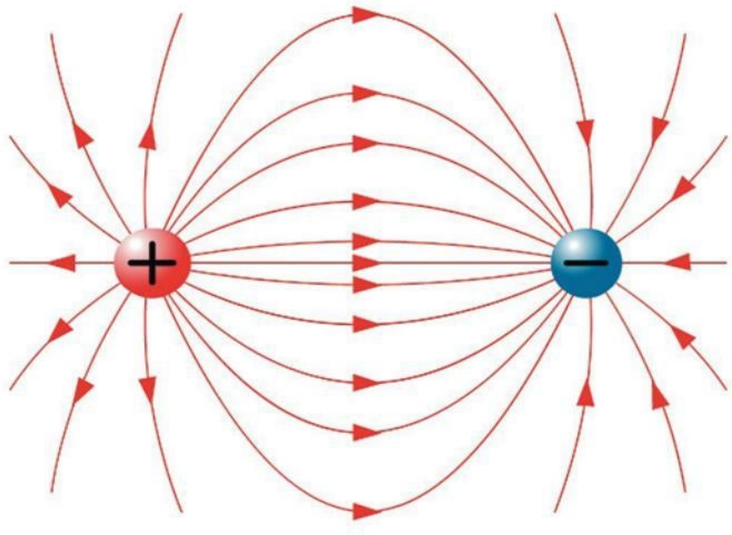


Figura 1.27. Líneas de fuerza del campo eléctrico formado por dos cargas eléctricas de diferente signo.

© Ediciones Paraninfo

1.6. Movimiento de electrones

Supongamos que cargamos eléctricamente, por frotamiento, una bola de vidrio y otra de ebonita y las disponemos tal como se indica en la Figura 1.28. Entre ellas aparece una diferencia de carga eléctrica.

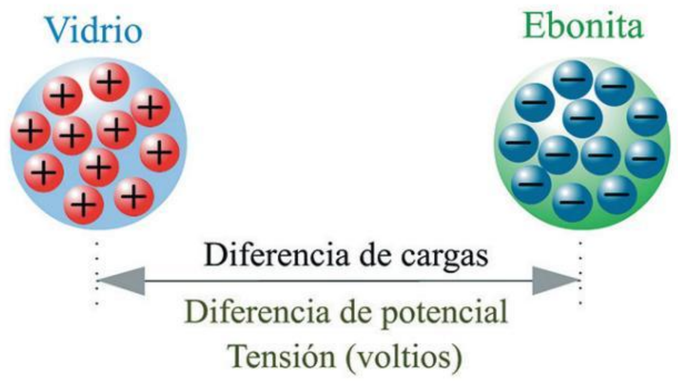


Figura 1.28. Diferencia de cargas o tensión eléctrica.

Si ahora unimos eléctricamente las dos bolas mediante un conductor eléctrico (Figura 1.29), los electrones en exceso de la bola de ebonita cargada negativamente serán atraídos con fuerza por la carga positiva de la bola de vidrio. Dado que existe un camino conductor por donde se pueden desplazar los electrones de una bola a otra, aparece un **movimiento de electrones** por dicho camino hasta que las cargas quedan compensadas, es decir, hasta que la **diferencia de cargas** deja de existir.

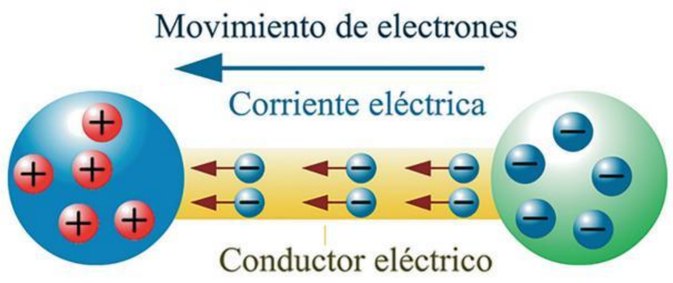


Figura 1.29. Corriente eléctrica.

Al movimiento de electrones que se establece por el conductor eléctrico se le denomina **corriente eléctrica.**

Como se puede observar en la Figura 1.29, el sentido de la corriente eléctrica lo establecen los electrones, es decir, del cuerpo donde hay exceso de electrones hasta el cuerpo donde hay defecto de ellos (del negativo al positivo).

A la diferencia de cargas que se establece entre los dos cuerpos cargados eléctricamente, y que es la causante del movimiento de electrones, se la conoce por otro nombre: **tensión o diferencia de potencial.**

1.6.1. Electricidad atmosférica

La palabra tormenta es sinónima de tempestad; es decir, una perturbación atmosférica muy violenta que va acompañada de fenómenos eléctricos. Es un gran espectáculo de la Naturaleza, pues en él se manifiestan la lluvia, el granizo, el viento, los rayos, los relámpagos y los truenos.

El rayo es una descarga eléctrica que salta de una nube a otra, o a tierra, cuando ambas están cargadas de electricidad de diferente signo y hay suficiente proximidad para provocar la chispa. El relámpago es el resplandor que esa misma descarga produce, y el trueno el ruido o estampido que acompaña a las chispas, y que se percibe en último lugar porque, como se sabe, el sonido se transmite a una velocidad de 331,8 m/s, mientras que electricidad y la luz se desplazan a una velocidad infinitamente superior: 300.000 km/s.

La tensión de descarga de un rayo oscila desde los 2 millones de voltios hasta los 100 millones. La intensidad de la corriente suele ser del orden de 10.000 a 20.000 amperios.

La electricidad atmosférica es la primera forma de electricidad que se conoce. Esta forma de producir electricidad no es de utilidad, en ningún caso, y más bien trae desgracias que otra cosa.

Las tormentas dependen del Sol. Cuanto más calor hace, tanto más fácilmente se forman, por regla general (véase la Figura 1.30).

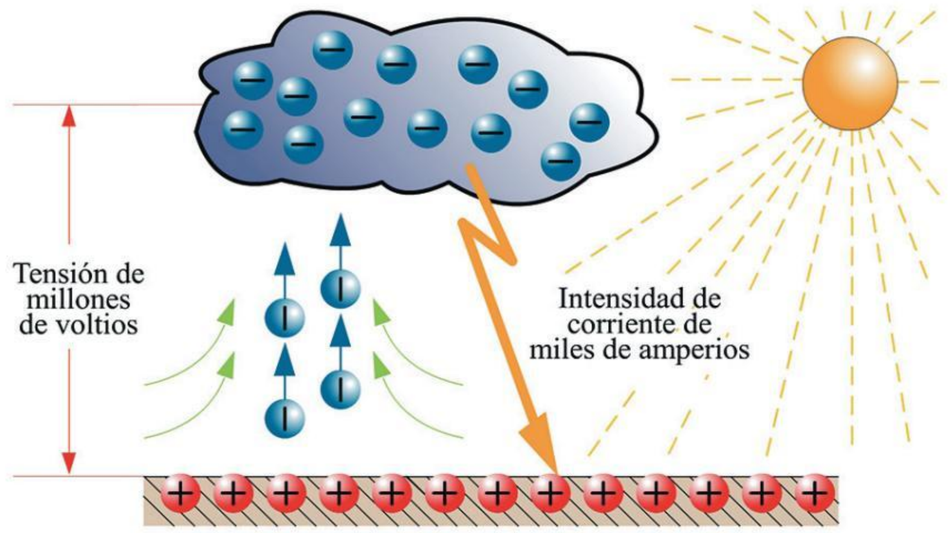


Figura 1.30. El rayo en la tormenta.

El sol calienta el aire en la proximidad de la tierra; el aire caliente tiende a elevarse arrancando consigo en su rápida ascensión diminutas partículas de agua. Cuando las gotitas de agua se subdividen en partículas, de las que algunas son más pequeñas que 0,00001 mm, las partes más diminutas contienen más electrones libres de los que en realidad les corresponden. Estos electrones libres provienen de las partículas acuosas de mayor tamaño de las que se desgajaron las más pequeñas. En electrotecnia se dice que las partículas pequeñas se encuentran cargadas negativamente y las mayores poseen cargas positivas. Estas partículas acuosas, cargadas negativamente, suben arrastradas por el torbellino. A medida que las partículas se elevan, la temperatura desciende. El descenso es aproximadamente de medio grado por cada cien metros. Debido a esto las partículas gaseosas se condensan y forman nubes. Sobre nosotros flota la nube tempestuosa y entre ella y la tierra una tensión de millones de voltios queriendo reconstruir el equilibrio eléctrico, a lo

© Ediciones Paraninfo

que se opone un buen aislante, el aire, contra cuya acción separadora no puede en principio la tormenta. Y no podría nunca si no existieran en el aire algunos electrones libres. Estos quedan sometidos a tensiones gigantescas y son arrastrados hacia la tierra. Su velocidad crece cada vez más bajo el enorme influjo de las gigantescas tensiones. Al golpear estos electrones con átomos neutros, estos pierden algunos de sus electrones, y estos, a su vez, vuelven a chocar con otros átomos, produciéndose siempre la liberación de nuevos electrones. En poquísimo tiempo aumenta en millones el número de elementos conductores de la electricidad. La elevada tensión se ha creado un camino y la nube descarga una gran cantidad de electrones hacia la tierra. La intensidad de la corriente es tan grande que al atravesar el aire, este llega a ponerse al rojo blanco, la temperatura se eleva a 20.000 grados y se produce una explosión: la nube ha descargado en forma de rayo su carga eléctrica.

1.7. El circuito eléctrico

Actividad experimental 1.2

Consigue una pila y una lámpara de linterna y conéctalas con unos conductores de cobre tal como se indica en la Figura 1.31(a).

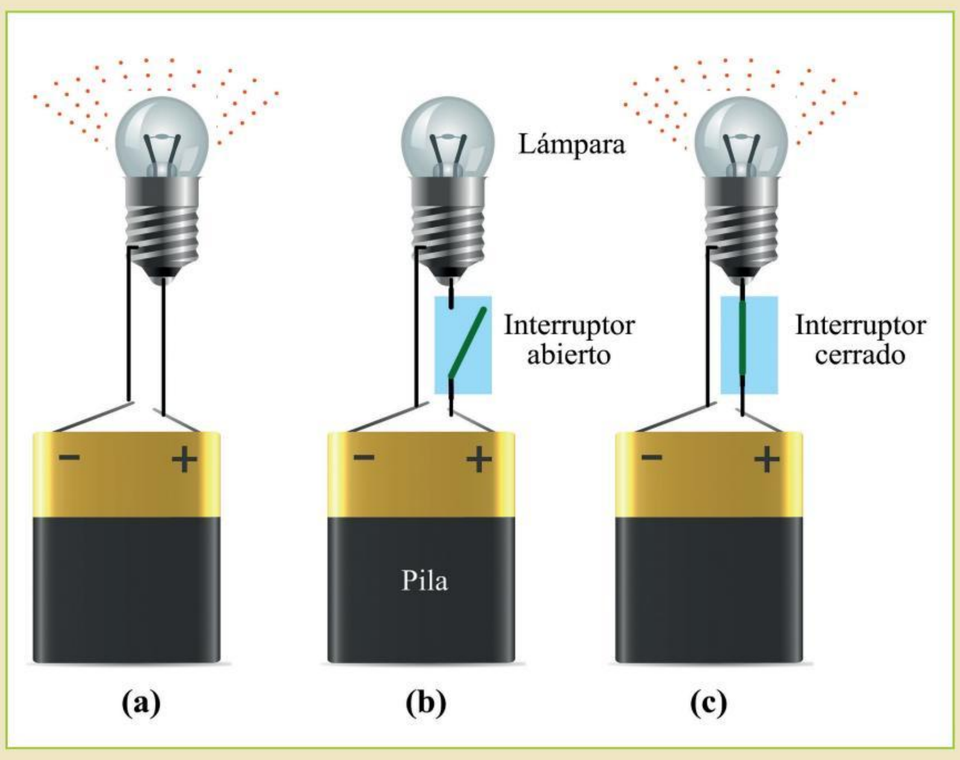


Figura 1.31. Circuito eléctrico simple.

Podrás comprobar que la lámpara se enciende cuando se ponen en contacto los terminales de la lámpara con los bornes de la pila, y se apaga cuando interrumpimos la conexión de uno de los conductores con la pila [Figura 1.31(b)].

La pila contiene energía eléctrica. Al conectarla mediante los conductores a la lámpara, por estos fluye una corriente eléctrica hacia la misma, que hace que esta transforme la energía eléctrica en luminosa.

Ahora conecta un interruptor, tal como se muestra en la Figura 1.31(c), y a continuación ábrelo y ciérralo.

Podrás comprobar que la lámpara solo se enciende cuando el interruptor pone en contacto el borne de la pila con el terminal de dicha lámpara. De esta manera podemos encender y apagar la lámpara a voluntad.

Existe otra forma más fácil de hacer un dibujo eléctrico, tal como se muestra en la Figura 1.32. Se denomina esquema eléctrico, y en él se representan sus elementos (pila, conductores y lámpara) mediante símbolos normalizados.

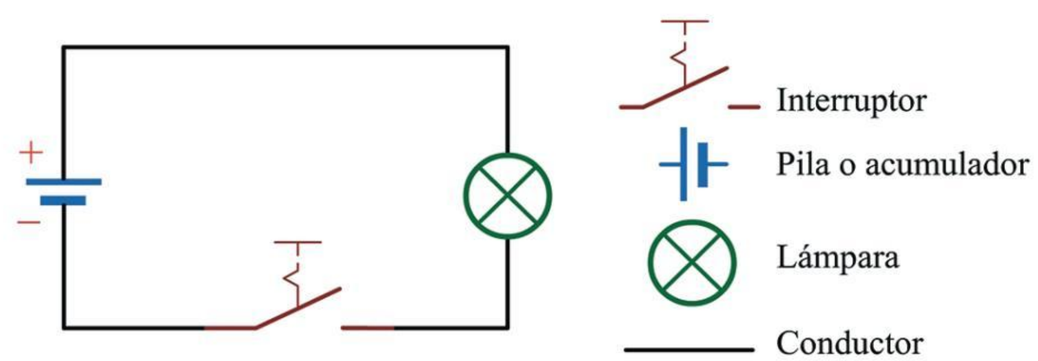


Figura 1.32. Esquema eléctrico.

En la Actividad experimental 1.2 hemos construido un sencillo circuito eléctrico; vamos a estudiar ahora las magnitudes básicas y los fenómenos que se producen en él.

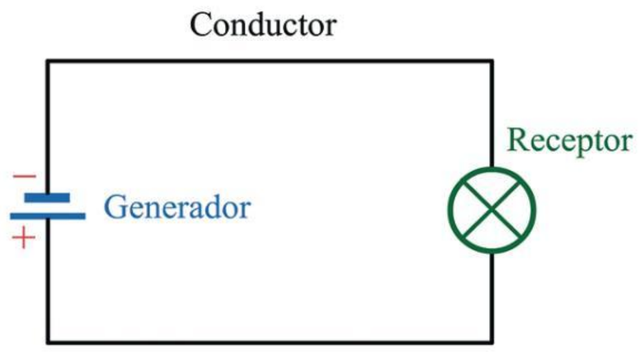


Figura 1.33. Circuito eléctrico.

Las condiciones que se han de dar para que se forme un circuito eléctrico básico como el de la Figura 1.33 son:

- Un **generador,** que se encarga de generar una diferencia de cargas o tensión entre sus dos polos. En la Actividad experimental 1.2 utilizamos como tal una pila de 4,5 voltios de tensión.
- Un **conductor,** que permite que fluyan los electrones de una parte a otra del circuito. En la Actividad experimental 1.2 empleamos conductores de cobre.
- Un **receptor** o aparato eléctrico, que aprovechando el movimiento de electrones consigue transformar la energía eléctrica en energía calorífica, luminosa, motriz, etc. En la Actividad experimental 1.2 usamos una lámpara de linterna.

Estudiaremos ahora detenidamente cómo fluye la corriente eléctrica por el circuito (Figura 1.34). El generador (en este caso una pila), a costa de consumir algún tipo de energía, separa las cargas en el interior del generador gra-

© Ediciones Paraninfo

cias a la fuerza electromotriz (f. e. m.), tomando electrones de una placa y depositándolos en otra. La placa donde son arrancados los electrones queda, por tanto, cargada positivamente (defecto de electrones), mientras que la placa donde se depositan se carga negativamente (exceso de electrones), formándose el polo positivo y negativo del generador. Ahora, entre dichos polos aparece una diferencia de cargas o tensión eléctrica que hace que los electrones sean fuertemente atraídos por el polo positivo. A través del generador los electrones no pueden fluir de un polo a otro, dado que la fuerza electromotriz tiene un valor un poco mayor que la fuerza provocada por la tensión. El único camino posible por donde los electrones pueden moverse desde el polo negativo es por el conductor, atravesando el receptor hasta llegar al polo positivo. La f. e. m. del generador se encarga de seguir separando las cargas continuamente, y la tensión en bornes de la pila de reponerlos a través del receptor en un movimiento continuo, de modo que se completa lo que se denomina circuito eléctrico.

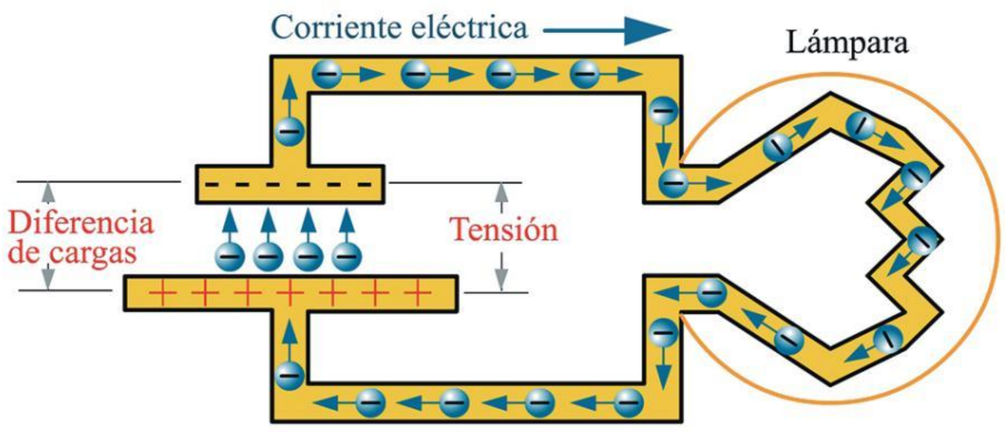


Figura 1.34. Movimiento de electrones con un circuito.

Una vez que ya sabemos lo que es un circuito eléctrico, vamos a pasar a estudiar detenidamente a lo largo de este estudio sobre «Electrotecnia», las partes que forman dicho circuito. Comenzaremos con las formas de producir electricidad, es decir, los diferentes tipos de generadores, para seguir con el estudio de las magnitudes más importantes de un circuito y sus relaciones, así como el de los conductores y aislantes, elementos que producen calor, propiedades químicas y magnéticas de la electricidad, pilas, acumuladores, lámparas y motores.

1.8. Formas de producir electricidad

El encargado de producir la electricidad es el generador, que aprovechando algún fenómeno físico es capaz de desarrollar una determinada fuerza electromotriz que separa las cargas entre sus polos y crea una diferencia de potencial o tensión.

Existen varias formas de producir electricidad, de las cuales se construyen los diferentes tipos de generadores.

1.8.1. Producción de electricidad por frotamiento

Esta forma de producir electricidad es ya conocida por todos nosotros. ¿Has sentido alguna vez un calambrazo y oído un chisporroteo al quitarte un jersey o al mover una alfombra?

Fíjate bien en la siguiente explicación: al andar sobre una alfombra se produce un frotamiento entre esta y los pies, lo cual genera una acumulación de cargas eléctricas en la superficie de la alfombra. Esta carga eléctrica puede originar tensiones del orden de algunos miles de voltios y se la denomina «carga electrostática». Esta acumulación de cargas puede ser peligrosa, ya que se pueden descargar, en cualquier momento, a través de las personas y ocasionar accidentes. A continuación se exponen dos ejemplos:

- ¿Por qué razón crees que los coches a veces llevan colocada una cinta antimareo en la parte trasera de la carrocería, haciendo contacto entre esta y tierra? ¿Tendrá que ver algo esto con el peligro de las cargas estáticas?

- Dentro de las instalaciones sanitarias, los quirófanos deben cumplir unas rigurosas normas de seguridad, contempladas en el Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión (REBT), consistentes en proteger a todos los equipos (aparatos de electromedicina, mesa de quirófano, etc.) de la acumulación de cargas eléctricas estáticas. Una de las protecciones consiste en conectar todos los equipos a tierra.

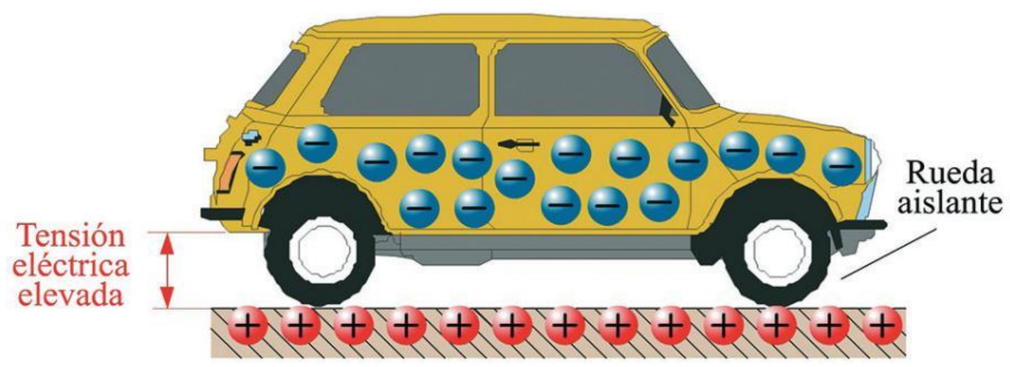


Figura 1.35. Carga electrostática acumulada en un automóvil.

¿Qué razones crees que han llevado a tomar estas medidas de seguridad tan rigurosas en los quirófanos?

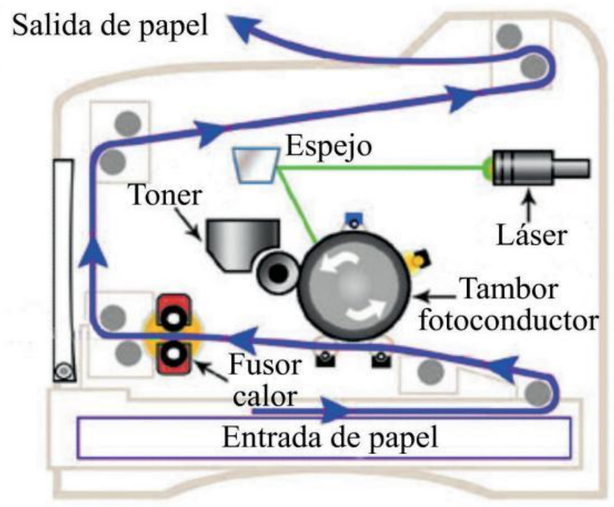
Aprovechando las fuerzas que aparecen entre las cargas eléctricas se pueden construir dispositivos que aprovechen estas propiedades, como por ejemplo:

- Las impresoras láser y las fotocopiadoras (Figura 1.36).

- Las máquinas de pintura por rociado.

- La recogida de polvo mediante precipitadores electrostáticos.

© Ediciones Paraninfo



Se aplica un láser a un tambor fotoconductor según sea el archivo a imprimir. Mediante este proceso, se crea una imagen en el tambor con una carga eléctrica estática que atrae a las partículas del tóner al tambor, que posteriormente se transfieren a la página impresa.

Figura 1.36. Fundamento de la impresión láser.

1.8.2. Producción de electricidad por reacción química

Las pilas y acumuladores son generadores que, aprovechando la energía que se desarrolla en determinadas reacciones químicas, producen electricidad (Figura 1.37).



Figura 1.37. Pilas y acumuladores.

Así, por ejemplo, podemos fabricar una pila sencilla con los elementos de la Figura 1.38. En este caso, introducimos una barra de cobre (Cu) y una barra de cinc (Zn) en una disolución de agua (H_2O) con unas gotas de ácido sulfúrico (H_2SO_4). Los terminales de ambas barras se conectan a un voltímetro.

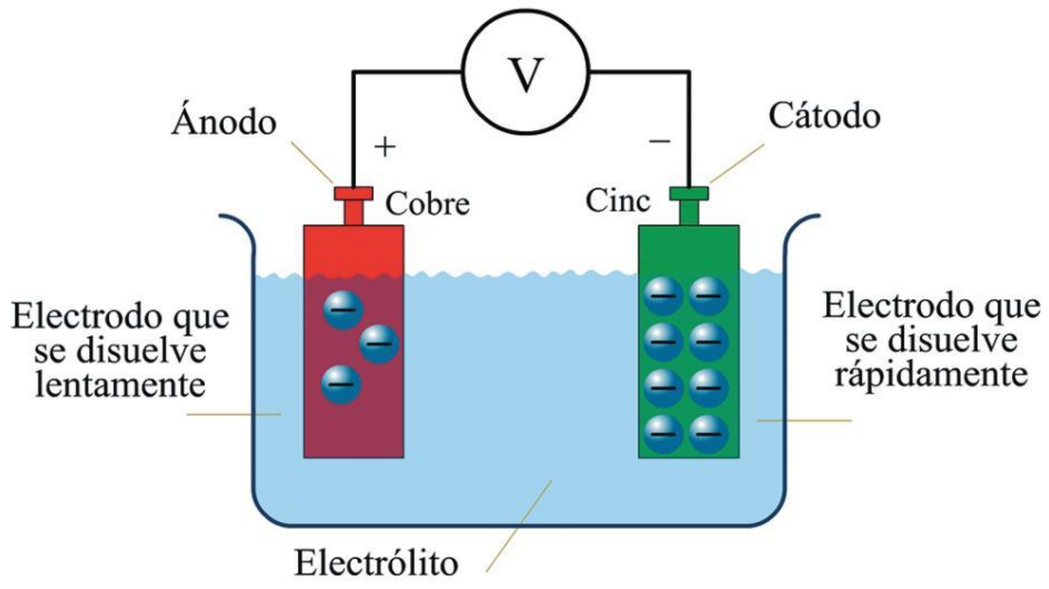


Figura 1.38. Pila eléctrica elemental.

El ácido sulfúrico disuelve las barras de cinc y de cobre, pasando sus átomos a la disolución. Por un lado, el cinc cede átomos a la disolución y deja acumulados gran cantidad de sus electrones en la barra de cinc. Con la barra de cobre pasa algo similar, pero en ella se acumulan muchos menos electrones. El resultado es que la barra de cinc se hace mucho más negativa que la barra de cobre, apareciendo una diferencia de cargas, o tensión eléctrica, entre las dos barras.

Mientras exista material activo en las barras para disolverse, esta pila elemental producirá fuerza electromotriz, pero la pila deja de ser útil cuando se agotan dichos materiales.

Sin embargo, los acumuladores eléctricos, como los que constituyen las baterías de los automóviles, se pueden recargar una vez agotados. Para ello basta con hacerles pasar una corriente eléctrica cuando están descargados. Esto se consigue conectándolos a una fuente de energía eléctrica.

Las aplicaciones prácticas de las pilas y acumuladores son ya bastante conocidas por todos nosotros; destacamos algunas de ellas: alimentación de aparatos portátiles, vehículos eléctricos, automóviles, instalaciones fotovoltaicas de energía solar, almacenamiento de energía eléctrica de emergencia, etcétera.

1.8.3. Producción de electricidad por presión

Existen ciertos materiales, como los cristales de cuarzo, que cuando son golpeados o presionados, entre sus caras aparece una tensión eléctrica (Figura 1.39).

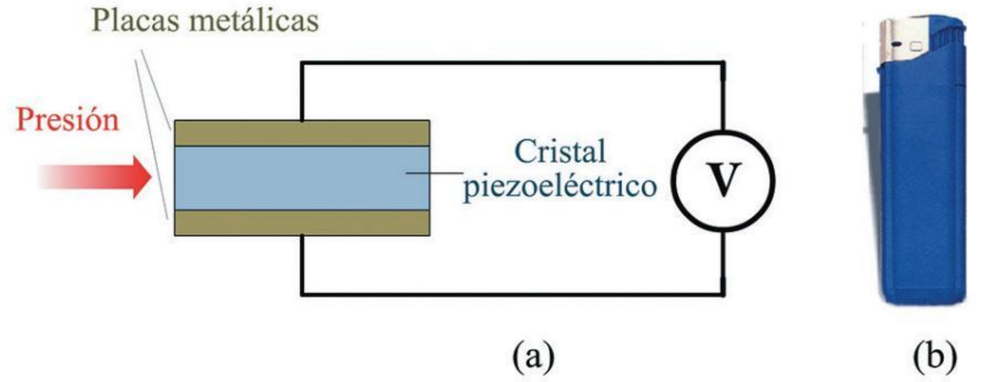


Figura 1.39. (a) Al ser presionados ciertos materiales se produce electricidad. (b) Mechero piezoeléctrico.

En cierta manera lo que ocurre es que al presionar el cristal los electrones salen desplazados de una de las caras a la otra, lo que origina una diferencia de cargas. Esta propiedad se denomina «piezoelectricidad».

Dado que la diferencia de potencial que aparece entre las caras de estos materiales es proporcional a la presión ejercida, con ellos pueden construirse agujas para tocadiscos, micrófonos piezoeléctricos, etcétera.

© Ediciones Paraninfo

Ciertos encendedores de cocina aprovechan el efecto piezoeléctrico para su funcionamiento. En estos casos, un percutor golpea con fuerza un cristal, lo que provoca una fuerte diferencia de potencial entre sus caras (del orden de algunos miles de voltios). Al aplicar esta fuerte tensión entre dos electrodos, surge una chispa eléctrica entre ellos.

1.8.4. Producción de electricidad por acción de la luz

Mediante la células fotovoltaicas es posible transformar directamente la energía luminosa en energía eléctrica.

La célula fotovoltaica se construye con materiales semiconductores sensibles a la luz. Al incidir energía luminosa en estos semiconductores, se produce el desprendimiento de electrones en las últimas órbitas de sus átomos, provocando una diferencia de cargas entre su caras (Figura 1.40).

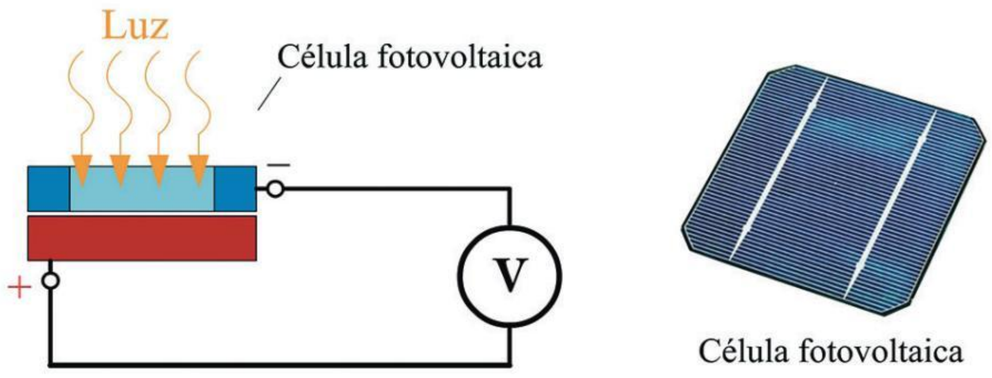


Figura 1.40. Las células fotovoltaicas transforman la luz en electricidad.

Las aplicaciones de esta forma de producir electricidad son cada vez más grandes: centrales eléctricas, huertos solares, producción de energía eléctrica por parte de pequeños usuarios que luego es vendida a la red eléctrica, generadores de energía eléctrica para satélites espaciales, suministro autónomo de energía en instalaciones apartadas de la red eléctrica, alimentación de pequeños aparatos portátiles, etcétera.

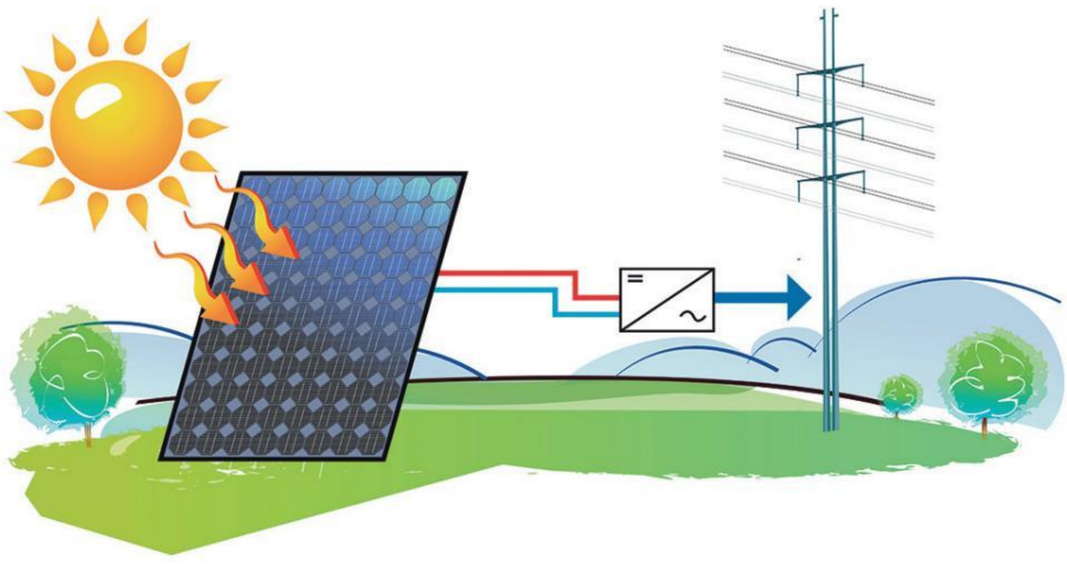


Figura 1.41. La producción de energía eléctrica mediante paneles fotovoltaicos se presenta como una gran apuesta de futuro por las energías renovables no contaminantes.

1.8.5. Producción de electricidad por acción del calor

Algunos cuerpos poseen propiedades termoeléctricas, y con ellos se pueden construir pares termoeléctricos. Estos constan de dos metales distintos y unidos, que al ser calentados manifiestan una diferencia de potencial entre sus extremos (Figura 1.42).

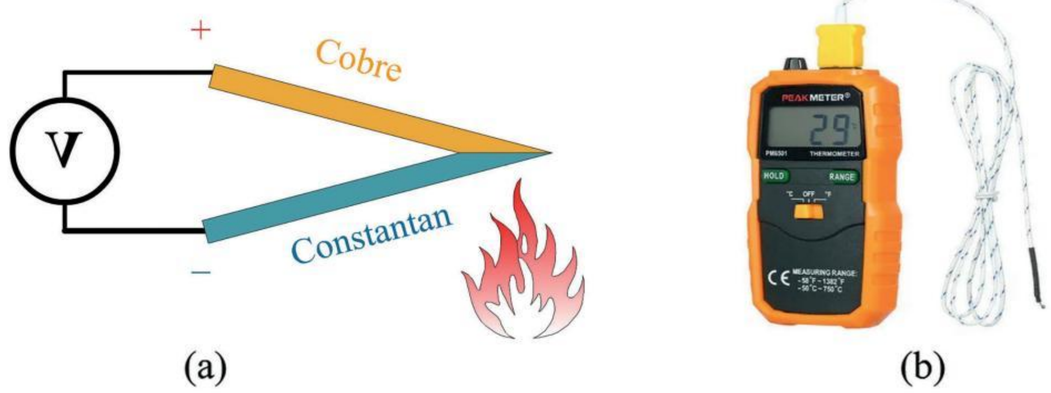


Figura 1.42. (a) Par termoeléctrico. (b) Termómetro con termopar.

Este fenómeno se debe a que uno de los metales desprende más electrones que el otro, por efecto del calor, de modo que se genera una pequeña diferencia de cargas entre sus extremos que es proporcional a la temperatura de la unión.

La energía eléctrica que se produce mediante este sistema es muy pequeña. Mediante este fenómeno se fabrican termopares para la construcción de **termómetros** (especialmente para medir temperaturas en hornos).

Este efecto se puede revertir si aplicamos una tensión eléctrica a dos termopares. Se conoce con el nombre de efecto Peltier (Figura 1.43). Al hacer circular una corriente continua por los dos termopares, en uno de los puntos de unión aparece un aumento de temperatura, mientras que en el otro aparece una disminución de la misma. Aprovechando este fenómeno es posible construir pequeños elementos de refrigeración, tales como neveras portátiles para conectar al automóvil, refrigeración de equipos electrónicos (ordenadores), etcétera.

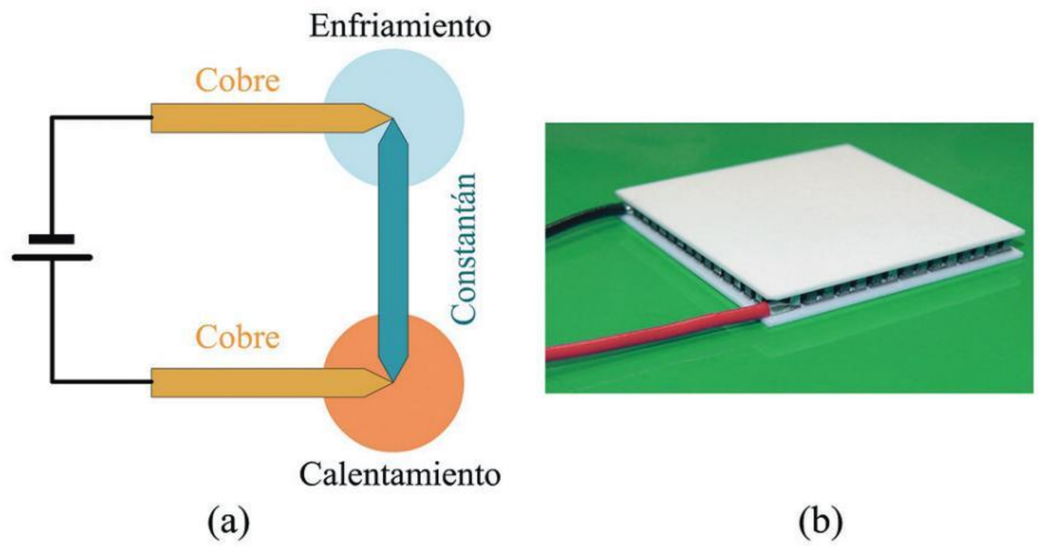


Figura 1.43. (a) Efecto Peltier. (b) Célula Peltier.

© Ediciones Paraninfo

1.8.6. Producción de electricidad por acción magnética

Esta forma de producir electricidad ya es conocida por todos nosotros. Se basa en el principio de Faraday, y es de esta forma como se produce la energía en las grandes centrales eléctricas mediante los alternadores o, en otros casos, con las dinamos en forma de corriente continua.

Cuando se mueve un conductor eléctrico (hilo metálico) en el seno de un campo magnético (imán o electroimán) aparece una corriente eléctrica por dicho conductor. Lo mismo ocurre si se mueve el imán y se deja fijo el conductor. En un generador eléctrico se hacen mover bobinas en sentido giratorio en las proximidades de campos magnéticos producidos por imanes o electroimanes (Figura 1.44).

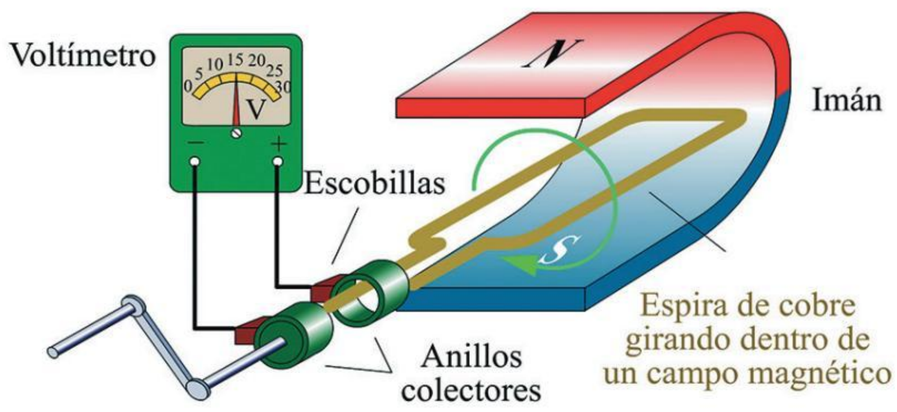


Figura 1.44. Al mover conductores dentro de un campo magnético se produce electricidad.

1.9. Intensidad de la corriente eléctrica

La intensidad de la corriente eléctrica es la cantidad de electricidad que recorre un circuito en la unidad de tiempo (Figura 1.45).

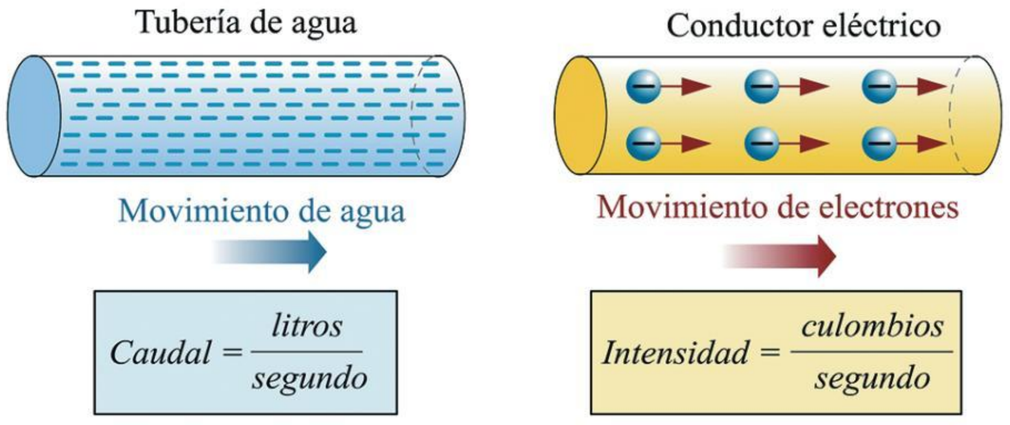


Figura 1.45. Comparación entre una corriente eléctrica y una corriente de agua.

Esta magnitud es comparable al caudal de agua que fluye por una tubería de agua.

La unidad de medida de la intensidad (símbolo *I*) de corriente eléctrica es el **amperio (A).** De esta manera, cuando en un circuito se mueve una carga de un culombio en un tiempo de un segundo, se dice que la corriente tiene una intensidad de un amperio.

$$I = \frac{Q}{t} \qquad 1 \text{ amperio} = \frac{1 \text{ culombio}}{1 \text{ segundo}}$$

Actividad resuelta 1.2

Determina la intensidad de corriente que se ha establecido por un conductor eléctrico si por él ha fluido una carga de 4 culombios en un tiempo de 2 segundos.

Solución:

$$I = \frac{Q}{t} = \frac{4\,C}{2\,s} = 2\,A$$

1.10. Sentido real y convencional de la corriente

En un circuito, el sentido de la corriente eléctrica lo determina el movimiento de electrones, tal como se indica en la Figura 1.46(a). Sin embargo, los antiguos científicos creían que la corriente eléctrica fluía del cuerpo cargado positivamente al cargado negativamente. Este sentido, denominado *convencional*, es el que más se ha utilizado hasta ahora, dado que en él se fundamentan muchas reglas del electromagnetismo y de otras materias afines. Incluso, hoy en día se sigue utilizando en multitud de casos [Figura 1.46(b)].

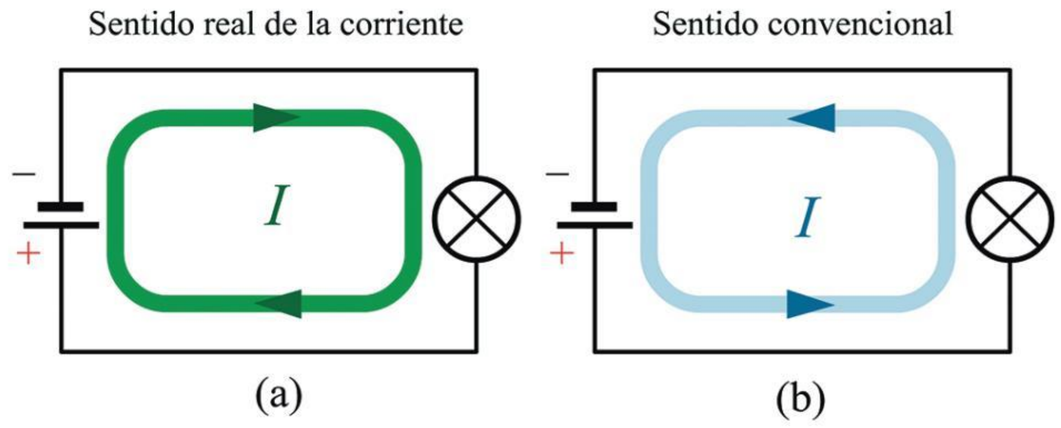


Figura 1.46. Sentido real y convencional de la corriente eléctrica.

1.11. Movimiento de electrones en un circuito

En un circuito eléctrico, como el de la Figura 1.46(a), la intensidad de la corriente en cualquier punto de él es igual. Es decir, existe el mismo flujo de electrones a la salida del generador que a su entrada. Hay que pensar que, al igual que en una tubería que está llena de agua a presión, un conductor eléctrico también está lleno de electrones libres dispuestos a moverse. En cuanto algunos se mueven, empujan al resto, estableciéndose un efecto de traslación uniforme de electrones en todo el conductor. Este efecto de traslación se comunica a la velocidad de 300.000 km/s.

© Ediciones Paraninfo

Sin embargo, los electrones se mueven lentamente, dependiendo su velocidad de la intensidad de la corriente y de la sección del conductor. Por lo general, esta velocidad está en torno a algunos milímetros por segundo. Aunque al conectar, por ejemplo, una lámpara a una fuente de energía eléctrica, se enciende prácticamente al instante, ya que todos los electrones libres del conductor entran en movimiento a la vez.

1.12. Medida de la intensidad de la corriente eléctrica

Para medir la intensidad de la corriente eléctrica utilizamos un aparato de medida llamado amperímetro. Para medir el caudal de agua intercalamos en la tubería un contador. De la misma manera, para medir la cantidad de cargas que se mueven por un circuito en la unidad de tiempo, el amperímetro deberá estar intercalado en el conductor (Figura 1.47). Dado que la intensidad de la corriente es igual en todos los puntos del circuito, es indiferente dónde conectemos el amperímetro.

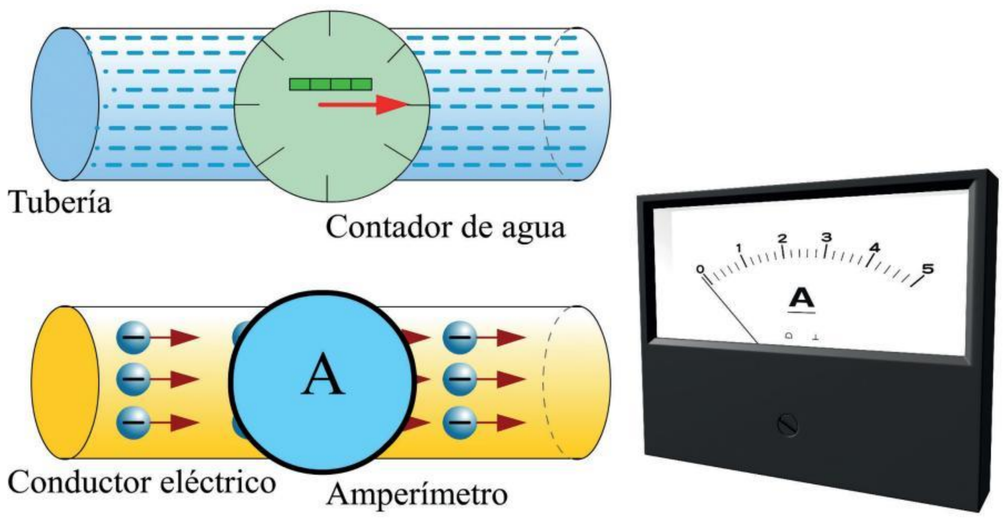


Figura 1.47. El amperímetro se intercala en serie con el circuito.

A esta forma de conectar el amperímetro se la denomina «en serie».

Actividad experimental 1.3

Toma un amperímetro (o en su defecto un polímetro) y mide la intensidad que fluye por una lámpara al ser conectada a una pila (Figura 1.48).

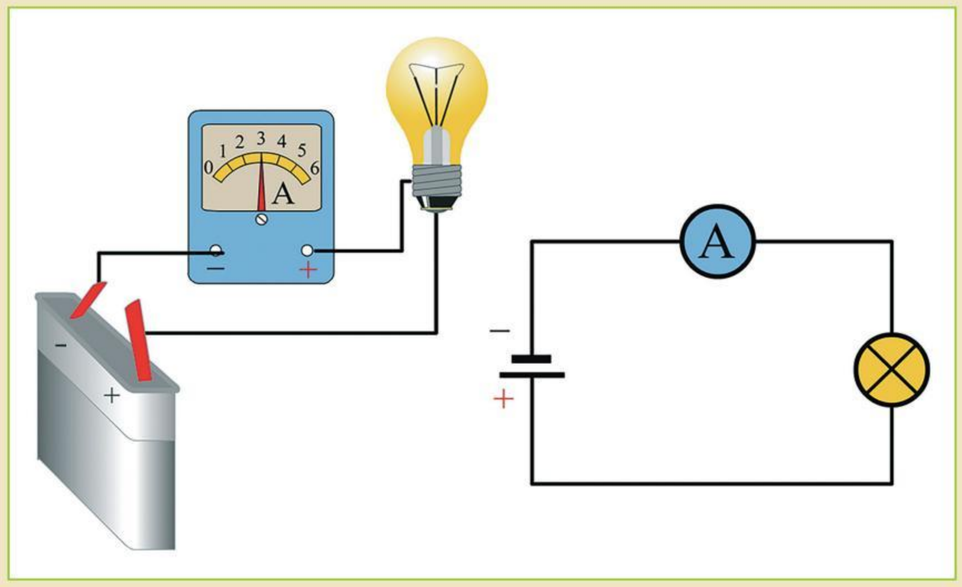


Figura 1.48. Medida de intensidad con el amperímetro.

Al hacer el montaje cuida de que el aparato de medida sirva para medir corriente continua, que las polaridades sean las correctas y que la escala elegida sea la adecuada con la magnitud a medir, ya que de otra manera podríamos estropear el instrumento medidor.

Gracias a la Actividad experimental 1.3, habrás podido observar que el amperio no es una unidad de medida adecuada, ya que resulta excesivamente grande para expresar el resultado. En estos casos se utilizan los submúltiplos:

1 mA (miliamperio) = 1/1.000 = 0,001 = 10^{-3} A

1 µA (microamperio) = 1/1.000.000 = 0,000001 = 10^{-6} A

Así, por ejemplo:

- Peligro de muerte por electrocución: 100 mA.
- Umbral de sensación del cuerpo humano: 3.000 µA.

1.13. Corriente continua (C.C.)

Corriente continua es la que proporcionan las baterías de acumuladores, pilas, dinamos y células fotovoltaicas. Su símbolo de representación es –.

Una corriente continua se caracteriza porque los electrones libres siempre se mueven en el mismo sentido por el conductor con una intensidad constante.

En el circuito de la Figura 1.49 la pila proporciona C.C. a la lámpara. El amperímetro indicará siempre la misma corriente, por ejemplo, 1 A. La aguja del aparato de medida se desviará siempre hacia la derecha de la escala. Si invirtiésemos la polaridad de la pila, la aguja indicadora intentaría desviarse hacia la izquierda.

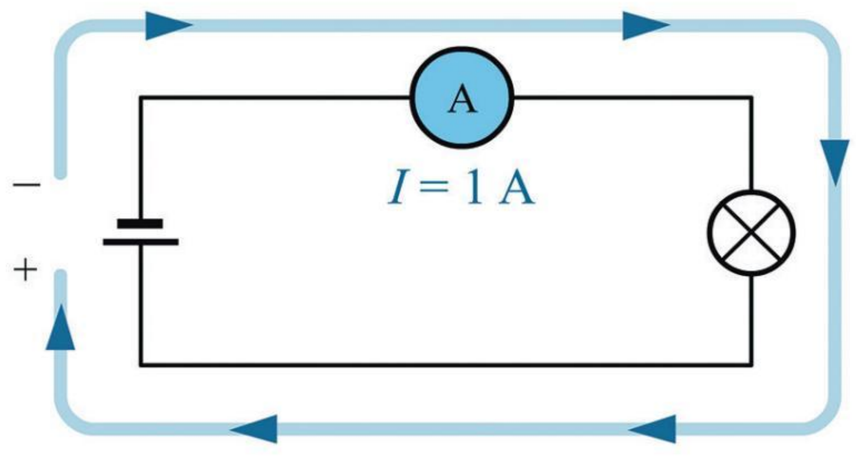


Figura 1.49. Un generador de C.C. mantiene invariable la polaridad de sus terminales.

En el gráfico de la Figura 1.50 se ha representado la C.C. de 1 A. Observa que este valor se mantiene invariable con el paso del tiempo.

© Ediciones Paraninfo

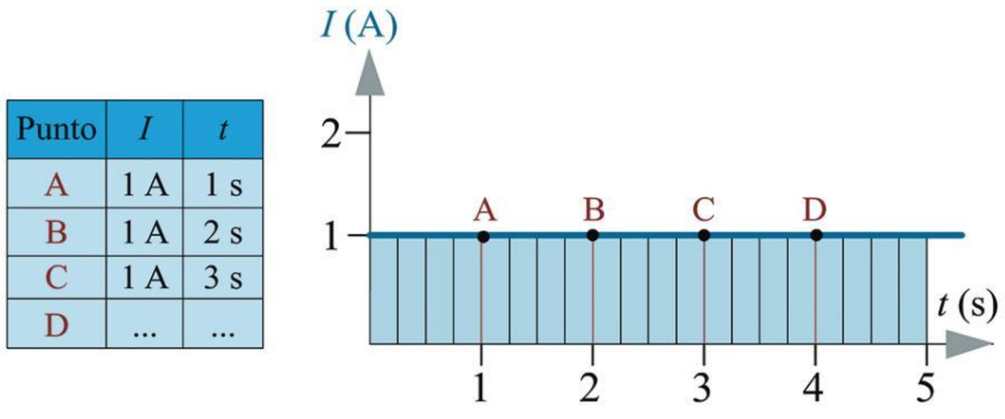


Figura 1.50. Representación gráfica de una C.C.

Los usos que se hacen de la C.C. son muy variados: baños electrolíticos, alimentación de aparatos electrónicos, tracción eléctrica (coches, tranvías, etc.) y muchos otros.

1.14. Corriente alterna (C.A.)

La corriente alterna es la que producen los alternadores en las centrales eléctricas. Es la forma más común de transportar la energía eléctrica y de consumirla en nuestros hogares y en la industria en general. Su símbolo es ~.

Una corriente alterna se caracteriza porque el flujo de electrones se mueve por el conductor en un sentido y en otro, y además, el valor de la corriente eléctrica es variable.

Se podría decir que en este caso el generador produce periódicamente cambios en la polaridad de sus terminales de salida (Figura 1.51).

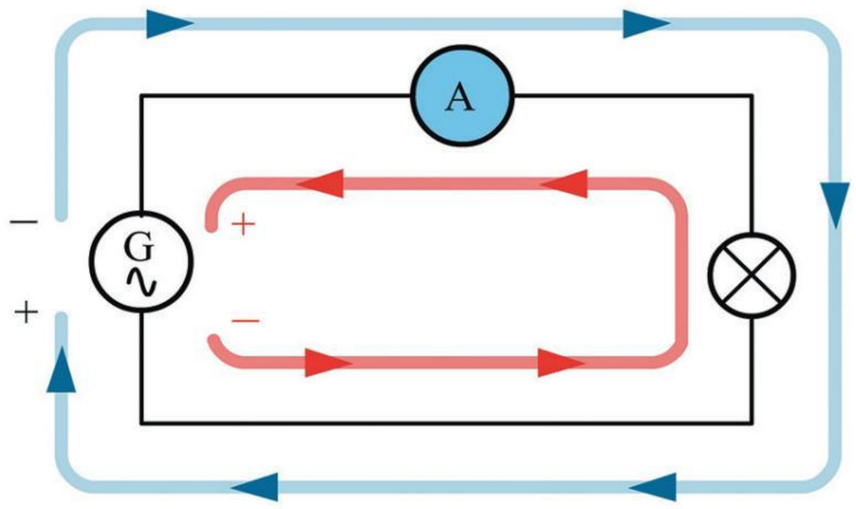


Figura 1.51. Un generador de C.A. produce cambios periódicos en la polaridad de sus terminales.

Para entender esto mejor, observa el gráfico de la Figura 1.52 donde está representada una C.A. industrial (como la que producen las centrales eléctricas y que llega hasta nuestras casas). El eje de tiempos lo hemos puesto en milisegundos, ya que los cambios de corriente son muy rápidos (para una C.A. industrial, la señal representada en la Figura 1.52 se repite 50 veces en un segundo).

Supongamos que conectamos un amperímetro de C.C. en un circuito alimentado por un generador de C.A. Si la aguja del aparato pudiera desviarse en ambos sentidos y seguir las rápidas variaciones de la corriente, se nos presentarían los casos de la tabla representada en la Figura 1.52.

La corriente circula en un sentido durante los primeros 10 ms, y en el contrario (valores negativos) durante los siguientes 10 ms. Este mismo proceso se repetiría continuamente mientras el generador estuviese suministrando corriente eléctrica al circuito.

En un principio cabría pensar que veríamos a la lámpara encenderse y apagarse rápidamente, siguiendo los cambios rápidos de la corriente. Pero en realidad no podemos ver este fenómeno, ya que el ojo humano no es capaz de percibirlo.

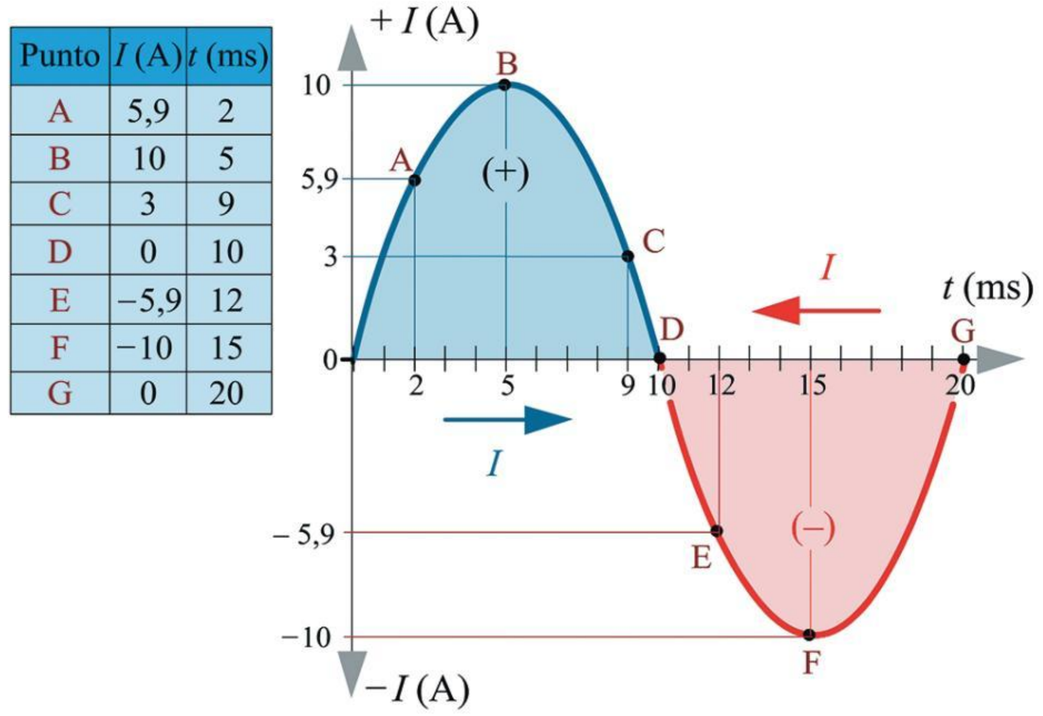


Figura 1.52. Representación gráfica de una C.A.

Dado que la corriente alterna es más fácil de producir, y que posee una serie de características que hacen más fácil su transporte, su campo de aplicación es muy amplio.

Dada la importancia que posee la C.A. nos dedicaremos a su estudio en profundidad en la Unidad 12.

1.15. Tensión eléctrica y fuerza electromotriz

Como ya hemos estudiado, en un circuito el generador es el encargado de crear la diferencia de cargas. Para crear esta diferencia de cargas, el generador tiene que arrancar electrones del polo positivo y depositarlos en el polo negativo. Para realizar esta tarea el generador necesita desarrollar una energía.

A la fuerza necesaria para trasladar los electrones desde el polo positivo al negativo, y así crear la diferencia de cargas, se la denomina **fuerza electromotriz (f. e. m.).**

© Ediciones Paraninfo

Es la f. e. m. la que permite la circulación de electrones; la propia expresión lo indica: fuerza electromotriz, que mueve los electrones. La f. e. m. se mide en voltios y en realidad es la tensión interna o de vacío que posee el generador.

A la diferencia de cargas se la llama de otra forma: diferencia de potencial o tensión eléctrica (símbolo *U* o *V*), y su unidad de medida es el voltio (V).

En este texto utilizaremos el símbolo U para referirnos a la tensión, ya que esta es la nomenclatura que se utiliza en el nuevo Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión.

1 milivoltio = 1 mV = 0,001 V

1 kilovoltio = 1 kV = 1.000 V

Para comprender aún mejor todas las magnitudes que aparecen en un circuito eléctrico, vamos a hacer una comparación entre un circuito hidráulico y un circuito eléctrico (Figura 1.53 y Tabla 1.2).

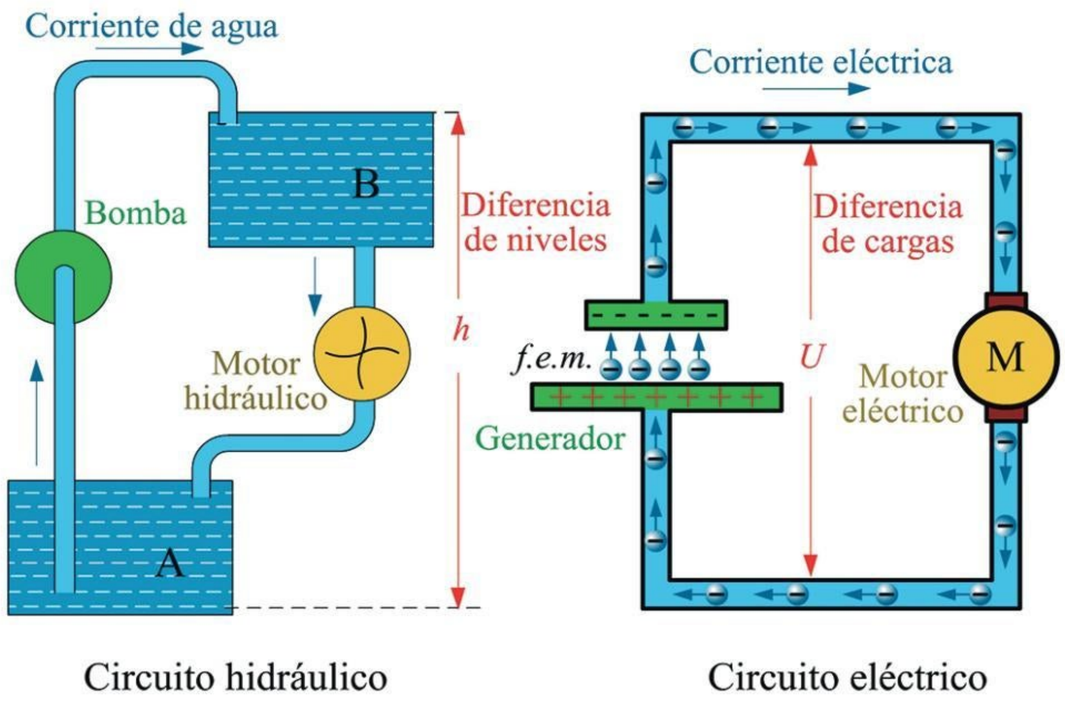


Figura 1.53. Comparación entre un circuito hidráulico y un circuito eléctrico.

1.16. Medida de la tensión

Para medir la tensión eléctrica se precisa un aparato de medida que sea capaz de captar el desnivel eléctrico o diferencia de cargas entre un punto y otro.

El voltímetro se conecta siempre entre los dos puntos entre los que se quiere determinar la tensión.

Esta forma de conectar el voltímetro se denomina «conexión en paralelo o derivación» (Figura 1.54).

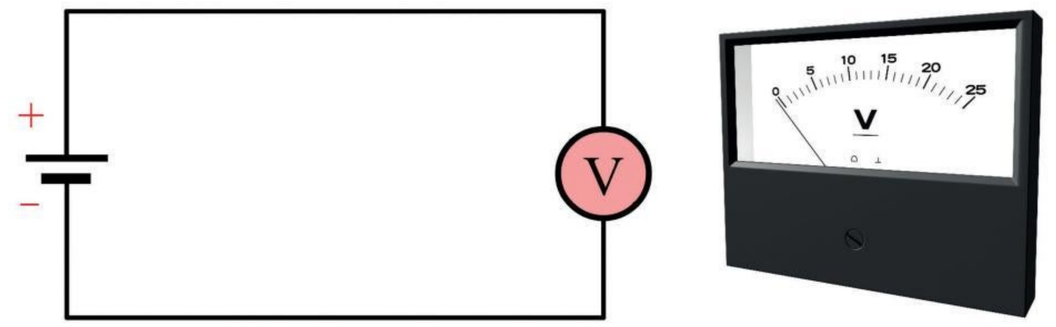


Figura 1.54. El voltímetro se conecta en paralelo.

Actividad experimental 1.4

Toma un voltímetro (o en su defecto un polímetro) y mide la tensión que aparece entre los polos de una pila (Figura 1.55). De la misma manera que se hizo al medir la intensidad de la corriente, al hacer las conexiones cuida de que el aparato de medida sirva para medir corriente continua, que las polaridades sean las correctas y que la escala elegida sea la adecuada con la magnitud que vamos a medir.

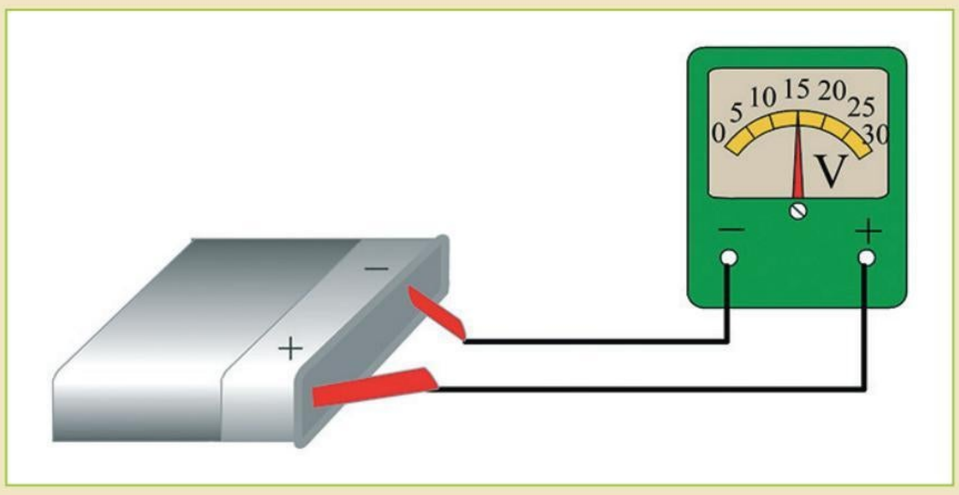
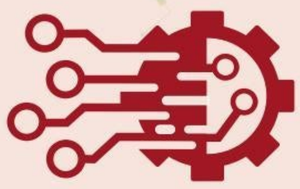


Figura 1.55.

Tabla 1.2. Comparación entre un circuito hidráulico y un circuito eléctrico

Circuito hidráulico	Circuito eléctrico
La bomba de agua eleva el agua del depósito A hasta el B, lo que crea una diferencia de alturas entre ambos depósitos.	El generador eléctrico arranca los electrones de la placa positiva y los deposita en la negativa, lo que crea una diferencia de cargas o tensión entre los bornes de la lámpara.
El depósito B, al estar más alto que el A, adquiere una energía potencial, pudiendo luego el agua descender hacia A y mover así el motor hidráulico.	El defecto de cargas negativas del polo positivo atrae con fuerza a los electrones en exceso del polo negativo, a través del circuito, y se produce un movimiento de electrones o corriente eléctrica por el filamento de la lámpara, que la hace lucir.

© Ediciones Paraninfo



Comprobación práctica en el laboratorio

1.1. Comprobación práctica de los efectos de la electricidad. Consigue los elementos necesarios y comprueba experimentalmente los efectos de la corriente eléctrica: térmico, luminoso, químico y magnético.

1.2. Comprobación práctica de las formas de producir energía. Consigue los elementos necesarios y comprueba experimentalmente las diferentes formas de producir electricidad: acción química, acción de la luz, por presión, mediante termopar y mediante acción magnética.

Al finalizar cada una de estas actividades deberás elaborar un informe-memoria sobre la actividad desarrollada, indicando los resultados obtenidos y estructurándolos en los apartados necesarios para una adecuada documentación de aquellas (descripción del proceso seguido, medios utilizados, esquemas y planos utilizados, cálculos, medidas, etc.).

© Ediciones Paraninfo

Actividades de comprobación

1.1. ¿Qué ocurre si se acercan un elemento de ebonita y otro de vidrio una vez frotados?

a) Se repelen.

b) Se atraen.

c) Se cargan de electricidad.

1.2. ¿Qué ocurre cuando se conectan por un conductor dos cuerpos cargados de electricidad de diferente polaridad?

a) Se atraen.

b) Se repelen.

c) Aparece un flujo de electrones por el conductor hasta que se descargan.

1.3. La electricidad existe gracias a que:

a) El electrón posee carga y movilidad.

b) El protón posee carga y movilidad.

c) Los electrones poseen carga positiva.

1.4. El generador en un circuito eléctrico:

a) Produce un consumo de energía eléctrica.

b) Es un elemento de control del circuito.

c) Produce una diferencia de cargas entre sus polos e impulsa a moverse a los electrones.

1.5. ¿Cuál es el símbolo y la unidad de la tensión e intensidad de la corriente, respectivamente?

a) W (vatio), A (voltio).

b) V (voltio), A (amperio).

c) W (vatio), mA (miliamperio).

1.6. Calcula la intensidad de corriente que ha fluido por un conductor si, en 2 minutos y 20 segundos, se han trasladado $18{,}9 \cdot 10^{18}$ electrones.

1.7. Para el transporte de electricidad a grandes distancias se utiliza:

a) La corriente continua.

b) La corriente alterna.

c) Líneas de alta tensión.

d) Líneas de baja tensión.

1.8. Indica cuál de estas afirmaciones es cierta:

a) Los conductores empleados en las líneas de alta tensión suelen ser de cobre.

b) Los generadores utilizados habitualmente en las centrales eléctricas son los alternadores trifásicos.

c) Los transformadores eléctricos pueden funcionar tanto en corriente continua como alterna.

1.9. El sistema que convierte la luz solar en energía eléctrica se realiza mediante:

a) Cristal piezoeléctrico.

b) Paneles termosolares.

c) Paneles fotovoltaicos.

1.10. La fuerza electromotriz de un generador se mide en:

a) Amperios.

b) Voltios.

c) Culombios

Actividades de ampliación

1.1. Consulta en el MATERIAL WEB que se ha elaborado para este texto el documento: ***«Simbología eléctrica»***, donde podrás encontrar los símbolos más utilizados en el sector eléctrico y pertenecientes a las normas UNE e IEC.

1.2. Busca en internet información sobre los diferentes tipos de centrales eléctricas. Realiza una clasificación de ellas, explica brevemente su funcionamiento y ordénalas por orden de importancia.

© Ediciones Paraninfo

1.3. Consulta en el MATERIAL WEB que se ha elaborado para este texto el documento: ***«Magnitudes y unidades de medida»***, donde podrás encontrar un cuadro resumen de la denominación de las magnitudes del Sistema Internacional con sus símbolos y sus unidades de medida.

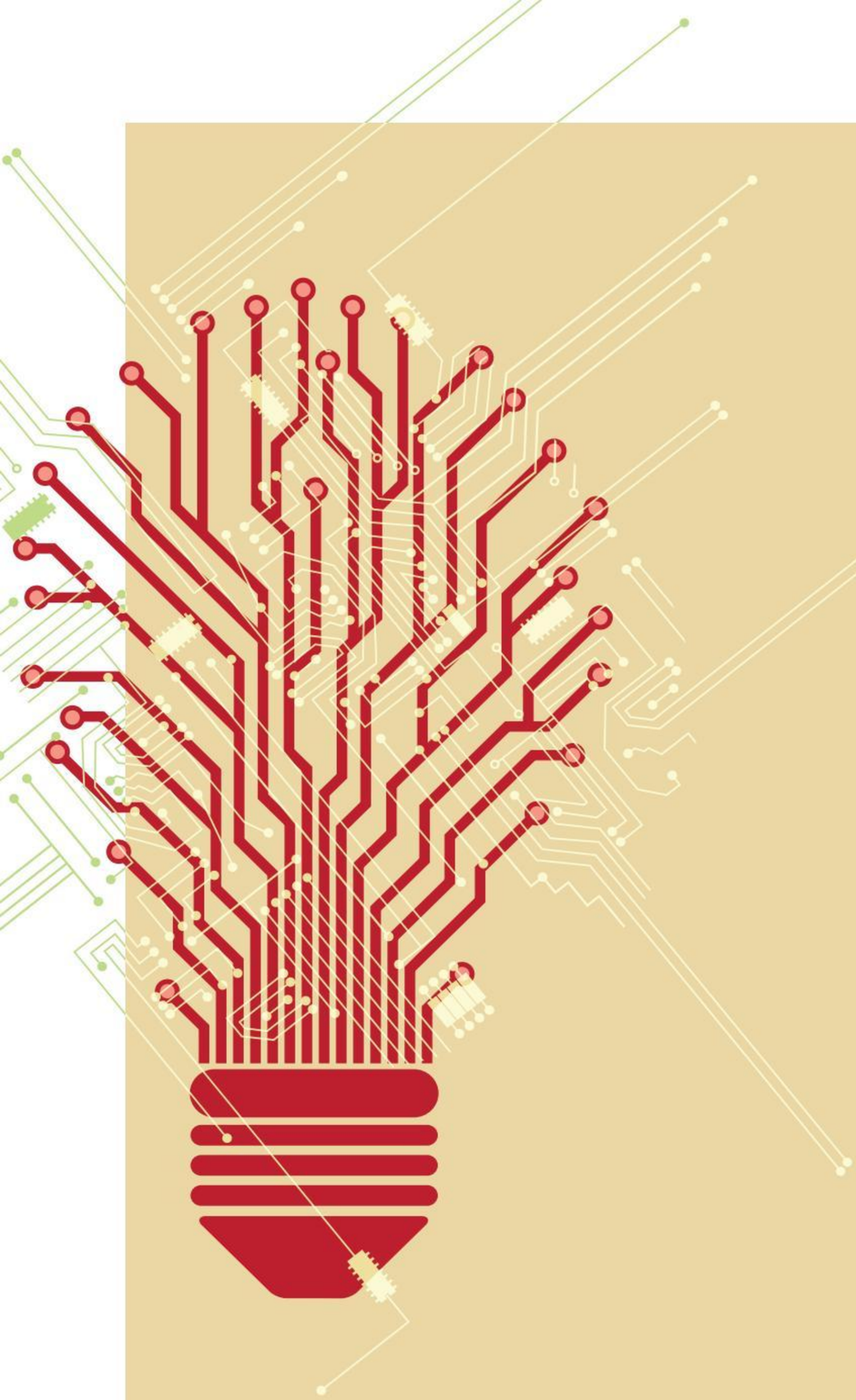
Una vez leído dicho documento, realiza un cuadro resumen de las magnitudes de tipo eléctrico y magnético más utilizadas en este texto.

En la Tabla 1.3 se muestra, como ejemplo, cómo podría ser dicho cuadro resumen.

Tabla 1.3. Cuadro resumen de las magnitudes de tipo eléctrico y magnético

Magnitud	Símbolo	Unidad de medida	Símbolo
Capacidad condensador	C	Faradio	F
Capacidad acumulador	Q	Amperio hora	Ah
Carga eléctrica	Q	Culombio	C
Conductancia	G	Siemens	S
Conductividad	γ	Siemens por metro	S/m
Energía	E	Julio	J
Flujo magnético	Φ	Weber	Wb
Fuerza electromotriz	E	Voltio	V
Frecuencia	f	Hercio	Hz
Impedancia	Z	Ohmio	Ω
Inductancia	L	Henrio	H
Inducción magnética	B	Tesla	T
Intensidad campo magnético	H	Amperio por metro	A/m
Intensidad de corriente	I	Amperio	A
Periodo	T	Segundos	s
Potencia activa	P	Vatios	W
Potencia aparente	S	Voltioamperio	VA
Potencia reactiva	Q	Voltioamperio reactivo	VAR
Reactancia	X	Ohmio	Ω
Reactancia inductiva	X_L	Ohmio	Ω
Reactancia capacitiva	X_C	Ohmio	Ω
Reluctancia	R	Amperio por Weber	A/Wb
Rendimiento	η	%	
Resistencia eléctrica	R	Ohmio	Ω
Resistividad	ρ	Ohmio por metro/metro cuadrado	$\Omega \cdot m/m^2$
Tensión eléctrica	U	Voltios	V
Velocidad angular	ω	Radián por segundo	rad/s
Velocidad lineal	V	Metros por segundo	m/s

© Ediciones Paraninfo



2 Resistencia eléctrica

Contenidos

- **2.1.** Conductores y aislantes
- **2.2.** Resistencia eléctrica
- **2.3.** Medida de la resistencia eléctrica
- **2.4.** La ley de Ohm
- **2.5.** Resistencia de un conductor
- **2.6.** Conductancia y conductividad
- **2.7.** Influencia de la temperatura sobre la resistividad
- **2.8.** Resistencia de los aislantes
- **2.9.** Rigidez dieléctrica
- **2.10.** Manejo del polímetro

La resistencia eléctrica es una característica asociada a los materiales de uso común en electricidad. Conociendo el valor de la resistencia de un conductor o aislante podremos determinar, gracias a la ley de Ohm, su comportamiento en un circuito o instalación eléctrica. Por otro lado, se puede comprobar experimentalmente que la resistencia eléctrica de un material depende de sus dimensiones y de su naturaleza. También se puede comprobar que la resistencia tiende a elevarse con la temperatura.

Objetivos

- Diferenciar entre aislante, buen conductor y mal conductor de la corriente eléctrica.
- Emplear el óhmetro de una forma adecuada.
- Aplicar la ley de Ohm para la resolución de problemas donde intervengan las magnitudes eléctricas: intensidad, tensión y resistencia.
- Relacionar la resistencia de un conductor con su longitud, sección y constitución.
- Calcular la resistencia eléctrica de un conductor.
- Relacionar la calidad de un aislante con su rigidez dieléctrica.
- Valorar la influencia de la temperatura sobre la resistencia de los materiales.

2.1. Conductores y aislantes

Para el buen funcionamiento de un circuito eléctrico existen dos elementos básicos, los conductores y los aislantes. Unos tienen tanta importancia como los otros; mientras que los primeros permiten el paso de la corriente con una relativa facilidad, los segundos la bloquean.

Así, por ejemplo, un cable eléctrico, como los que hemos utilizado para las experiencias, está formado por un alambre metálico de cobre (el conductor) y por un recubrimiento de plástico (el aislante) que impide que la corriente se fugue hacia otros lugares no deseados, a la vez que evita fallos y descargas eléctricas indeseables (Figura 2.1).



Figura 2.1. Constitución de un cable eléctrico.

Los cuerpos aislantes de la electricidad se caracterizan por impedir el paso de la corriente eléctrica a través de ellos.

Este fenómeno se debe a que los electrones se encuentran ligados fuertemente a sus átomos y para arrancarlos es necesario aplicar mucha energía (someter al cuerpo a una elevada tensión).

Los cuerpos aislantes tienen tanta importancia como los conductores en el mundo de la industria de materiales eléctricos, ya que gracias a ellos podemos aislar de la electricidad unos cuerpos de otros. Son buenos aislantes: *el hexafluoruro de azufre (SF_6), las cámaras de vacío, porcelana, aceite mineral, caucho, barniz, vidrio, algodón, seda, papel, plástico, aire seco, etcétera.*

No todos los aislantes poseen el mismo poder de aislamiento; así, por ejemplo, son buenos aislantes el hexafluoruro de azufre, el vacío, los materiales plásticos, el vidrio y el aire seco, mientras que los textiles vegetales son poco aislantes. Más adelante estudiaremos cómo se puede medir el poder aislante de un material.

En la actualidad la tecnología de los aislantes es quizás más importante que la de los conductores, sobre todo si hablamos de los materiales que se utilizan para las redes de alta y media tensión. No hay que olvidar que con tensiones elevadas, del orden de 440 kV, 220 kV, etc., la electricidad se puede abrir paso con facilidad hasta por un aislante, pudiendo provocar accidentes, o simplemente hacer inviable el transporte a tensiones elevadas. En este campo se ha avanzado mucho en la fabricación de materiales con una alta capacidad de aislamiento.

Los plásticos elaborados en diferentes formas son los grandes protagonistas de los aislantes, tanto en baja como en media tensión (PVC, polietileno, etc.).

El hexafluoruro de azufre es un gas que posee una altísima capacidad de aislamiento, lo que permite aproximar las partes activas de una instalación sin que haya peligro.

Las cámaras de vacío resultan un aislante fabuloso en interruptores de media tensión.

La porcelana no es tan buen aislante, pero al soportar altas temperaturas es ideal para algunas aplicaciones (portalámparas, etc.).

A diferencia de los aislantes, los conductores permiten con facilidad el movimiento de electrones por su estructura molecular.

Prácticamente, todos los metales son buenos conductores, pero unos lo son mejor que otros.

A continuación se expone una lista en la que aparecen clasificados algunos materiales conductores. Comenzamos por los mejores y terminamos por los peores:

Plata, *cobre*, *oro*, *aluminio*, *cinc*, *estaño*, *hierro*, *plomo*, *maillechort*, *mercurio*, *nicrón*, *carbón*.

La plata es un excelente conductor de la electricidad, pero debido a su alto coste, se emplea solamente cuando sus propiedades sean particularmente interesantes, como en los contactos de apertura y cierre de circuitos.

El material más empleado es el cobre, que conduce casi tan bien como la plata, y su coste es muy inferior.

El aluminio se utiliza en las líneas de transporte, ya que su peso es menor que el del cobre.

Por otro lado, se fabrican materiales a base de aleaciones como el nicrón (níquel-cromo), el constantán (cobre-níquel), el ferroníquel (hierro-níquel), el maillechort (cobre-cinc-níquel) y otras muchas, que poseen la característica de ser mucho peor conductores que el cobre, lo que los hace útiles como materiales resistivos para la fabricación de resistencias (reostatos, elementos calefactores, etc.).

El carbón es bastante mal conductor, lo que lo hace ideal para la fabricación de pequeñas resistencias para circuitos electrónicos.

2.2. Resistencia eléctrica

La resistencia eléctrica como unidad de medida nos va a ayudar a diferenciar los cuerpos que son mejores conductores de los que son peores, de tal manera que podremos decir que un mal conductor posee mucha resistencia eléc-

© Ediciones Paraninfo

trica, mientras que uno bueno tiene poca. De esta manera podemos decir que:

> La resistencia eléctrica es la mayor o menor oposición que ofrecen los cuerpos conductores al paso de la corriente eléctrica.

Este fenómeno se podría explicar así: cuando los electrones circulan por un conductor, estos tienen que moverse a través de todos los átomos, produciéndose una especie de rozamiento (resistencia al movimiento de electrones) que se transforma en calor (Figura 2.2). Estos choques son menores en los buenos conductores que en los malos.

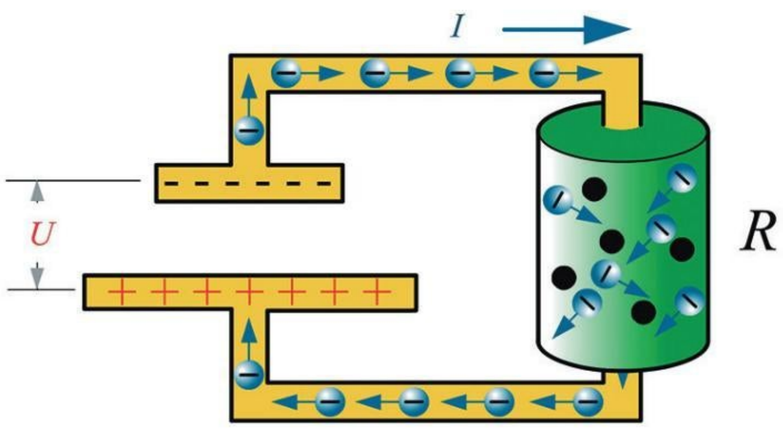


Figura 2.2. La resistencia se manifiesta como una oposición al movimiento de electrones.

La unidad de medida de la resistencia eléctrica (símbolo *R*) es el ohmio y se representa por la letra griega omega, Ω.

1 miliohmio = 1 mΩ = 0,001 Ω
1 kilohmio = 1 kΩ = 1.000 Ω
1 megaohmio = 1 MΩ = 1.000.000 Ω

Los símbolos más utilizados para la resistencia son los representados en la Figura 2.3.

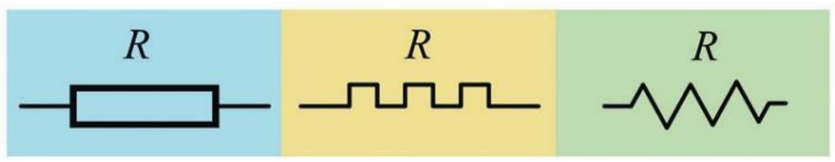


Figura 2.3. Símbolos esquemáticos de la resistencia eléctrica.

2.3. Medida de la resistencia eléctrica

> El aparato que se utiliza para medir la resistencia eléctrica es el óhmetro.

Para medir el valor de una resistencia, bastará con conectar los extremos de esta a las puntas del óhmetro (Figura 2.4).

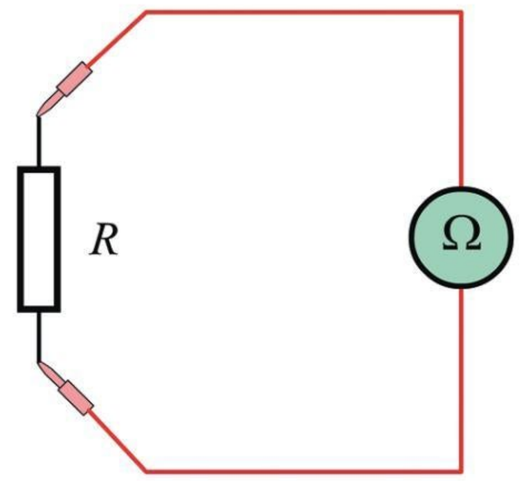


Figura 2.4. Medida de la resistencia con el óhmetro.

Existen muchos tipos de óhmetros, pero uno de los más conocidos y más utilizados para medir resistencias de una forma aproximada es el que incorpora el polímetro (Figura 2.5). El puente de Wheatstone es otro aparato de medida para medir resistencias que se utiliza cuando se quiere dar una mayor precisión en la medida.



Figura 2.5. El polímetro incorpora un óhmetro para la medida de resistencias.

Actividad experimental 2.1

Consigue un óhmetro (por ejemplo, el que se incluye en el polímetro) y mide la resistencia de varias lámparas y de cualquier otro aparato eléctrico que tengas a tu alcance.



Figura 2.6.

© Ediciones Paraninfo

2.4. La ley de Ohm

Hasta ahora hemos estudiado con detenimiento varias magnitudes eléctricas: intensidad de la corriente, tensión y resistencia. En la práctica se nos pueden presentar problemas en los que conozcamos dos de estas magnitudes y tengamos que determinar la tercera. Para resolver estos problemas, y otros tantos que se presenten en la práctica, es necesario aplicar una fórmula que nos relacione las tres magnitudes eléctricas conocidas: I, U, R.

El físico Ohm, basándose en un experimento, determinó que la intensidad de la corriente que recorre un circuito eléctrico es directamente proporcional a la tensión aplicada (a más tensión, más intensidad), e inversamente proporcional a la resistencia eléctrica (a más resistencia, menos intensidad).

$$I = \frac{U}{R}$$

Veamos cómo se puede explicar esta relación. Al conectar una resistencia a los bornes de una pila, aparece una corriente eléctrica que circula desde el polo negativo de la pila atravesando dicha resistencia, hasta el positivo (Figura 2.7). *Recuerda que si existe corriente eléctrica es gracias a que el generador traslada las cargas del polo positivo al negativo, con lo que crea una diferencia de cargas, que nosotros llamamos tensión eléctrica.*

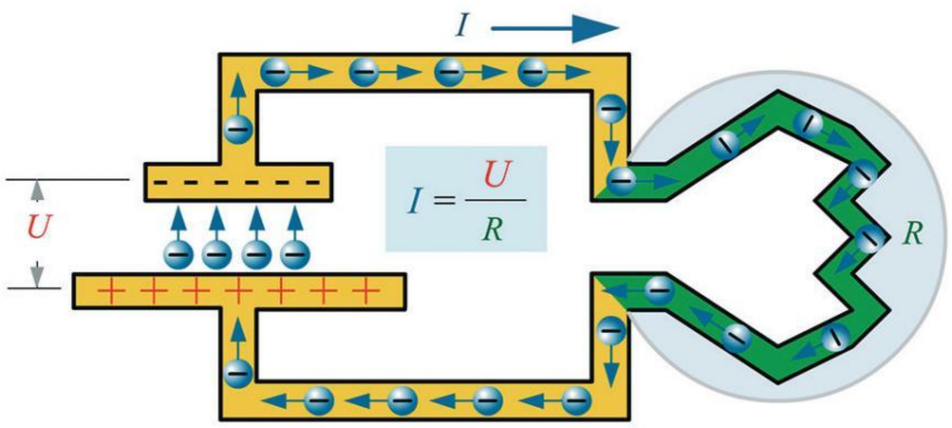


Figura 2.7.

Cuanto mayor es la tensión eléctrica, con mayor fuerza atraerá el polo positivo de la pila a los electrones que salen del negativo y atraviesan la resistencia, y por tanto, será mayor también la intensidad de la corriente por el circuito.

Cuanto mayor sea el valor óhmico de la resistencia que se opone al paso de la corriente eléctrica, menor será la intensidad de esta.

Actividad resuelta 2.1

Calcula la intensidad que circula por el filamento de una lámpara incandescente de 10 Ω de resistencia, cuando está sometida a una tensión de 12 V.

Solución:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{12}{10} = 1{,}2 \text{ A}$$

La ley de Ohm se puede ampliar despejando, en la fórmula, los valores de U y de R, con lo que se obtienen las siguientes expresiones:

$$I = U/R \qquad U = RI \qquad R = U/I$$

Actividad resuelta 2.2

Se quiere determinar la resistencia eléctrica del filamento de una lámpara incandescente. Para ello, se somete a la lámpara a una tensión de 230 V y, mediante un amperímetro intercalado en serie, se mide el paso de una intensidad de corriente de 0,2 A (Figura 2.8).

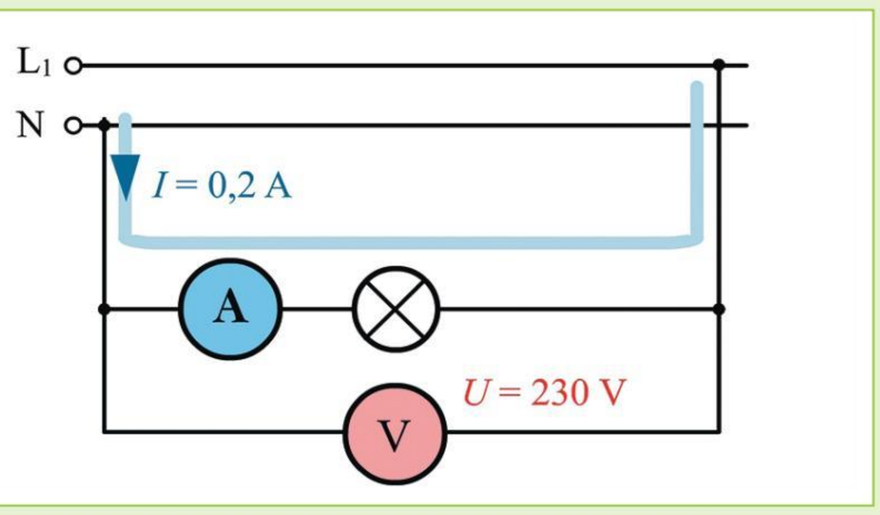


Figura 2.8.

Solución:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{230}{0{,}2} = 1.150\ \Omega$$

Actividad resuelta 2.3

Es sabido que en condiciones desfavorables, es decir, con la piel húmeda, la resistencia del cuerpo humano es del orden de 2.500 Ω (Figura 2.9). ¿Qué tensión será suficiente para provocar, en estas condiciones, el paso de una corriente peligrosa, de 30 mA, por el cuerpo humano?

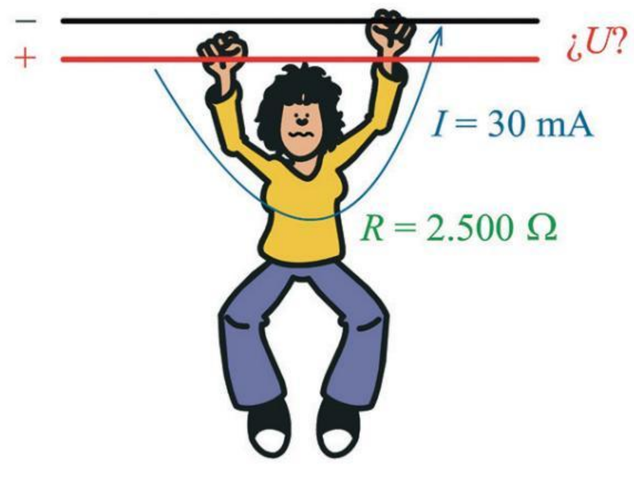


Figura 2.9.

© Ediciones Paraninfo

Solución:

$$U = R \cdot I = 2.500 \cdot 0{,}03 = 75 \text{ V}$$

Actividad resuelta 2.4

Se sabe que una intensidad de corriente de 30 mA puede ocasionar la muerte por fibrilación cardiaca. La resistencia eléctrica del cuerpo humano suele ser, por término medio y en condiciones normales, del orden de 5.000 Ω. Si una persona, por accidente, se pone en contacto con una red de 230 V, ¿cuál será la corriente que atraviese su cuerpo? ¿Existe algún peligro de muerte?

Solución:

Intensidad por el cuerpo:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{230}{5.000} = 0{,}046 \text{ A} = 46 \text{ mA}$$

Sí existe el peligro, ya que la intensidad que recorre el cuerpo del accidentado es superior a 30 mA.

Actividad propuesta 2.1

Resuelve los ejercicios planteados en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1.

Ejercicio	*I*	*U*	*R*
1.º	5 A	500 mV	?
2.º	20 A	?	5 Ω
3.º	30 mA	1 V	?
4.º	10 µA	200 V	?
5.º	?	10 kV	15 kΩ
6.º	10 kA	?	600 mΩ

La solución a esta Actividad propuesta la puedes encontrar dentro del MATERIAL WEB elaborado para este texto.

2.5. Resistencia de un conductor

Como ya pudimos estudiar con anterioridad, la resistencia de los diferentes materiales depende fundamentalmente de su naturaleza. Por otro lado, las dimensiones de esos materiales también influyen de forma decisiva en su resistencia final. Esto tiene una especial importancia en los cálculos de la sección de conductores para instalaciones eléctricas, ya que una resistencia elevada en ellos provocaría su calentamiento y su probable deterioro.

Si midiésemos la resistencia de un conductor de cobre de un metro de longitud y de un milímetro cuadrado de sección, obtendríamos un resultado de 0,01786 Ω (Figura 2.10). Este resultado nos indica que, por cada metro de conductor de cobre de un milímetro cuadrado de sección, su resistencia será de 0,01786 Ω.

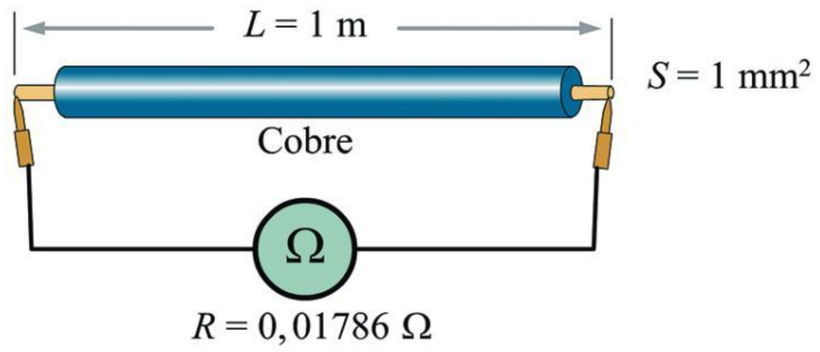


Figura 2.10. Medida de la resistividad del cobre.

Por otro lado es lógico pensar que, si la resistencia eléctrica es la dificultad que ofrece un conductor al paso de la corriente eléctrica, esta dificultad irá aumentando en función del camino que tenga que recorrer; es decir, a mayor longitud, mayor será la resistencia. Así, por ejemplo, si ahora midiésemos la resistencia de un conductor de 2 m de cobre de 1 mm^2, observaríamos que la resistencia ha aumentado al doble (0,03572 Ω).

La resistencia de un conductor aumenta con su longitud.

Si, por el contrario, se aumenta la sección del conductor, los electrones tendrán más libertad para moverse y, por tanto, la resistencia será menor. Así, por ejemplo, si midiésemos la resistencia de un conductor de 1 m de cobre de 2 mm^2 daría como resultado un valor óhmico de la mitad (0,00893 Ω).

La resistencia de un conductor disminuye con su sección.

Teniendo en cuenta todas estas consideraciones, la expresión matemática necesaria para determinar la resistencia de un conductor de cobre (R_{cu}) podría quedar así:

$$R_{cu} = 0{,}01786 \frac{L}{S}$$

0,01786 = Resistencia en ohmios por cada metro de conductor de 1 mm^2 a 20 ºC.

L = Longitud del conductor en m.

S = Sección del conductor en mm^2.

Lógicamente, esta fórmula solo será válida para calcular la resistencia de conductores de cobre. ¿Qué expresión utilizaremos entonces para otros materiales? Como ya se dijo, existen materiales que son mejores conductores que otros; así, por ejemplo, el aluminio es peor conductor que el

© Ediciones Paraninfo

cobre. De tal forma que, si midiésemos ahora la resistencia de un conductor de aluminio de un metro de longitud y de un milímetro cuadrado de sección, obtendríamos un resultado igual a 0,02857 Ω.

Está claro que cada material tendrá un determinado valor de resistencia por cada metro y milímetro cuadrado de sección del mismo. A este valor se lo denomina «coeficiente de resistividad» y se representa con la letra griega ρ.

La fórmula general para calcular la resistencia de cualquier tipo de conductor podría quedar así:

$$R = \rho \frac{L}{S}$$

ρ = Coeficiente de resistividad ($\Omega \cdot mm^2/m$).

L = Longitud del conductor (m).

S = Sección del conductor (mm^2).

R = Resistencia del conductor (Ω).

En la Tabla 2.2 se expone una lista con el coeficiente de resistividad, a 20 ºC de temperatura, de los materiales más utilizados.

Tabla 2.2. Resistividad de conductores y aislantes a 20 ºC

Material	ρ_{20° ($\Omega \cdot mm^2/m$)	Material	ρ_{20° ($\Omega \cdot mm^2/m$)
Plata	0,016	Isabelín	0,5
Cobre	0,01786	Constantán	0,5
Bronce	0,018..0,056	Resistina	0,5
Oro	0,023	Kruppina	0,85
Aluminio	0,02857	Mercurio	0,96
Magnesio	0,045	Cromoníquel	1,1
Grafito	0,046	Bismuto	1,2
Tungsteno	0,055	Pizarra	10^{12}
Wolframio	0,055	Celuloide	10^{14}
Cinc	0,063	Tela endurecida	10^{14}
Latón	0,07..0,09	Esteatita	10^{18}
Níquel	0,08..0,11	Ámbar	10^{20}
Hierro	0,10..0,15	Baquelita	10^{20}
Estaño	0,11	Caucho	10^{20}
Platino	0,11..0,14	Mica	10^{20}
Plomo	0,21	PVC	10^{20}
Maillechort	0,3	Vidrio	10^{20}
Orocromo	0,33	Metacrilato	10^{21}
Niquelina	0,43	Poliestireno	10^{21}
Manganina	0,43	Polipropileno	10^{21}

Actividad resuelta 2.5

¿Qué resistencia tendrá un conductor de cobre de 20 m de longitud y 1 mm^2 de sección?

Solución:

$$R = \rho \frac{L}{S} = 0{,}01786 \frac{20}{1} = 0{,}357\ \Omega$$

Actividad resuelta 2.6

¿Y un conductor de aluminio de las mismas dimensiones?

Solución:

$$R = \ldots = 0{,}571\ \Omega$$

Actividad resuelta 2.7

¿Qué sección poseerá un conductor de constantán de 12 m de longitud, si se ha medido una resistencia entre sus terminales de 6 Ω?

Solución:

$$R = \rho \frac{L}{S}$$

despejando:

$$S = \rho \frac{L}{R} = 0{,}5 \frac{12}{6} = 1\ mm^2$$

Actividad resuelta 2.8

Se desea medir la longitud de una bobina de cobre. Para no tener que desenrollar el conductor, se mide con un óhmetro conectado a los extremos de la bobina una resistencia de 1 Ω. Mediante un calibre medimos un diámetro de 0,5 mm (Figura 2.11).

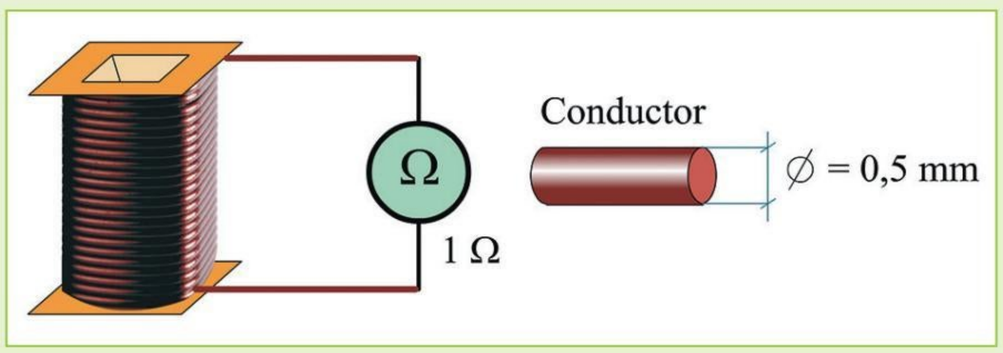


Figura 2.11.

© Ediciones Paraninfo

Solución:

Como la sección es circular:

$$S = \pi r^2 = 3{,}1416 \cdot 0{,}25^2 = 0{,}2 \text{ mm}^2$$

$$R = \rho \frac{L}{S}$$

despejando:

$$L = \frac{R \cdot S}{\rho} = \frac{1 \cdot 0{,}2}{0{,}01786} = 11{,}2 \text{ m}$$

Actividad propuesta 2.2

Resuelve los ejercicios planteados en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3.

Ejercicio	R (Ω)	L (m)	S (mm²)	ρ
1.º	?	50	4	Cinc
2.º	5	?	0,5	Maillechort
3.º	2	5	?	Aluminio
4.º	0,01	?	0,25	Oro
5.º	10	2	0,1	?

La solución a esta Actividad propuesta la puedes encontrar dentro del MATERIAL WEB elaborado para este texto.

2.6. Conductancia y conductividad

Otra forma de expresar que un material es mejor conductor que otro es a través del concepto de conductancia, que nos indica la facilidad que presentan los conductores al paso de la corriente eléctrica. Esta magnitud es inversa a la resistencia y su unidad es el **siemens** (S).

$$G = \frac{1}{R}$$

G = Conductancia (S).

R = Resistencia (Ω).

La conductividad de un conductor nos indica la facilidad que ofrece este al paso de la corriente eléctrica. Es decir, es la inversa de la resistividad y su unidad es el **siemens/metro** (S/m).

$$\gamma = \frac{1}{\rho}$$

γ = Conductividad (S/m).

ρ = Resistividad ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$).

Así, por ejemplo, la conductividad del cobre a 20 ºC es:

$$\gamma_{\text{cobre}} = \frac{1}{\rho_{\text{cobre}}} = \frac{1}{0{,}01786} = 56 \text{ S/m}$$

2.7. Influencia de la temperatura sobre la resistividad

Actividad experimental 2.2

Consigue una lámpara de linterna y mide con el óhmetro su resistencia en frío. Seguidamente, conecta la lámpara a una pila, y mediante un amperímetro y un voltímetro determina los valores de I y de U (Figura 2.12). Con ellos determina el valor de la resistencia óhmica del filamento en caliente, aplicando la ley de Ohm. Compara los resultados obtenidos. ¿Obtuviste los mismos resultados en los dos casos?

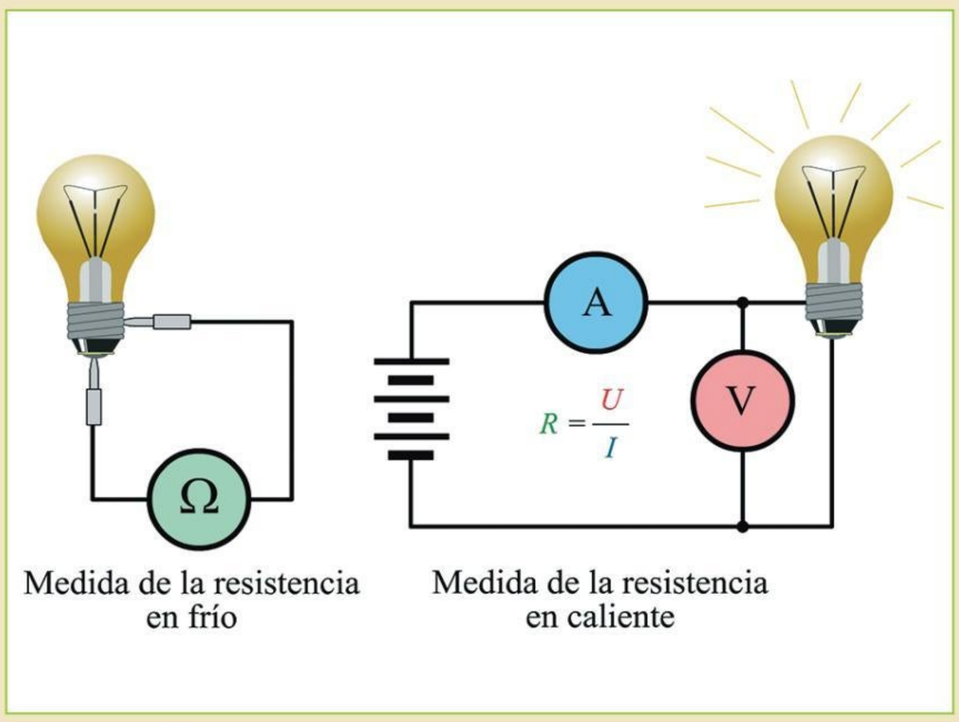


Figura 2.12.

Seguro que no. Al medir la resistencia con el óhmetro, la lámpara está apagada y, por tanto, el filamento se encuentra frío, es decir, a la temperatura ambiente. Por otro lado, cuando se aplica la ley de Ohm para calcular la resistencia, se hace con los datos correspondientes al estado de encendido de la lámpara. Hay que tener en cuenta que, en ese estado, el filamento se encuentra a una temperatura de unos 2.000 ºC. Y es que la resistencia eléctrica se eleva sustancialmente en casi todos los conductores al elevarse su temperatura; de aquí que en una lámpara incandescente la resistencia en frío sea muy inferior a cuando está caliente.

© Ediciones Paraninfo

Por lo general, la resistencia aumenta con la temperatura en los conductores metálicos. Este aumento depende del incremento de la temperatura y de la materia de que esté constituido dicho conductor.

$$R_{t^\circ} = R_0\,(1 + \alpha \cdot \Delta t^\circ)$$

R_{t° = Resistencia en caliente.

R_0 = Resistencia a 20 °C.

α = Coeficiente de temperatura a 20 °C.

Δt° = Elevación de temperatura en °C.

Con esta expresión se puede calcular la resistencia a una temperatura dada (R_{t°), conociendo la temperatura de la resistencia en frío (R_0), la elevación de la temperatura (Δt°) y el coeficiente de temperatura (α), que será diferente para cada material. En la Tabla 2.4 se dan los coeficientes de temperatura de los materiales más utilizados.

Tabla 2.4. Coeficiente de temperatura a 20 °C de las resistencias

Material	α	Material	α
Oro	0,0035	Constantán	0,0001
Plata	0,0036	Wolframio	0,0005
Aluminio	0,00446	Hierro	0,00625
Cobre	0,0039	Ferroníquel	0,00093
Estaño	0,0044	Maillechort	0,00036

El aumento de la resistencia con la temperatura es a veces un gran inconveniente; así ocurre, por ejemplo, en las medidas eléctricas que pueden verse distorsionadas por este fenómeno. Por esta razón, es conveniente utilizar materiales con un bajo coeficiente de temperatura para la construcción de los aparatos de medida.

En otros casos, este aumento de resistencia con la temperatura puede ser beneficioso; como, por ejemplo, para medir temperaturas por medio de resistencias que poseen un alto coeficiente de temperatura (termómetros electrónicos).

De una forma especial, existen materiales en los cuales se reduce la resistencia al aumentar su temperatura. En estos casos se dice que poseen un coeficiente de temperatura negativo. En general, los materiales semiconductores pertenecen a este grupo. En especial, existen resistencias construidas con semiconductores especialmente diseñadas para reducir su resistencia cuando aumenta la temperatura, como las NTC.

Actividad resuelta 2.9

Medimos la resistencia de una fase de un bobinado de cobre de un motor antes de haber funcionado (a la temperatura de 20 °C) y obtenemos un resultado de 4 Ω. Determina la resistencia que alcanzará cuando esté en funcionamiento a una temperatura de 75 °C.

Solución:

$$R_{t^\circ} = R_0\,(1 + \alpha\Delta t^\circ)$$

$$R_{75\,^\circ C} = 4 \cdot (1 + 0{,}0039 \cdot 55) = 4{,}86\ \Omega$$

Actividad resuelta 2.10

¿Cuál será el aumento de temperatura que experimenta una lámpara incandescente con filamento de wolframio si al medir su resistencia a temperatura ambiente (20 °C) obtuvimos un resultado de 358 Ω, habiéndose calculado una resistencia en caliente de 807 Ω?

Solución:

De la expresión original despejamos el incremento de temperatura:

$$\Delta t^\circ = \left(\frac{R_{t^\circ}}{R_0} - 1\right) \Big/ \alpha = \left(\frac{807}{358} - 1\right) \Big/\ 0{,}0005 = 2.508\ ^\circ C$$

Actividad resuelta 2.11

Determina la corriente que aparecerá en la lámpara incandescente de la Actividad resuelta 2.10 al conectarla a 230 V y en los siguientes casos:

a) nada más conectarla;

b) una vez encendida.

Solución:

a) Nada más conectar la lámpara el filamento se encuentra a 20 °C y su resistencia es de 358 Ω.

$$I = \frac{U}{R_{20\,^\circ C}} = \frac{230}{358} = 0{,}64\ A$$

b) Al aumentar la temperatura hasta los 2.528 °C, la resistencia aumenta su valor hasta 807 Ω, produciéndose una disminución y estabilización de la corriente.

$$I = \frac{U}{R_{2.528\,^\circ C}} = \frac{230}{807} = 0{,}29\ A$$

© Ediciones Paraninfo

Como se ha podido comprobar en la tabla de coeficientes de temperatura, existen aleaciones, como el constantán, que apenas varían con la temperatura, lo que las hace ideales para la fabricación de resistencias en las que sea importante la estabilidad de su valor óhmico con los cambios de temperatura.

Los aislantes tienen una característica muy especial: su resistencia disminuye con la temperatura.

Cuando se disminuye mucho la temperatura de los conductores metálicos (cerca de los –273 ºC) se puede llegar a alcanzar la *superconductividad*, es decir, ausencia absoluta de resistencia eléctrica. El paso de la corriente eléctrica por un superconductor no provoca ningún tipo de pérdida calorífica. Hoy en día se están consiguiendo grandes avances en la fabricación de materiales superconductores a temperaturas mucho más elevadas (en torno a los 150 grados bajo cero).

Actividad propuesta 2.3

Resuelve los ejercicios planteados en la Tabla 2.5.

R_{t° = Resistencia en caliente.
R_0 = Resistencia a 20 °C.
α = Coeficiente de temperatura a 20 °C.
Δt° = Elevación de temperatura en °C.

Tabla 2.5.

Ejercicio	R_{t° (Ω)	R_0 (Ω)	α	Δt° (°C)
1.º	?	30	Plata	100
2.º	1.000	?	Aluminio	50
3.º	50	49	?	200
4.º	200	199	Cobre	?

La solución a esta Actividad propuesta la puedes encontrar dentro del MATERIAL WEB elaborado para este texto.

2.8. Resistencia de los aislantes

Ya explicamos que los materiales aislantes o dieléctricos tienen tanta importancia en las aplicaciones prácticas de la electricidad como los conductores. Gracias a los aislantes es posible separar las partes activas de una instalación con las inactivas, con lo que se consiguen instalaciones eléctricas seguras para las personas que las utilizan.

Lo mismo que existen materiales que son mejores conductores que otros, también existen materiales con mayor capacidad de aislamiento que otros. De tal forma que, cuanto mayor es la resistividad de un aislante, mayor es su capacidad de aislamiento.

Dar una cifra exacta de la resistividad de cada uno de los aislantes es un poco complicado, ya que este valor se suele ver reducido por el grado de humedad y por la elevación de la temperatura.

Así, por ejemplo, el agua pura posee una resistividad aproximada de 10 $M\Omega \cdot m^2/m$, y la porcelana 10^{11} $M\Omega \cdot m^2/m$.

2.9. Rigidez dieléctrica

Otra forma de medir la calidad de aislamiento de un material es conociendo su rigidez dieléctrica.

La rigidez dieléctrica de un material es la tensión que es capaz de perforarlo (corriente eléctrica que se establece por el aislante).

Eso quiere decir que los materiales aislantes no son perfectos, ya que pueden ser atravesados por una corriente si se eleva suficientemente la tensión.

Así, por ejemplo, en una tormenta eléctrica, la fuerte tensión entre la nube y la tierra es capaz de perforar un buen aislante: el aire.

Cuando un aislante es perforado por la corriente, la chispa que lo atraviesa suele provocar su destrucción, sobre todo si se trata de un material sólido, ya que las temperaturas que se desarrollan suelen ser altísimas.

Conocer la tensión que es capaz de perforar un aislante es muy importante. De esta forma, podremos elegir los materiales más adecuados en el momento de aislar una línea, o cualquier aparato eléctrico; así conseguimos evitar averías, cortocircuitos y accidentes a las personas que manipulan instalaciones sometidas a tensiones peligrosas.

La tensión necesaria para provocar la perforación del dieléctrico viene expresada en kilovoltios por milímetro de espesor del aislante. Este dato no es constante, y depende de la humedad contenida en el aislante, de la temperatura, de la duración de la tensión aplicada y de otras muchas variables.

Así, por ejemplo, la rigidez dieléctrica de los siguientes elementos es la que se indica:

Agua . . . . . 12,0 kV/mm
Papel . . . . . 16,0 kV/mm
Aceite mineral . . . . . 4,0 kV/mm
Cloruro de polivinilo . . . . . 50,0 kV/mm
Aire seco . . . . . 3,1 kV/mm
Polietileno . . . . . 16,0 kV/mm

Cuando se selecciona un conductor eléctrico, aparte de la sección que resulte ser la más adecuada, es muy importante tener en cuenta la tensión de servicio de la instalación

© Ediciones Paraninfo

donde va a trabajar. En el Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión se indican las tensiones que deberán soportar los aislantes de los conductores eléctricos con un margen de seguridad. Siguiendo estas recomendaciones se fabrican, por ejemplo, conductores de 500 V, 750 V y 1.000 V para baja tensión.

Los materiales aislantes que se utilizan para conseguir estas tensiones de aislamiento en conductores para instalaciones eléctricas de baja tensión pueden ser:

- Policloruro de vinilo (PVC).
- Polietileno reticulado (XLPE).
- Etileno propileno (EPR).

2.10. Manejo del polímetro

Antes de pasar a realizar las actividades de comprobación práctica, vamos a dar unas instrucciones básicas para el buen uso del aparato de medida que vamos a utilizar.

El polímetro o multímetro es un aparato de medida portátil que se utiliza para medir diferentes magnitudes eléctricas, como, por ejemplo, tensión e intensidad de corriente en C.C. y C.A., resistencia, capacidad, prueba de continuidad, prueba de diodos y transistores.

Existen multitud de modelos comerciales de multímetros con diferentes prestaciones y características, aunque su manejo es muy similar; en el momento que se adquiere una cierta práctica en el uso de uno de ellos, prácticamente ya se sabe manejar todos. En la Figura 2.13 se muestra, como ejemplo, la disposición de un polímetro portátil con la identificación de sus diferentes partes.

El polímetro dispone de dos puntas de prueba de diferente color para la realización de las medidas. La punta negra (terminal negativo) (terminal común), siempre debe estar conectada en el borne (10). La punta de prueba roja se conectará en los bornes (8), (9), (11) según la magnitud a medir.

2.10.1. Medida de tensión

Antes de comenzar con la medida se debe conocer si la corriente es continua (14) o alterna (13). Además es importante seleccionar un rango de medida que esté dentro de la medida esperada. Así, por ejemplo, si vamos a medir la tensión en algunas partes del circuito de una placa electrónica que esté alimentada a 12 V, pondremos el selector para medidas en C.C. (14) y comenzaremos con un rango de medida de 20 V; si el resultado de la medida es muy bajo, giraremos el selector hacia el rango 2 V o 200 mV, hasta obtener una lectura en la pantalla lo más precisa posible.



Figura 2.13. Identificación de las partes de un polímetro.

1. Medidas de resistencia (óhmetro).
2. Interruptor de encendido.
3. Medidas de continuidad y comprobación de diodos.
4. Medidas de intensidad (amperímetro) en C.C.
5. Selector rotativo para fijar la magnitud a medir y su campo de medida.
6. Medidas de intensidad (amperímetro) en C.A.
7. Medidas de capacidad para condensadores (capacímetro).
8. Borne de conexión para medida de intensidades hasta 20 A (punta de prueba roja).
9. Borne de conexión para medida de intensidades en el rango de mA (punta de prueba roja).
10. Borne de conexión común para medida de tensiones, intensidades y resistencias (punta de prueba negra).
11. Borne de conexión para medida de tensiones y resistencias (punta de prueba roja).
12. Bornes de conexión para medida de capacidad de condensadores.
13. Medida de tensión (voltímetro) en C.A.
14. Medida de tensión (voltímetro) en C.C.
15. Medida de la ganancia de un transistor.
16. Base para la conexión y comprobación de transistores.
17. Pantalla digital.

© Ediciones Paraninfo

Es importante resaltar que si, al realizar la medida de tensión, nos equivocamos con la conexión de la punta roja y la conectamos al borne de medida de corriente (8) o (9), se puede producir un cortocircuito, que dañe el aparato si el fusible interno no lo corta de forma rápida.

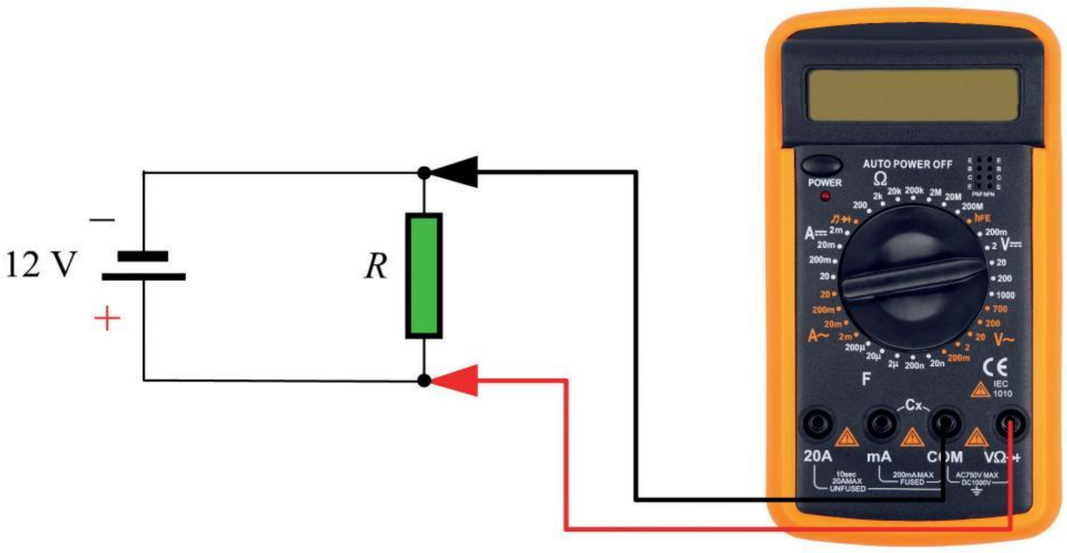


Figura 2.14. Medida de tensión en un circuito C.C.

2.10.2. Medida de intensidad de corriente

Al igual que con las medidas de tensión, antes de realizar la medida se debe saber el tipo de corriente a medir, (4) para C.C. y (6) para C.A. Aquí sí que es muy importante seleccionar el rango adecuado a la medida a realizar, ya que en caso contrario se pueden producir daños internos en el aparato. Así, por ejemplo, si fuésemos a medir la intensidad de corriente por un receptor de mucha potencia, como un motor, o un calefactor, habría que colocar la punta de prueba roja en el borne (8) de 20 A. Para medidas normales en el rango de mA, conectaremos dicha punta de prueba en el borne (9).

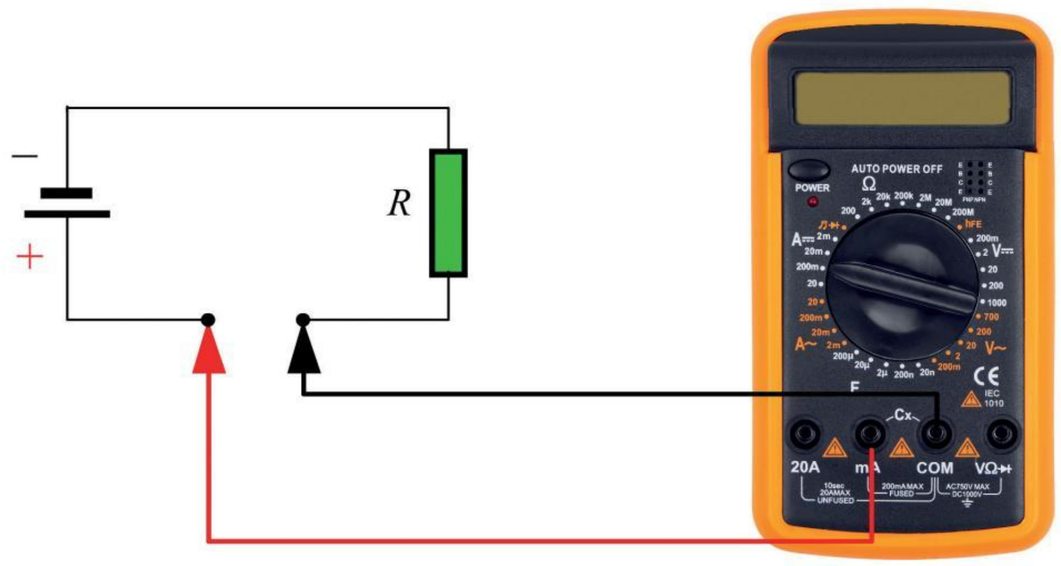


Figura 2.15. Medida de intensidad en un circuito C.C.

2.10.3. Medida de resistencia

Para medir el valor óhmico de una resistencia moveremos el selector (1) hasta situarlo en un rango que se ajuste lo más posible a su valor, obteniendo así una lectura en la pantalla lo más precisa posible.

Todos los aparatos de medida arrojan un cierto error en el resultado obtenidos de su lectura, es lo que se conoce como precisión. Para obtener una medida precisa en resistencias de bajo valor, se debe restar la resistencia que oponen los cables de prueba al resultado obtenido. La resistencia de dichos cables suele estar en torno a 0,5 ohmios.

Como medida de precaución, las resistencias a medir no deben estar alimentadas por ninguna fuente de tensión, ya que en caso contrario se obtendría una lectura falsa y los circuitos internos del polímetro podrían ser dañados.

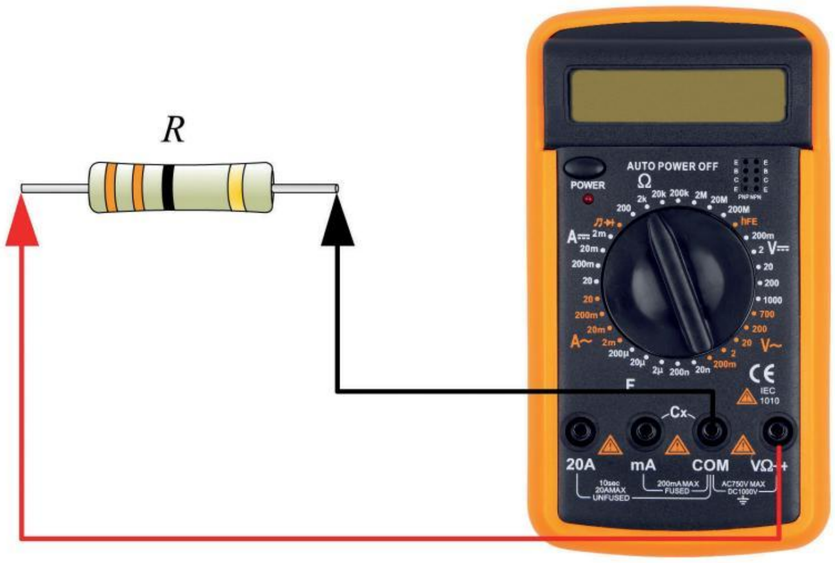


Figura 2.16. Medida de resistencias.

2.10.4. Medida de continuidad y diodos

En las medidas de continuidad, cuando la resistencia del circuito es muy baja el aparato emite un pitido.

Cuando se conecta un diodo semiconductor con la punta roja (11) en el ánodo y la negra (10) en el cátodo, la pantalla nos muestra la tensión de polarización del diodo (suele encontrarse en torno a 0,5 V), en cuyo caso nos indica que su estado es correcto.

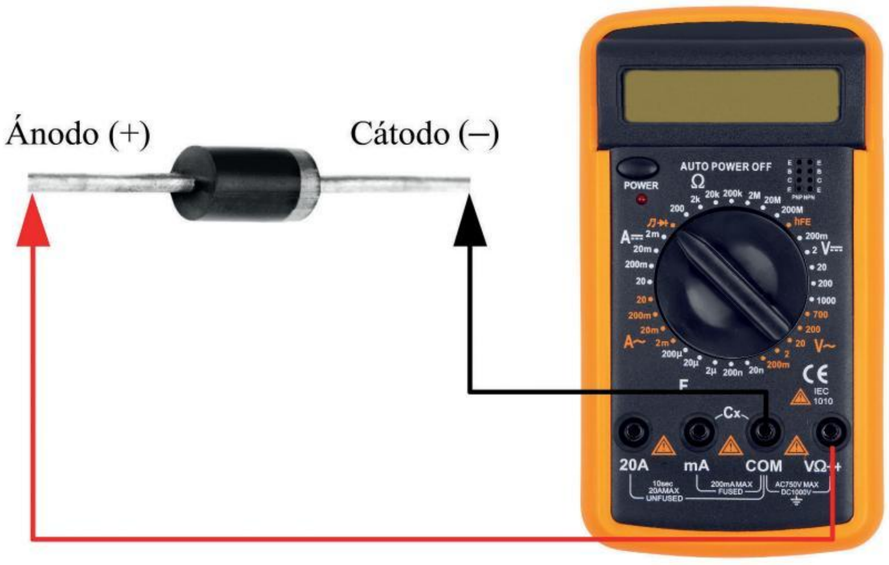


Figura 2.17. Comprobación de diodos.

2.10.5. Medida de capacidad de un condensador

Para medir la capacidad de un condensador moveremos el selector (7) hasta situarlo en un rango de medida adecuado, bien en microfaradios (μF) para condensadores de más capacidad, o en nanofaradios (nF) para los de menos.

Para evitar posibles daños al multímetro o errores en la medida, el condensador debe de estar descargado y desconectado

© Ediciones Paraninfo

de toda fuente de tensión. Para comprobar esta posible circunstancia, antes de realizar la medida, comprueba la tensión de C.C. entre sus terminales.

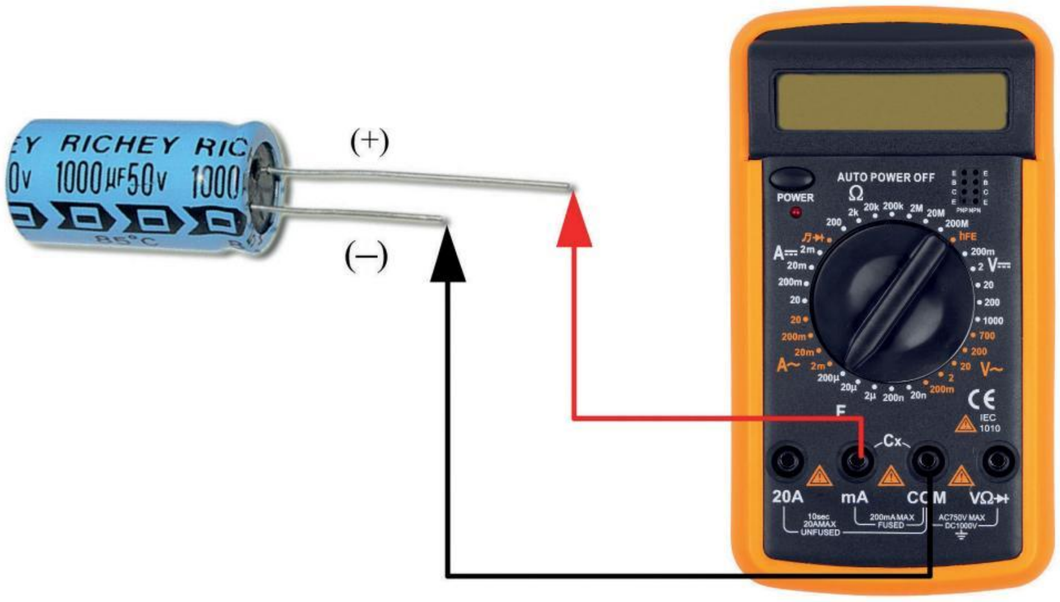


Figura 2.18. Medida de capacidad de condensadores.

2.10.6. Medida de la ganancia de un transistor

Para medir este parámetro hay que conectar los terminales del transistor a la base de conexión (16) y situar el selector en h_{FE} (15). Para conseguir la lectura de la ganancia en la pantalla habrá que hacer coincidir los tres terminales del transistor (**B**ase, **E**misor, **C**olector) con los correspondientes de la base de conexión, según sea del tipo PNP o NPN.



Figura 2.19. Comprobación de transistores.

Si la ganancia obtenida es de un valor aceptable (en torno a unos cientos), nos indicará que el transistor se encuentra en buen estado. Además, nos puede ayudar a identificar el tipo de transistor y la disposición de sus terminales, en caso de su desconocimiento.

2.10.7. Multímetro con selección automática de rango

Para manejar de forma correcta el modelo de multímetro utilizado para este ejemplo, se hace necesario seleccionar el rango de medida que se acerque más a la magnitud a medir. Existen modelos comerciales más avanzados, en los que no es necesario realizar esta operación, ya que el aparato detecta el orden de magnitud de la medida y selecciona de forma automática el rango más adecuado, siempre que el valor a medir no supere los límites máximos indicados en las especificaciones.

En estos modelos basta con seleccionar la magnitud a medir y el tipo de corriente, y aunque el rango se seleccione de forma automática, también ofrecen la posibilidad de su selección manual.

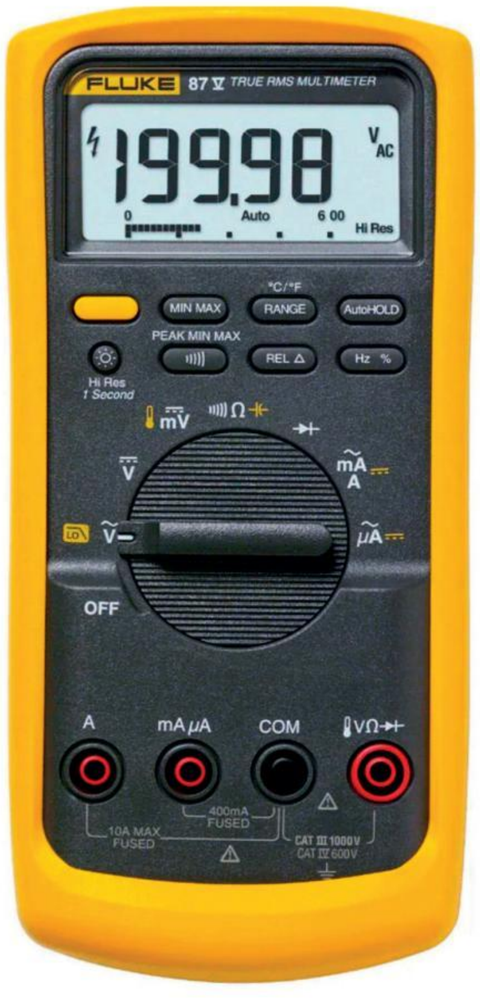


Figura 2.20. Multímetro con selección automática de rango.

© Ediciones Paraninfo

Comprobación práctica en el laboratorio

2.1. Comprobación experimental de la ley de Ohm. Conecta una pila a una resistencia y, a continuación, mide con un polímetro la tensión en bornes de la resistencia, la intensidad de la corriente del circuito, así como la resistencia óhmica de dicha resistencia. Con los resultados obtenidos de las medidas comprueba si se cumple la relación $I = U/R$. Seguidamente conecta otras resistencias de diferente valor y compara los resultados (Figura 2.21).

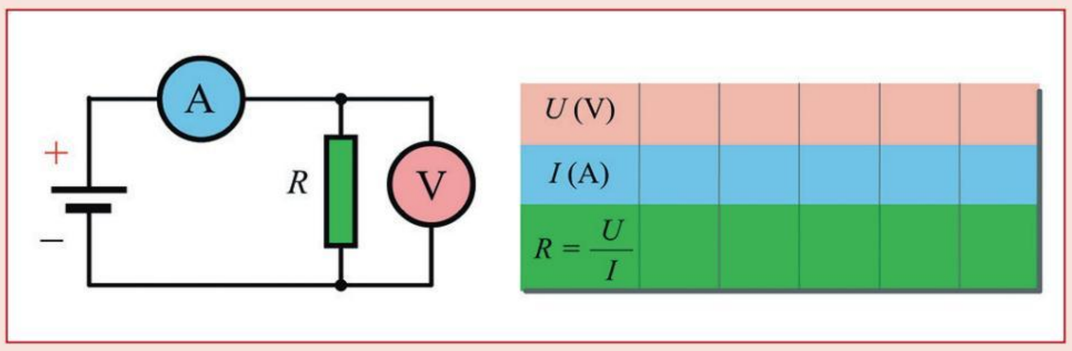


Figura 2.21.

2.2. Relación entre las dimensiones de un conductor y su resistencia. Consigue un trozo de hilo resistivo de resistividad conocida de un metro o más de longitud (nicrón, constantán, etc.). Mide su longitud con una cinta métrica y su diámetro con un calibre o pie de rey. Seguidamente calcula su sección en mm^2 y el valor teórico de su resistencia teniendo en cuenta su resistividad. Una vez hecho esto conecta el trozo de hilo a una fuente de alimentación o a una pila de unos 4 V y mide con un polímetro la tensión aplicada y la intensidad que fluye por él. Con estos datos, y aplicando la ley de Ohm, calcula la resistencia óhmica obtenida de forma experimental y compárala con la obtenida de forma teórica (Figura 2.22).

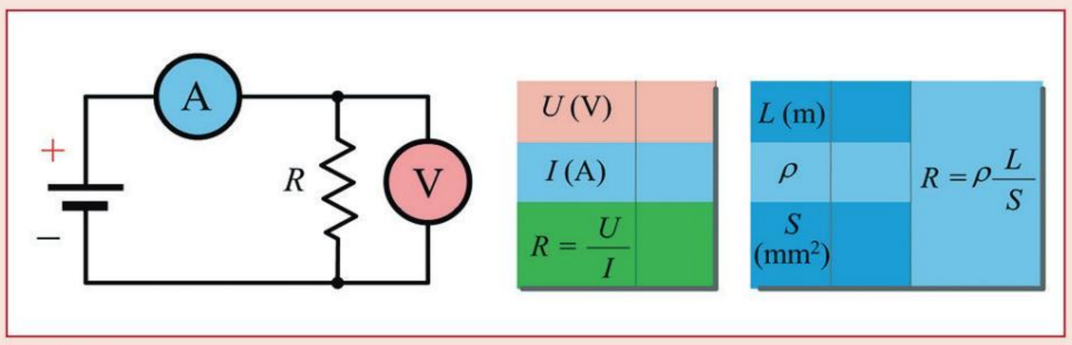


Figura 2.22.

2.3. Influencia de la temperatura en la resistencia. Conecta una lámpara de unos 12 V a una fuente de alimentación de C.C. de tensión regulable de 0 a 12 V (Figura 2.23). Conecta un voltímetro a la salida de la fuente e intercala un amperímetro en serie con la lámpara. Se trata de anotar en una tabla los datos obtenidos en el voltímetro y el amperímetro según se va aumentando la tensión aplicada por la fuente de 1 a 12 V. Si aumentamos la tensión de la fuente en un voltio, cada vez obtendremos doce resultados. Calcula el valor de la resistencia del filamento de la lámpara aplicando la ley de Ohm en cada una de las medidas tomadas y anota los resultados en la tabla. Podrás comprobar cómo el valor óhmico del filamento aumenta según aumenta la temperatura del filamento. Por último, lleva los valores a una gráfica y obtén la relación entre U e I. ¿Es lineal esta relación?

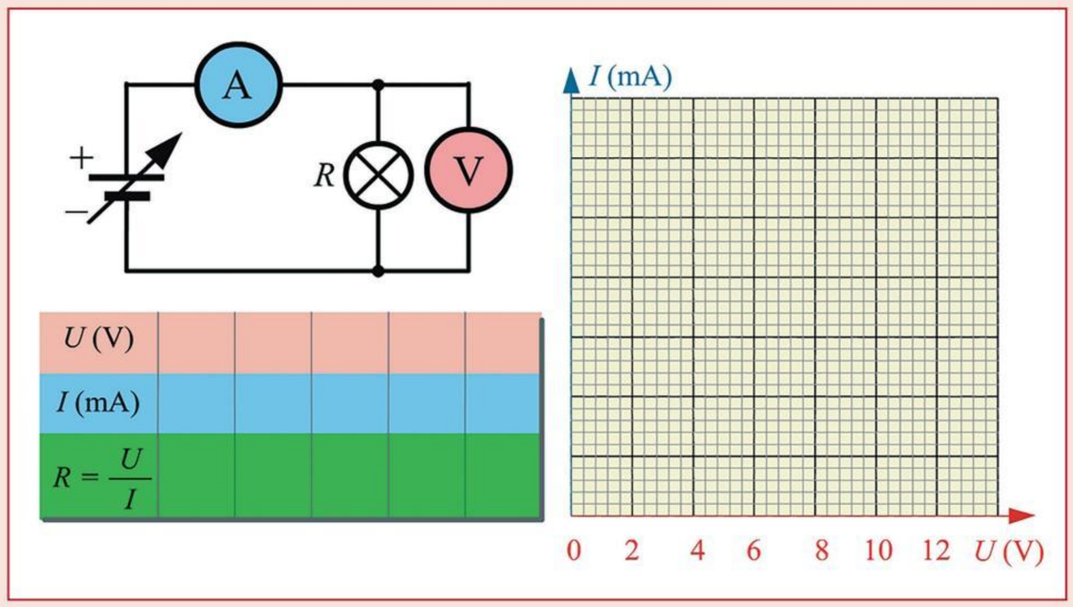


Figura 2.23.

Como en otras ocasiones, al finalizar cada una de estas actividades deberás elaborar un informe-memoria sobre la actividad desarrollada, indicando los resultados obtenidos y estructurándolos en los apartados necesarios para una adecuada documentación de las mismas (descripción del proceso seguido, medios utilizados, esquemas y planos utilizados, cálculos, medidas, etc.).

© Ediciones Paraninfo

Actividades de comprobación

2.1. Para medir la resistencia eléctrica:

a) Se conectan los dos terminales del óhmetro con los de la resistencia que se va a medir.

b) Se conecta la resistencia al circuito para posteriormente realizar la medida con el óhmetro.

c) Se utiliza un resistómetro.

2.2. ¿Cuál es la cualidad por la que se diferencian los buenos conductores de los malos?

a) Intensidad óhmica.

b) Resistencia eléctrica.

c) Tensión resistiva.

2.3. Se dispone de una linterna que funciona con una pila de 1,5 V; la lamparita tiene una resistencia de 50 Ω. Calcula la intensidad del circuito.

2.4. Calcula la tensión de funcionamiento de un horno eléctrico que posee una resistencia de 22 Ω, y que al ser conectado se establece por él una intensidad de 5,7 A.

2.5. ¿Qué resistencia tiene una plancha eléctrica que consume 2 A conectada a 230 V?

2.6. ¿Cuándo será más alta la intensidad de corriente por una lámpara incandescente?

a) Una vez encendida, ya que es cuando más consume.

b) Justo al cerrar el interruptor ya que la resistencia del filamento en frío es pequeña y, por tanto, la intensidad de la corriente será más elevada.

c) La intensidad de la corriente es la misma en todo momento.

2.7. ¿Cuál es la sustancia que más se aproximaría al super aislante?

a) El vacío, ya que al no existir en él materia no hay electrones que se puedan poner en movimiento.

b) El aire.

c) Los plásticos sintéticos.

2.8. Se quiere determinar la longitud de un carrete de hilo de cobre esmaltado de 0,25 mm de diámetro. Para ello, se mide con un óhmetro su resistencia, y se obtiene un resultado de 34,6 Ω.

2.9. ¿Qué característica se utiliza habitualmente para medir el poder de aislamiento de un material?

a) El grosor del aislante.

b) La rigidez dieléctrica.

c) La intensidad máxima que soporta.

2.10. ¿Qué material es necesario utilizar para conseguir que un metro de conductor de 0,5 mm^2 posea una resistencia de 56 mΩ?

a) El cobre.

b) El aluminio.

c) La plata.

2.11. ¿Qué tendrá más resistencia, un conductor de cobre de 100 m de longitud y 6 mm^2 de sección, o uno de aluminio de la misma longitud y de 10 mm^2?

a) Conductor de cobre.

b) Conductor de aluminio.

c) Aproximadamente igual.

2.12. ¿Cuál será la sección de un conductor de cinc de 5 metros, si posee una resistencia de 1 Ω?

2.13. La resistencia a 20 °C de una bobina de cobre es de 5 Ω. Calcula la resistencia de esa bobina a 80 °C.

2.14. Una resistencia ha aumentado 1,05 Ω al incrementar su temperatura de 20 °C a *t* °C. Determina la resistencia final y la temperatura que alcanzó, si su coeficiente de temperatura es de 0,004 y la resistencia a 20 °C es de 65 Ω.

2.15. La conductancia de un conductor se mide en

a) Ohmios.

b) Siemens.

c) Siemens/metro.

2.16. La conductividad de un conductor es una magnitud eléctrica que se presenta por el símbolo:

a) G.

b) ρ.

c) γ.

© Ediciones Paraninfo

Actividades de ampliación

Con el fin de conseguir una mayor profundización en la materia, se han incluido los enunciados de una serie de ***«actividades de evaluación propuestas de ampliación (2)»*** para esta unidad que podrás encontrar dentro del MATERIAL WEB elaborado para este texto. Selecciona alguna de estas actividades y encuentra su solución.

2.1. Código de colores para resistencias. Consigue en el laboratorio de electrónica unas cuantas resistencias de las que se utilizan en los circuitos electrónicos y que vienen marcadas con anillos de color. Averigua cómo funciona el código de colores e identifica el valor óhmico y la tolerancia de cada una de ellas. El texto que se expone a continuación te ayudará a conseguirlo.

Para la identificación de las pequeñas resistencias que se utilizan para la fabricación de circuitos electrónicos, se utiliza un código normalizado que consiste en inscribir una serie de anillos de colores sobre la superficie del cuerpo de la resistencia. Mediante este código de colores es posible averiguar de un vistazo el valor óhmico de la resistencia y su tolerancia (Figura 2.24).

Las resistencias suelen presentarse con tres anillos de diferentes colores y un cuarto un poco más separado de estos. Los tres primeros anillos que vamos a denominar A, B y C dan la clave del valor óhmico y el cuarto indica la tolerancia (Figura 2.25).



Figura 2.24. Las resistencias poseen una serie de anillos de color que nos indican el valor óhmico.

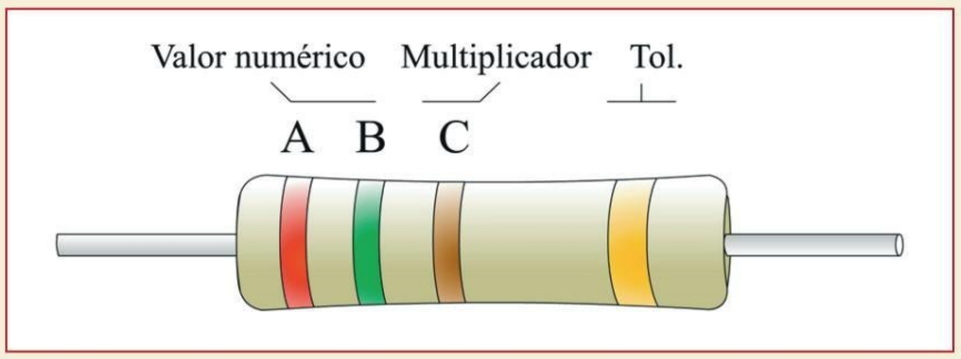


Figura 2.25. Código de colores.

En la Tabla 2.6 está representado el código de colores.

Tabla 2.6. Código de colores para resistencias

Color	A 1.ª cifra	B 2.ª cifra	C Multiplicador	Tolerancia
Negro	0	0	x1	
Marrón	1	1	x10	± 1 %
Rojo	2	2	x100	± 2 %
Naranja	3	3	x1.000	
Amarillo	4	4	x10.000	
Verde	5	5	x100.000	± 0,5 %
Azul	6	6	x1.000.000	
Violeta	7	7	x10.000.000	± 0,1 %
Gris	8	8	x100.000.000	
Blanco	9	9	x1.000.000.000	
Oro	—	—	x0,1	± 5 %
Plata	—	—	x0,01	± 10 %
Sin color	—	—	—	± 20 %

© Ediciones Paraninfo

Así, por ejemplo, si deseamos averiguar el valor óhmico y la tolerancia de una resistencia que aparece con los colores: Rojo - Azul - Naranja - Plata, deberemos proceder de la siguiente forma:

Situamos las cifras que van asociadas a los colores en el orden que aparecen inscritos los mismos:

A		**B**		**C**		**Tol.**
Rojo	-	Azul	-	Naranja	-	Plata
(2)		(6)		(x1.000)		(±10 %)

$$26 \cdot 1.000 = 26.000\ \Omega = 26\ k\Omega \pm 10\ \%$$

El código de colores puede incluir 4, 5 y hasta 6 anillos de color.

En el caso de 5 anillos, los tres primeros (A, B, C) dan el valor numérico, el cuarto (D) el multiplicador y el quinto (E) la tolerancia (Figura 2.26).

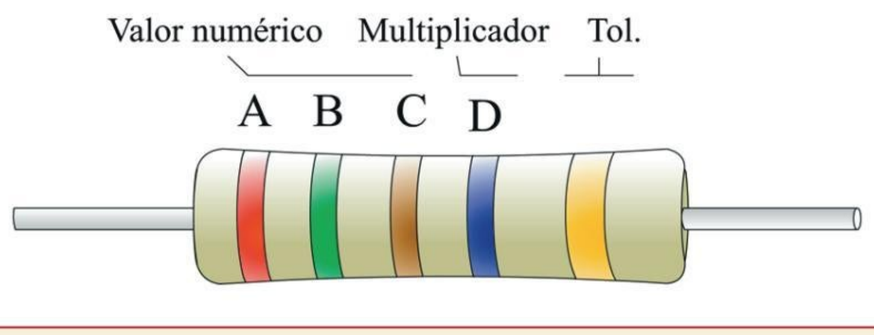


Figura 2.26. Resistencia con 5 anillos de color.

2.2. Identificación de resistencias para montaje superficial (SMD). Consigue en el laboratorio unas cuantas resistencias para montaje superficial (SMD). Investiga qué tipo de códigos de identificación utilizan y averigua el valor óhmico de cada una de ellas. El texto que se expone seguidamente te ayudará a conseguirlo.

La tendencia a reducir cada vez más el tamaño de los circuitos electrónicos, ha llevado a la industria a producir resistencias de pequeño tamaño conocidas por el nombre de SMD o para montaje superficial (Figura 2.27). La característica principal de estos componentes es que se conectan directamente a la superficie del circuito impreso a través de soldadura sin necesidad de realizar taladros en la placa. Los componentes SMD hacen posible un alto grado de automatización en la construcción de circuitos.

El tamaño de estas resistencias puede llegar a ser menor que 1 mm, por lo que no queda suficiente espacio para imprimir las bandas de colores, por lo que para su identificación se utiliza un código alfanumérico de tres o cuatro dígitos (Figura 2.28).

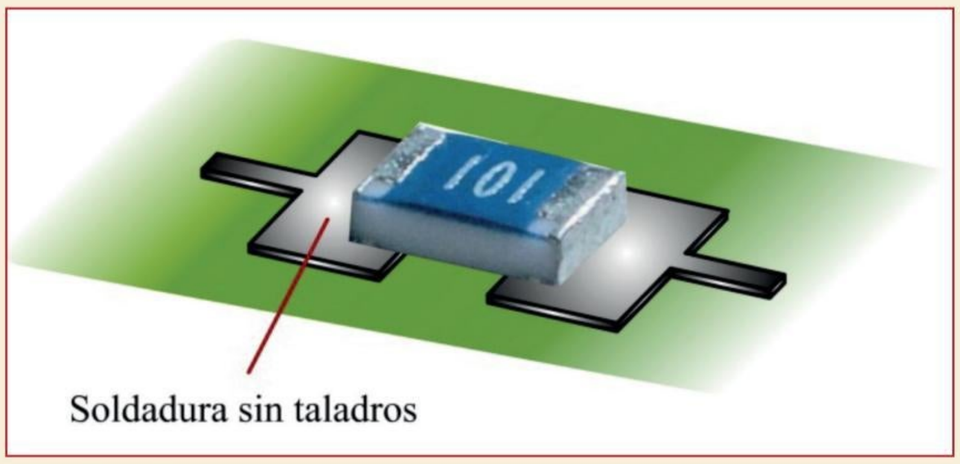


Figura 2.27. Montaje de resistencia SMD.



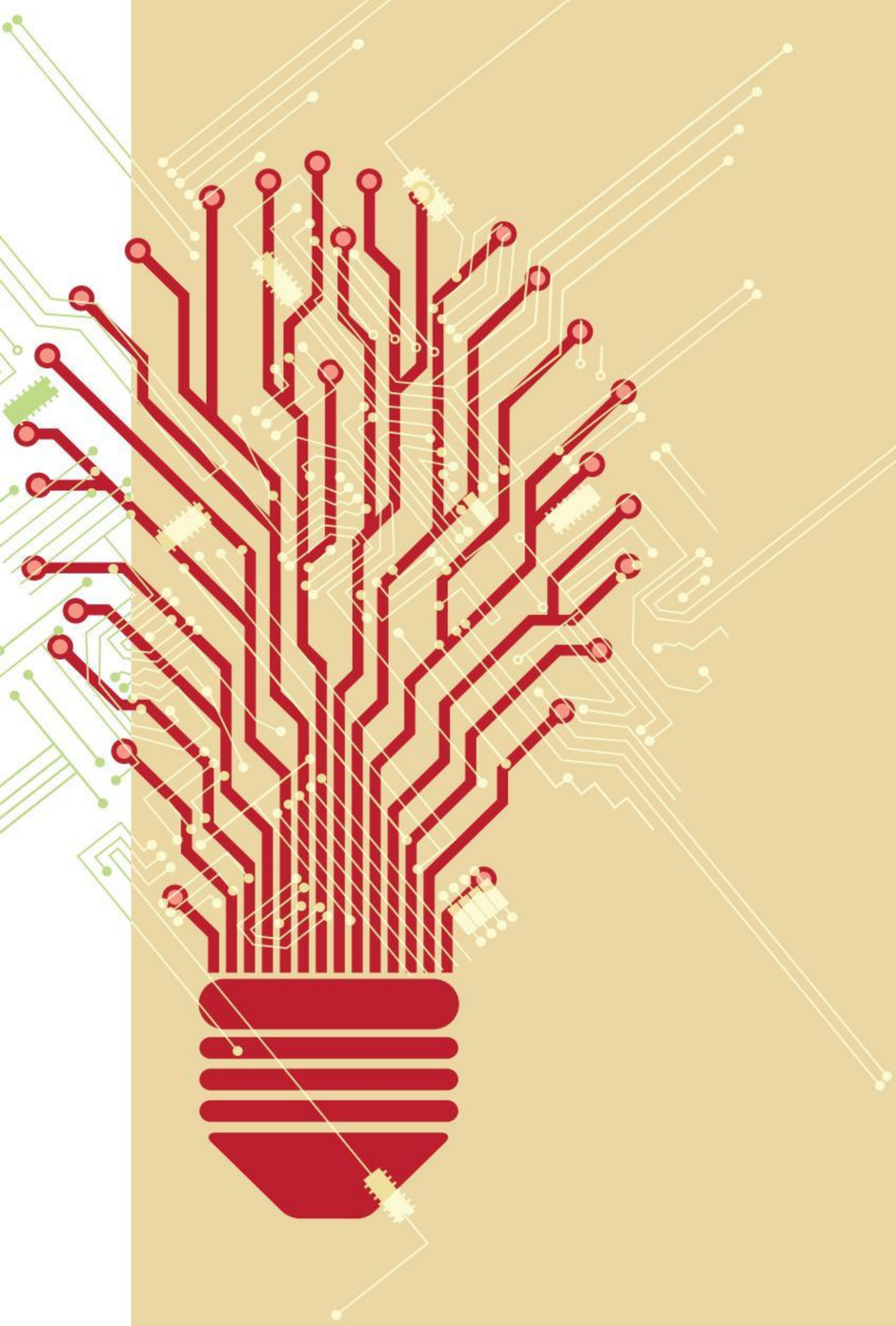
Figura 2.28. Marcado alfanumérico de resistencias SMD.

Tabla 2.7. Ejemplos de resistencias SMD con tres dígitos

152	1.ª Cifra = 1.er: número 2.ª Cifra = 2.º: número 3.ª Cifra = Multiplicador	1.500 Ω
1R8	1.ª Cifra = 1.er: número La «R» indica la coma decimal 3.ª Cifra = 2.º: número	1,8 Ω
R33	La «R» indica «0» 2.ª Cifra = 2º: número 3.ª Cifra = 3.er: número	0,33 Ω

Para tolerancias más bajas, como por ejemplo el 1 %, se utilizan códigos con 4 dígitos, en los que las tres primeras cifras indican los tres primeros dígitos del valor, y el cuarto dígito indica el multiplicador.

© Ediciones Paraninfo



3 Potencia y energía eléctrica

Contenidos

- **3.1.** Potencia eléctrica
- **3.2.** Medida de la potencia eléctrica
- **3.3.** Energía eléctrica
- **3.4.** Medida de la energía eléctrica

El conocimiento de la potencia eléctrica de un receptor es importante, ya que nos indica lo capaz que es este de realizar una determinada tarea: iluminar (lámparas), trabajo mecánico (motores), calentar (resistencias calefactoras), etc. Cuanta más potencia posea el receptor, más rápido realizará la tarea o trabajo. Como estudiaremos más adelante, al aumentar la potencia también aumenta la intensidad de corriente por el circuito.

El conocimiento de la energía eléctrica consumida por un receptor es también importante, puesto que a partir de este concepto se negocia la factura que hay que abonar a la compañía suministradora de energía eléctrica.

Objetivos

- Definir el concepto de potencia y energía eléctrica.
- Aplicar las expresiones matemáticas de la potencia y energía eléctrica para resolver cuestiones prácticas.
- Relacionar la potencia perdida en un conductor con su resistencia y corriente.
- Medir la potencia y la energía eléctrica.

3.1. Potencia eléctrica

La unidad de potencia eléctrica es el vatio (W). Si nos preguntan qué lámpara luce más, una de 60 W o una de 40 W, la respuesta sería muy clara: la de 60 W, que es la que más potencia posee. Pero ¿qué es la potencia eléctrica?

En la asignatura de física, se suele definir la potencia como la rapidez con la que se ejecuta un trabajo, es decir, la relación que existe entre el trabajo realizado y el tiempo invertido en realizarlo.

Como todos sabemos, el trabajo se produce gracias a la energía. Trabajo y energía son dos conceptos que dicen lo mismo:

$$\text{Potencia} = \frac{\text{Trabajo}}{\text{Tiempo}}$$

$$P = \frac{E}{t}$$

P = Potencia en vatios (W).
E = Energía en julios (J).
t = Tiempo en segundos (s).

$$\text{Potencia} = \frac{\text{Energía}}{\text{Tiempo}}$$

Actividad resuelta 3.1

Determina la potencia que debe desarrollar un ascensor que pesa 500 kg si para subir al quinto piso (a una distancia de 25 m del suelo) emplea un tiempo de 50 segundos al moverse a una velocidad de 0,5 m/s. Calcula también la energía consumida.

Solución:

El trabajo que necesita un móvil para desplazarse a una cierta distancia es el producto de la fuerza aplicada multiplicado por la distancia recorrida:

$$E = F \cdot e = 4.905 \cdot 25 = 122.625 \text{ J}$$

(pasamos los kg a Nw: 500 kg · 9,81 = 4.905 Nw)

$$P = \frac{E}{t} = 2.452{,}5 \text{ W} = 2{,}5 \text{ kW}$$

Para determinar la potencia también nos podíamos haber valido de la siguiente expresión, que nos indica que la potencia desarrollada por un móvil es el producto de la fuerza aplicada por la velocidad de aquel:

$$P = F \cdot V = 4.905 \cdot 0{,}5 = 2.452{,}5 \text{ W}$$

¿Cómo será la potencia a desarrollar por el ascensor si queremos que suba al quinto piso en tan solo 20 segundos?

La fuerza que mueve un móvil es similar a la tensión que impulsa a moverse a los electrones por un circuito eléctrico. Por otro lado, la velocidad con que se mueve un móvil se puede comparar con la cantidad de electrones que fluyen en un circuito eléctrico en la unidad de tiempo, es decir, de la intensidad de la corriente eléctrica. Según esto, la expresión de la potencia podría quedar así:

$$P = U \cdot I$$

La potencia eléctrica es el producto de la tensión por la intensidad de la corriente.

Actividad resuelta 3.2

En una habitación existe una base de enchufe de 16 amperios. Se quiere determinar la potencia máxima del aparato eléctrico que se puede conectar al enchufe, teniendo en cuenta que la tensión es de 230 voltios.

Solución:

Que la base de enchufe sea de 16 amperios quiere decir que esta es la máxima intensidad que puede circular por él sin que se caliente excesivamente. Luego la potencia máxima que podrá suministrar será:

$$P = U \cdot I = 230 \cdot 16 = 3.680 \text{ W}$$

Actividad resuelta 3.3

Calcula la potencia que consume un horno eléctrico si se conecta a una tensión de 230 V y su resistencia es de 50 Ω.

Solución:

Primero calculamos la intensidad, aplicando la ley de Ohm:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{230}{50} = 4{,}6 \text{ A}$$

$$P = U \cdot I = \ldots = 1.058 \text{ W}$$

Actividad resuelta 3.4

La potencia de una cocina eléctrica es de 3,5 kW. Se quiere saber si será suficiente con una base de enchufe de 25 A para conectarla a una red de 230 V.

Solución:

$P = U \cdot I$; despejando: $I = \frac{P}{U} = \frac{3.500 \text{ W}}{230 \text{ V}} = 15{,}2 \text{ A}$

Como la base de enchufe soporta hasta 25 A, está claro que es suficiente para conectar la cocina.

© Ediciones Paraninfo

Actividad resuelta 3.5

La placa de características de una plancha eléctrica indica que su potencia es de 500 W y su corriente nominal de 4 A. Calcula el valor de la resistencia de caldeo.

Solución:

Primero calculamos el valor de la tensión:

$$P = U \cdot I\text{; despejando: } U = \frac{P}{I} = \ldots = 125 \text{ V}$$

Para calcular la resistencia nos valemos de la ley de Ohm:

$$I = \frac{U}{R}\text{; despejando: } R = \frac{U}{I} = \frac{125}{4} = 31{,}25\ \Omega$$

Este problema también se podía haber resuelto determinando primero una fórmula que relacione P, I y R:

$$P = U \cdot I \qquad P = R \cdot I \cdot I$$

$$U = R \cdot I$$

$$P = R \cdot I^2$$

Despeja R de la fórmula obtenida y comprueba el resultado.

Actividad resuelta 3.6

Se dispone de una resistencia calefactora para un horno eléctrico de la que solo se conoce su potencia de trabajo, 700 W, y el valor óhmico de la misma, 75,6 Ω. ¿A qué tensión se podrá conectar el horno para que funcione correctamente?

Solución:

Este problema entraña un poco más de complejidad. Para resolverlo, habrá que encontrar primero una fórmula que relacione P, U y R.

$$P = U \cdot I \qquad P = U\frac{U}{R} = \frac{U^2}{R}$$

$$I = \frac{U}{R}$$

$$P = \frac{U^2}{R}$$

Despejando: $U = \sqrt{P \cdot R} = \sqrt{700 \cdot 75{,}6} = 230$ V

Actividad resuelta 3.7

¿Cuál será la pérdida de potencia que se producirá en los conductores de una línea eléctrica de cobre de 4 mm^2 de sección y de 100 m de longitud, que alimenta un motor eléctrico de 1 kW a 230 V?

Solución:

La potencia que se pierde en los conductores se puede calcular mediante la expresión $P_{PL} = R_L \cdot I^2$, siendo R_L la resistencia de los conductores de la línea e I la intensidad que circula por ellos.

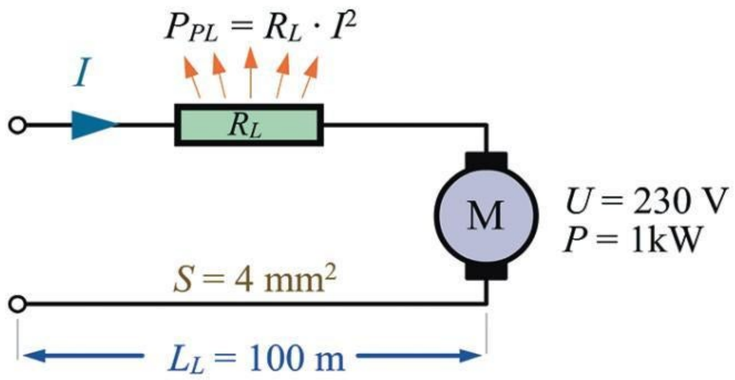


Figura 3.1.

$$I = \frac{P}{U} = \frac{1.000}{230} = 4{,}35 \text{ A}$$

$$R_L = \rho \cdot \frac{L}{S} = 0{,}01786 \cdot \frac{200}{4} = 0{,}89\ \Omega$$

$$P_{PL} = R_L \cdot I^2 = 0{,}89 \cdot 4{,}35^2 = 16{,}84 \text{ W}$$

Nota: Se ha tomado 200 m de longitud de conductor, teniendo en cuenta que son 100 m de ida y 100 m de vuelta. La potencia que se pierde en el conductor se transforma en calor, que eleva su temperatura y puede llegar a perjudicarlo.

Actividad resuelta 3.8

¿Cuál será el aumento de temperatura que experimenta una lámpara incandescente de 60 W/230 V con filamento de wolframio, si al medir su temperatura en frío obtuvimos un resultado de 358 Ω?

Solución:

Primero calculamos la resistencia aproximada en caliente con la ayuda de las características de la lámpara:

$$P = \frac{U^2}{R}\text{; despejando: } R = \frac{U^2}{P} = \ldots = 881{,}7\ \Omega$$

$$R_{t^\circ} = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta t^\circ)\text{; despejando:}$$

$$\Delta t^\circ = \frac{\left(\frac{R_t}{R_0} - 1\right)}{\alpha} \ldots = 2.926\ ^\circ\text{C}$$

© Ediciones Paraninfo

Actividad propuesta 3.1

Resuelve los ejercicios planteados en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1.

Ejercicio	*I*	*U*	*R*	*P*
1.º	5 A	500 mV	?	?
2.º	20 A	?	5 Ω	?
3.º	30 mA	?	?	5 W
4.º	?	200 V	?	100 mW
5.º	?	10 kV	15 kΩ	?
6.º	?	?	600 mΩ	1 kW

La solución a esta Actividad propuesta la puedes encontrar dentro del MATERIAL WEB elaborado para este texto.

3.2. Medida de la potencia eléctrica

El aparato que mide la potencia eléctrica es el vatímetro.

En realidad, el vatímetro mide por separado la tensión y la intensidad de la corriente, para después realizar la operación $P = U \cdot I$ (Figura 3.2).

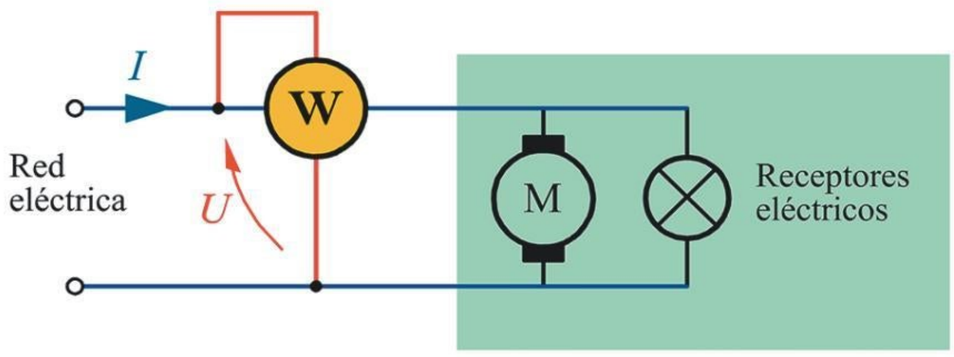


Figura 3.2. Esquema de conexiones del vatímetro.

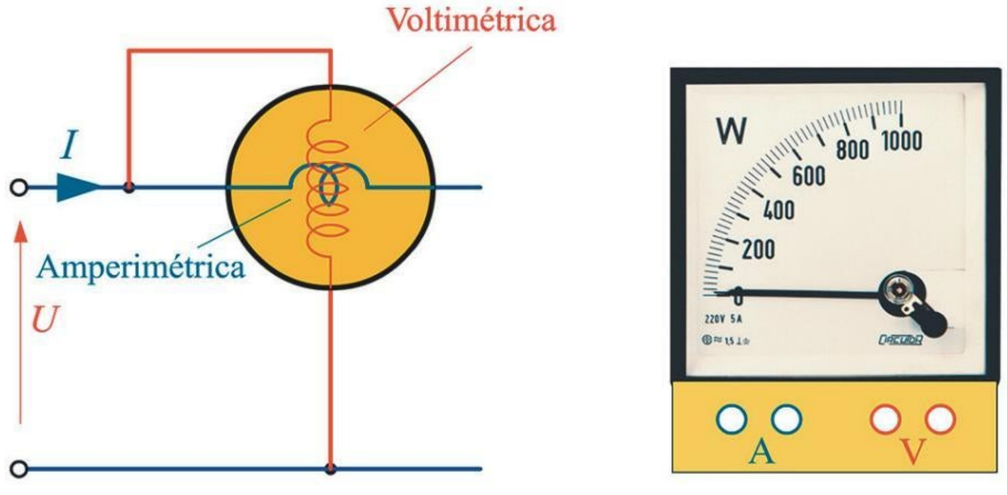


Figura 3.3. Circuitos internos del vatímetro.

Este aparato consta de dos bobinas, una amperimétrica y otra voltimétrica (Figura 3.3). La bobina amperimétrica posee unas características similares a la de un amperímetro: tiene una resistencia muy baja y se conecta en serie. La bobina voltimétrica posee las mismas características que las de un voltímetro: tiene una resistencia muy alta y se conecta en paralelo.

3.3. Energía eléctrica

De la expresión que relaciona la energía con la potencia se deduce que la energía es el producto de la potencia por el tiempo. El cálculo de la energía eléctrica consumida por un receptor es muy interesante, especialmente para los consumidores, ya que sobre él se establecen los costes que facturan las compañías eléctricas.

$P = \frac{E}{t}$; despejando: $E = P \cdot t$

¿Cuál es la unidad de medida de la energía eléctrica? Todo dependerá de las unidades que se tomen de la potencia y del tiempo.

$E = P \cdot t$			
P (W)	*t* (s)	*P* (kW)	*t* (h)
E = W · s = Julios		*E* = kW · h = kilovatios · hora	

El julio es la unidad perteneciente al Sistema Internacional. Como es muy pequeña, se suele utilizar más el kWh.

Actividad resuelta 3.9

Calcula la energía, en kWh y julios, consumidos por un calefactor de 500 W en 8 horas de funcionamiento.

Solución:

$E = P \cdot t = 0{,}5 \text{ kW} \cdot 8 \text{ h} = 4 \text{ kWh}$

500 W = 500/1.000 = 0,5 kW

$E = P \cdot t = 500 \text{ W} \cdot 28.000 \text{ s} =$

$= 14.400.000$ julios

8 horas = 8 · 3.600 = 28.800 s

Actividad resuelta 3.10

Se quiere determinar el gasto bimensual de un calefactor de 500 W, que funciona, por término medio, 4 horas al día. Precio del kWh: 0,09 €.

© Ediciones Paraninfo

Solución:

$$E = P \cdot t = 0{,}5 \text{ kW} \cdot 240 \text{ h} = 120 \text{ kWh}$$

$$t = 60 \text{ días} \cdot 4 \text{ h} = 240 \text{ h}$$

$$\text{Gasto} = 120 \text{ kWh} \cdot 0{,}09 \text{ €} = 10{,}8 \text{ €}$$

Actividad resuelta 3.11

¿Cuánto tiempo podremos tener conectado un televisor de 100 W si deseamos gastar 1 € en concepto de energía eléctrica, siendo el precio del kWh de 0,1 €?

Solución:

$$\text{Gasto} = E \cdot \text{precio kWh, despejando}$$

$$E = \frac{\text{Gasto}}{\text{precio kWh}} = \frac{1}{0{,}1} = 10 \text{ kWh}$$

$$E = P \cdot t, \text{ despejando } t = \frac{E}{P} = \frac{10}{0{,}1} = 100 \text{ horas}$$

3.4. Medida de la energía eléctrica

El aparato que mide la energía eléctrica consumida es el contador y, como todos bien sabemos, es el que nos dice, a fin de cuentas, lo que debemos pagar a la compañía eléctrica.

El contador se conecta exactamente igual que un vatímetro, y nos da la lectura de la energía consumida, gracias a que integra el producto de la potencia por el tiempo (Figura 3.4).

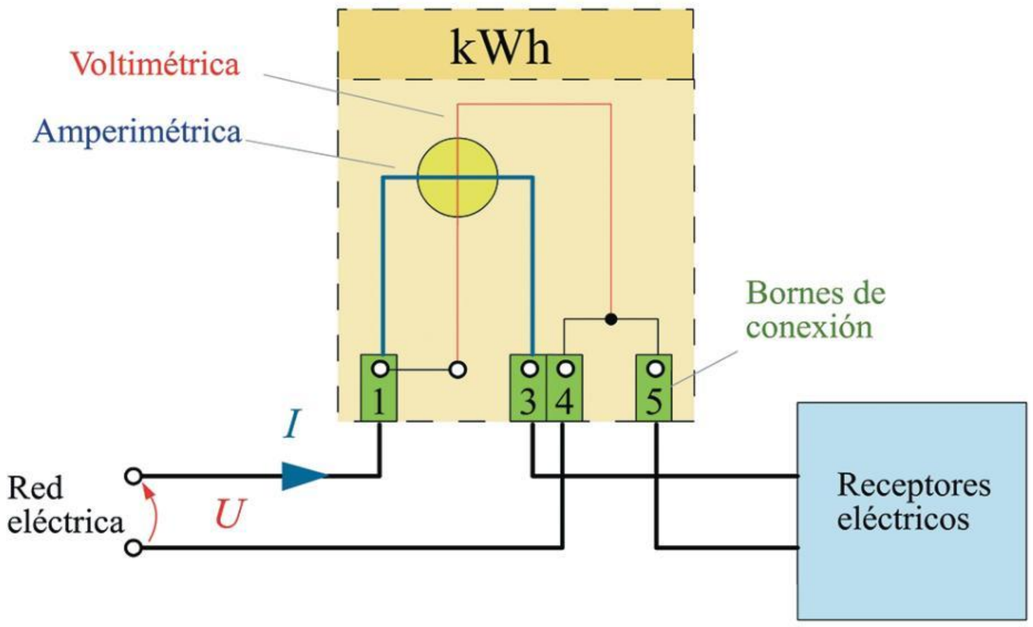
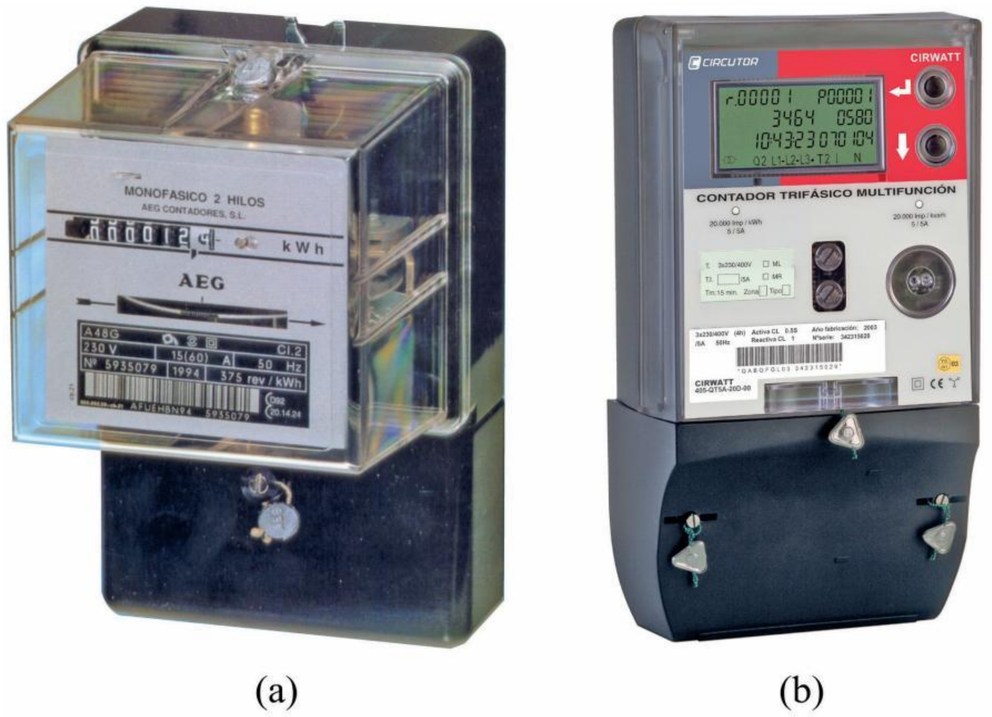


Figura 3.4. Esquema eléctrico de un contador de energía.

El contador de energía que más se ha estado utilizando hasta hace unos pocos años es el de inducción, que realiza la medida gracias a un sistema motorizado, que obliga a girar un disco. La velocidad de dicho disco depende del producto de la tensión por la intensidad, es decir de la potencia. Existe un sistema que cuenta el número de vueltas y presenta una lectura directa de los kWh consumidos.

El contador de energía digital ha sustituido prácticamente en su totalidad al de inducción y su funcionamiento es totalmente electrónico. Este equipo de medida envía por vía telemática la lectura del consumo a la distribuidora de energía a tiempo real, por lo que se evita el que un técnico tenga que desplazarse y realizar la lectura presencial. Este contador permite la contratación de tarifas, por parte del usuario, con discriminación horaria y la posibilidad de realizar un seguimiento del consumo diario a través de una aplicación móvil o un espacio web.



(a) (b)

Figura 3.5. Contador de energía: (a) De inducción; (b) Digital e inteligente

3.4.1. Funcionamiento del contador de energía digital

En la Figura 3.6 se muestra, como ejemplo, el panel frontal de un contador digital monofásico.



Figura 3.6. Panel frontal de un contador de energía digital.

© Ediciones Paraninfo

El **piloto de luz rojo** nos da información sobre el estado actual de funcionamiento:

- **Apagado:** no hay consumo de energía eléctrica.
- **Parpadea de forma continua:** sí hay consumo de energía eléctrica.
- **Parpadea de forma rápida:** el consumo de energía es muy alto.
- **Luz roja fija:** el contador se ha bloqueado al haberse superado la potencia eléctrica contratada y se interrumpe el suministro eléctrico. Este sistema hace las veces de Interceptor de Control de Potencia (ICP).

Para desbloquear el contador en el caso de haberse superado la potencia eléctrica contratada existen dos posibilidades:

- Desconectar el interruptor general de nuestro cuadro general de mando y protección situado en nuestra vivienda durante unos segundos, para volver a conectarlo y restablecer así el servicio de suministro de energía eléctrica.
- Pulsando el botón amarillo de menú situado en el panel frontal del contador.

El **pulsador de menú** nos da acceso a los diferentes menus de lectura. Si se mantiene pulsado el botón durante dos segundos, el *display* mostrará «Modo lectura» y entraremos en unos menús.

Para moverse en las distintas opciones del menú basta con una pulsación corta. Para seleccionar una opción realizamos una pulsación más larga (más de dos segundos).

Con el pulsador de menú podremos acceder, entre otros parámetros, a las lecturas de consumo por discriminación horaria, como por ejemplo:

- **1.18.0:** energía total consumida.
- **1.18.1:** lectura de contador en horas punta.
- **1.18.2:** lectura de contador en horas valle.
- **1.18.3:** lectura de contador en horas supervalle.

© Ediciones Paraninfo

Comprobación práctica en el laboratorio

3.1. **Medida de la potencia eléctrica.** Con los datos obtenidos en las lecturas del voltímetro y del amperímetro de la Actividad de comprobación práctica en el laboratorio 2.1, calcula la potencia que le correspondería a las resistencias utilizadas en dicha actividad (Figura 3.7).

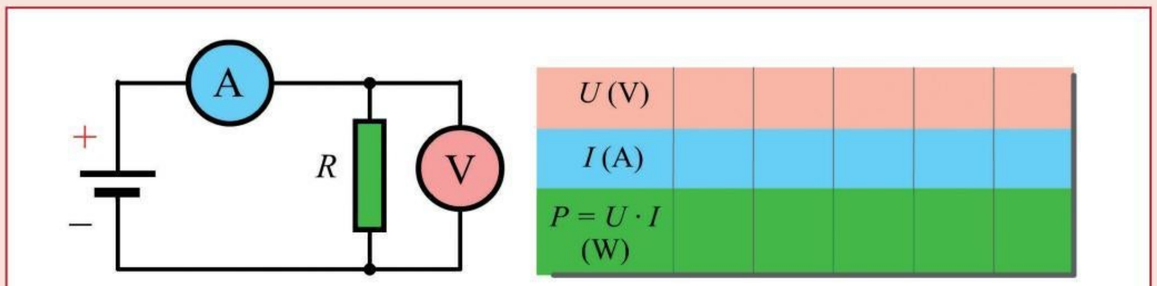


Figura 3.7.

Ahora toma un vatímetro y mediante el esquema de conexiones de la Figura 3.8 mide su potencia.

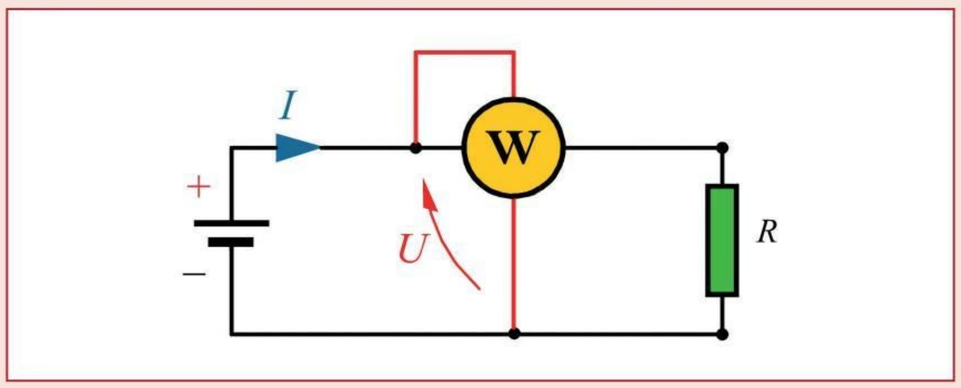


Figura 3.8.

Compara los resultados obtenidos por ambos métodos de medición. Lo más probable es que estos no sean iguales. Esto nos indica que los aparatos de medida no son perfectos y que, por tanto, cometen errores. También hay que tener en cuenta los errores que hayamos podido cometer nosotros al tomar las medidas.

3.2. **Medida de la energía eléctrica.** Con ayuda del esquema de conexiones del contador de energía de la Figura 3.9 conecta un grupo de lámparas o un motor eléctrico de potencia conocida a un contador. Anota la lectura inicial del contador, deja pasar una hora y toma la lectura de nuevo. Averigua la energía consumida y comprueba si el resultado obtenido es similar al obtenido al multiplicar la potencia de los receptores conectados por el tiempo.

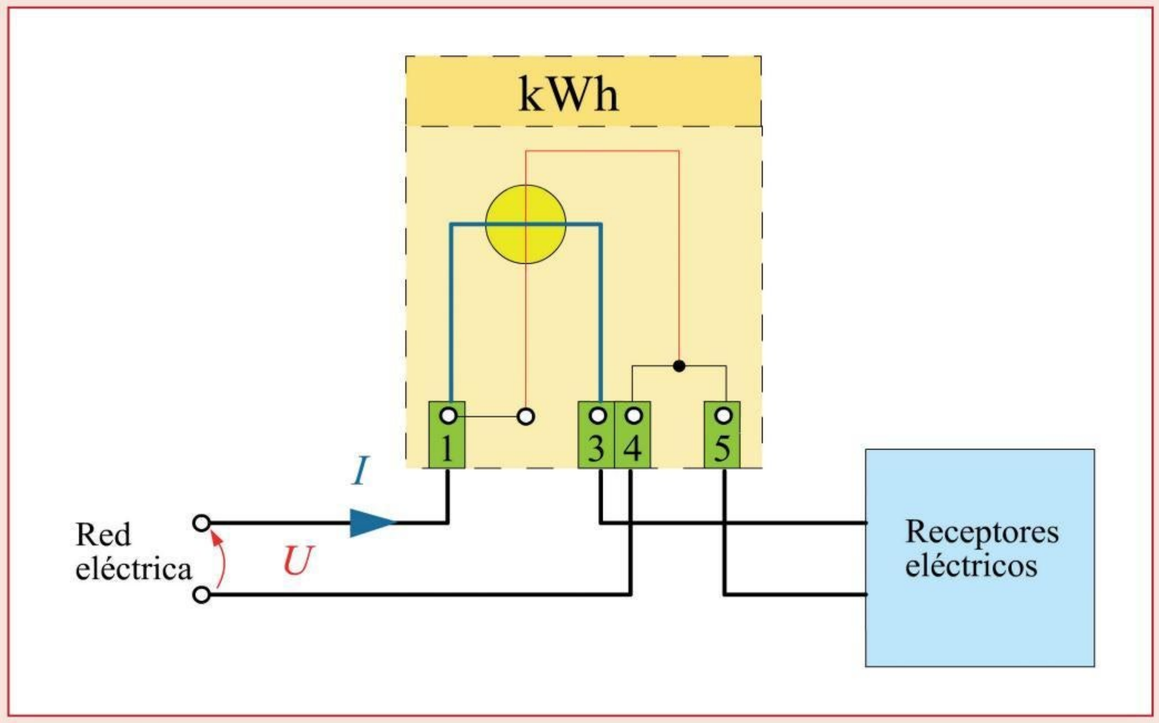


Figura 3.9.

© Ediciones Paraninfo

Actividades de comprobación

3.1. Al conectar una lámpara a una toma de corriente de 100 V se miden por el circuito 750 mA. Determina la potencia de la lámpara y su resistencia.

3.2. ¿A qué tensión habrá que conectar una estufa de 750 W si su resistencia es de 75 Ω? ¿Cuál será la intensidad de la corriente?

3.3. Un calentador de agua presenta en su placa de carac terísticas los siguientes datos: 3 kW/230 V. Determina: a) intensidad de la corriente y resistencia; b) potencia, si se conecta ahora a 110 V, considerando que la resistencia permanece constante.

3.4. En las instalaciones eléctricas de viviendas, junto al cuadro de mando y protección, e inmediatamente an tes, se sitúa el «Interruptor de control de potencia (ICP)» (Figura 3.10). Este es un interruptor automático que determina la potencia simultánea disponible, de acuerdo con el contrato de suministro de energía eléctrica. Este interruptor desconecta la instalación; se «dispara» cuando la suma de las potencias de los aparatos conectados a la vez sobrepasa la potencia contratada. ¿De qué calibre (intensidad a la que dispara) será el interruptor de control de potencia, si la potencia contratada es de 4,4 kW a la tensión de 230 V?

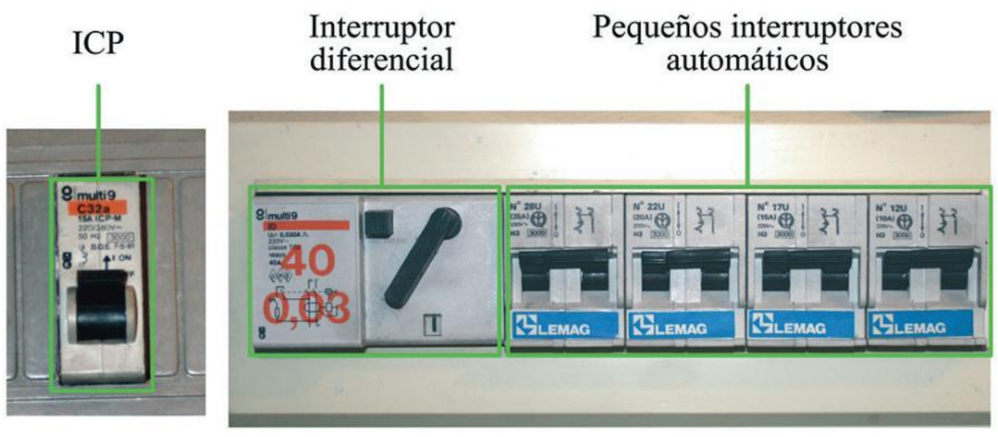


Figura 3.10. Cuadro de protección de una vivienda.

3.5. Calcula la potencia que perderá una línea eléctrica de 50 m de longitud compuesta por dos conductores de aluminio de 1,5 mm^2 de sección y que alimenta un motor eléctrico de 1 kW a 125 V.

3.6. La placa de una cocina eléctrica indica que consume una potencia de 2,5 kW a la tensión de 230 V. Calcula:

a) La intensidad.

b) El valor de la resistencia.

c) La energía eléctrica que consumirá (en kWh) en un mes, si funciona durante 2 horas al día.

3.7. ¿Cómo fabricar una estufa? En el mercado existen hilos metálicos con un coeficiente de resistividad bastante alto. Por ejemplo, el ferroníquel tiene un coeficiente de resistividad de 0,8 Ω · mm^2/m. Si nosotros enrollamos hilo de este material sobre un soporte aislante (a ser posible un material refractario), y hacemos pasar una corriente por él, este se calentará intensamente (Figura 3.11).

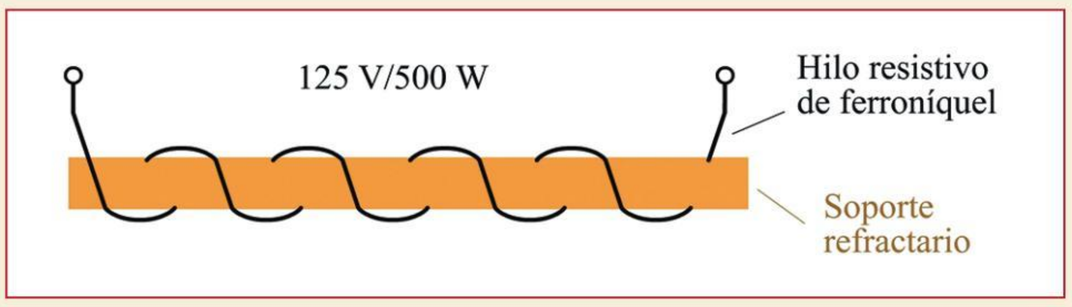


Figura 3.11. Fabricación de una estufa con hilo resistivo.

El proyecto de fabricación de la estufa podría ser el siguiente. Se quiere construir una estufa eléctrica de 500 W de potencia para conectar una red de 125 V de tensión. Para ello, se dispone de hilo de ferroníquel de 0,5 mm^2 de sección. Determina la longitud del hilo que será necesario enrollar sobre el soporte aislante.

3.8. Para elevar agua de un pozo se instala una motobomba movida por un motor eléctrico de 3 CV a una red de 400 V. Teniendo en cuenta que 1 CV equivale, aproximadamente, a 736 W, calcula:

a) La intensidad de corriente.

b) El gasto bimensual si el motor funciona, por término medio, 8 h al día. Precio del kWh: 0,1 €.

3.9. ¿Cómo es la resistencia de los circuitos medidores de un vatímetro?

a) La resistencia de la amperimétrica es baja, mientras que la de la voltimétrica es alta.

b) La resistencia de la amperimétrica es alta, mientras que la de la voltimétrica es baja.

c) Aproximadamente igual.

3.10. ¿Cómo se conecta el contador de energía?

a) En derivación con la carga.

b) El circuito voltimétrico en serie y el amperimétrico en paralelo.

c) Exactamente igual que un vatímetro.

© Ediciones Paraninfo

Actividades de ampliación

3.1. En la Figura 3.12 se muestra, a modo de ejemplo, el extracto de una factura de electricidad de una vivienda. Organizarse en grupos de trabajo e investigar diferentes términos que en él se contemplan.

FACTURA	*Lectura anterior* 2.400	*Lectura actual* 2.800	*Consumo* 400 kWh	
Término de potencia	*4,4 kW x 2 meses x 1,824432 €/kW*		16,06	€
Término de energía	*400 kWh x 0,150938 €/kW*		60,38	€
Impto. sobre Electr.	*76,44 € x 0,051127*		3,91	€
Alquiler equipos medida			1,08	€
		Total	81,43	€
IVA	*21 % de 81,43*		17,10	€
		Total Factura	**98,53**	**€**

Figura 3.12. Factura de electricidad.

Consigue la factura de la electricidad de la casa donde vives y averigua la potencia contratada, la energía consumida, el coste del impuesto sobre electricidad y el alquiler de los equipos de medida. ¿Cuál hubiera sido el importe total de esta factura si el consumo de energía hubiese sido de 350 kWh para una potencia contratada de 3,3 kW?

3.2. **Funcionamiento del contador de energía digital.** Consigue un contador digital en el laboratorio de Electrotecnia y con ayuda del profesor, conéctalo a un motor o a unas lámparas eléctricas y comprueba su funcionamiento siguiendo las descripciones aportadas en este apartado. Podrás ampliar el conocimiento sobre las distintas opciones del menú de lectura consultando el manual de funcionamiento del contador digital.

3.3. **Cuarto de contadores.** Consigue la Instrucción Técnica Complementaria para Baja Tensión: ITC-BT-16 Instalaciones de enlace del Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión. Contadores: ubicación y sistemas de instalación. Una vez leída contesta a las siguientes preguntas.

- ¿Qué tipo de protección eléctrica necesitan las derivaciones individuales antes del contador?
- ¿Qué sección mínima deben tener las derivaciones individuales?
- ¿Qué tensión asignada deben tener los conductores de las derivaciones individuales?
- En un edificio destinado a viviendas que posea un número de contadores de 12, ¿es necesario disponer de un local para la ubicación de la concentración de contadores?

A modo de ayuda, en el siguiente texto se muestra un pequeño extracto de la ITC-BT-16:

Los contadores y demás dispositivos para la medida de la energía eléctrica podrán estar ubicados en:

- Módulos (cajas con tapas precintables).
- Paneles.
- Armarios.

Colocación de contadores en forma individual

Esta disposición se utilizará solo cuando se trate de un suministro a un único usuario independiente o a dos usuarios alimentados desde un mismo lugar.

Se hará uso de la caja de protección y medida, de los tipos y características indicados en el **apartado 2** de **ITC-BT-13,** que reúne bajo una misma envolvente los fusibles generales de protección, el contador y el dispositivo para discriminación horaria. En este caso, los fusibles de seguridad coinciden con los generales de protección.

El usuario será responsable del quebrantamiento de los precintos que coloquen los organismos oficiales o las empresas suministradoras, así como de la rotura de cualquiera de los elementos que queden bajo su custodia, cuando el contador esté instalado dentro de su local o vivienda. En el caso de que el contador se instale fuera, será responsable el propietario del edificio.

Colocación en forma concentrada

En el caso de:

- Edificios destinados a viviendas y locales comerciales.
- Edificios comerciales.
- Edificios destinados a una concentración de industrias.

Los contadores y demás dispositivos para la medida de la energía eléctrica de cada uno de los usuarios y de los servicios generales del edificio, podrán concentrarse en uno o varios lugares, para cada uno de los cuales habrá de preverse en el edificio un armario o local adecuado a este fin, donde se colocarán los distintos elementos necesarios para su instalación.

Cuando el número de contadores a instalar sea superior a 16, será obligatoria su ubicación en local, según el **apartado 2.2.1** siguiente.

En función de la naturaleza y número de contadores, así como de las plantas del edificio, la concentración de los contadores se situará de la forma siguiente:

En edificios de hasta 12 plantas se colocarán en la planta baja, entresuelo o primer sótano. En edificios superiores a 12 plantas se podrá concentrar por plantas intermedias, comprendiendo cada concentración los contadores de 6 o más plantas.

© Ediciones Paraninfo

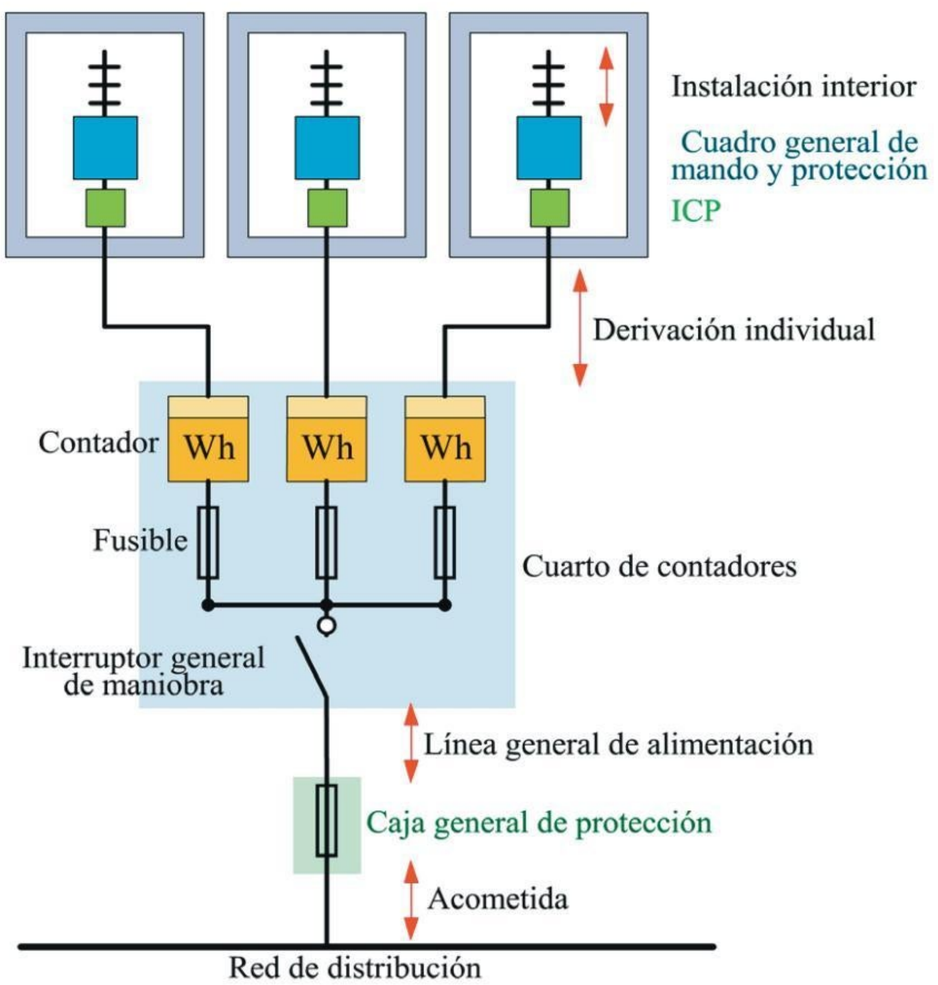


Figura 3.13. Instalación de contadores en forma concentrada.

Colocación de contadores centralizados en un local

Este local que estará dedicado única y exclusivamente a este fin podrá, además, albergar por necesidades de la compañía eléctrica para la gestión de los suministros que parten de la centralización, un equipo de comunicación y adquisición de datos, a instalar por la compañía eléctrica, así como el cuadro general de mando y protección de los servicios comunes del edificio, siempre que las dimensiones reglamentarias lo permitan.

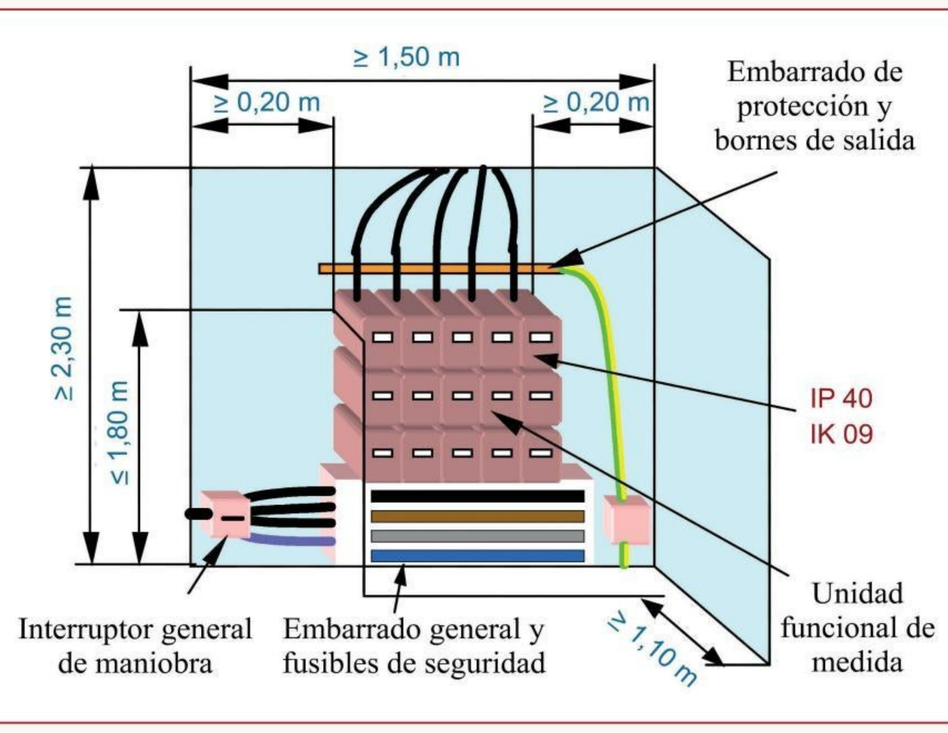


Figura 3.14. Ejemplo de colocación de contadores centralizados en un local.

El local cumplirá las condiciones de protección contra incendios que establece la **CTE-DB-SI** para los locales de riesgo especial bajo. En la Figura 3.15 se muestra un resumen de las condiciones del local para el cuarto de contadores.

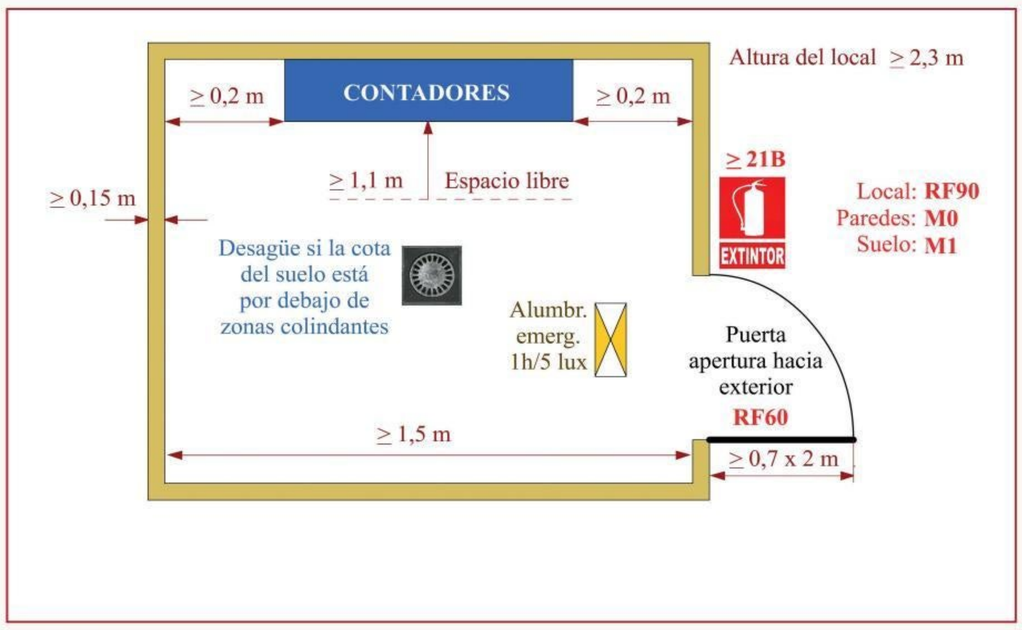


Figura 3.15. Características del local destinado para cuarto de contadores.

Las concentraciones estarán formadas eléctricamente por las siguientes unidades funcionales:

- Unidad funcional de interruptor general de maniobra.
- Unidad funcional de embarrado general y fusibles de seguridad.
- Unidad funcional de medida.
- Unidad funcional de mando (opcional).
- Unidad funcional de embarrado de protección y bornes de salida.
- Unidad funcional de telecomunicaciones (opcional).

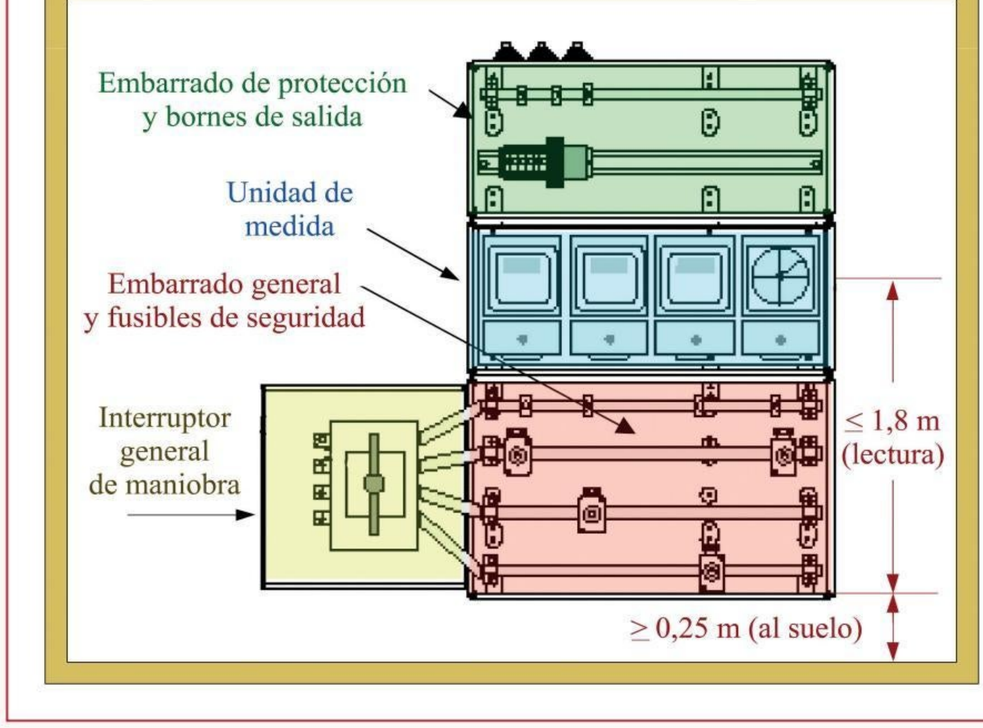
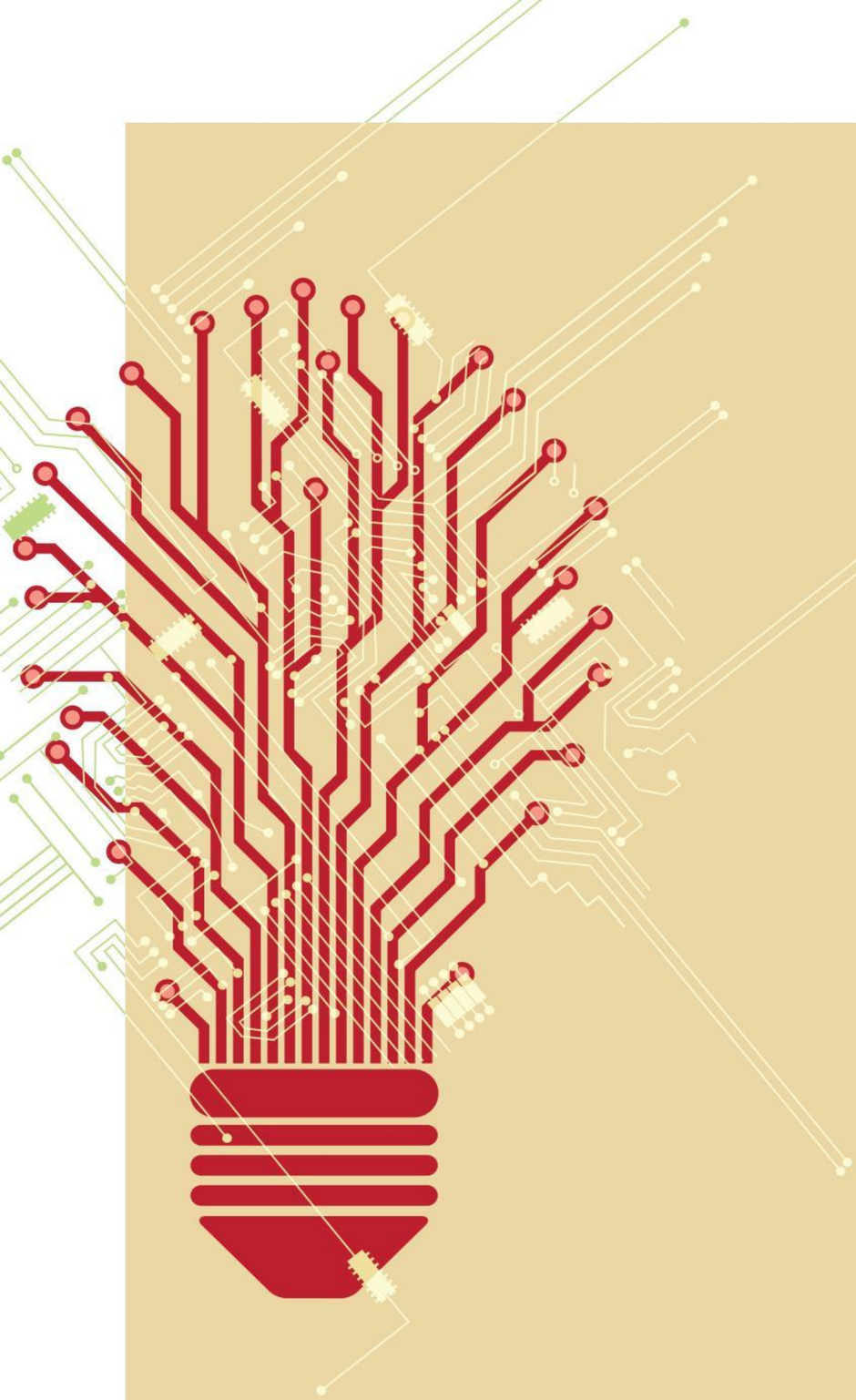


Figura 3.16. Ejemplo de instalación de las unidades funcionales principales de una centralización de contadores.

© Ediciones Paraninfo

4 Efecto térmico de la electricidad



Contenidos

- **4.1.** Efecto Joule
- **4.2.** Calor específico
- **4.3.** Cálculo de la sección de conductores

Cuando la corriente eléctrica fluye por una resistencia eléctrica esta se calienta. El calor producido depende de la energía eléctrica consumida por la misma, es decir, del producto de la potencia por el tiempo. Las aplicaciones del efecto térmico de la electricidad son muy variadas: calefacción, cocinas y hornos, etc. Ahora bien, el efecto térmico también provoca inconvenientes cuando no es deseado, como por ejemplo el calentamiento que se produce en los conductores de las líneas eléctricas cuando son recorridos por corriente. Para evitar que este calentamiento sea excesivo en ellos se aumenta su sección.

Objetivos

- Describir los procesos de conversión de energía eléctrica a calorífica.
- Emplear el calor específico de los cuerpos para determinar la elevación de su temperatura.
- Distinguir los sistemas de transmisión del calor.
- Relacionar el calentamiento de un conductor con la intensidad que fluye por él y su resistencia eléctrica.
- Calcular la sección de un conductor en función de su intensidad máxima admisible.
- Determinar la caída de tensión de las líneas eléctricas y tenerla en cuenta para el cálculo de la sección de los conductores de una línea eléctrica.

4.1. Efecto Joule

Hemos visto que los conductores y las resistencias se calientan cuando son atravesados por una corriente eléctrica. Este fenómeno es también conocido por «efecto Joule».

El físico P. James Joule estudió la relación que existe entre la energía y su transformación plena en calor. A base de experimentar con un calorímetro, llegó a la conclusión de que la energía de 1 julio es equivalente a 0,24 calorías.

$$Q = 0{,}24 \cdot E$$

Q = Calor en calorías.

E = Energía en julios.

De esta manera, si quisiéramos determinar el calor que se produce en una resistencia R en un tiempo determinado t cuando es recorrida por una corriente eléctrica I, tendremos que:

$E = P \cdot t$; a su vez, $P = R \cdot I^2$. Si llevamos estos valores a la primera expresión, tenemos:

$$Q = 0{,}24 \cdot R \cdot I^2 \cdot t$$

Actividad resuelta 4.1

Calcula el calor desprendido por un horno eléctrico de 2.000 W en 5 minutos de funcionamiento.

Solución:

La energía en julios consumida durante ese periodo de tiempo es:

$$E = P \cdot t = 2.000 \cdot 300 = 600.000 \text{ julios}$$

$$t = 5 \cdot 60 = 300 \text{ s}$$

Como cada julio se transforma en 0,24 calorías, tendremos que:

$Q = 0{,}24E = 0{,}24 \cdot 600.000 = 144.000$ calorías = 144 kcal

Actividad resuelta 4.2

Calcula el calor desprendido por un conductor de cobre de 100 m de longitud y 1,5 mm^2 de sección que alimenta un grupo de lámparas de 1.500 W de potencia a una tensión de 230 V durante un día.

Solución:

Primero se calcula la intensidad de corriente que circula por dicho conductor:

$$I = \frac{P}{U} = \frac{1.500}{230} = 6{,}5 \text{ A}$$

Calculemos ahora la resistencia del conductor de la línea:

$$R = \rho \frac{L}{S} = 0{,}01786 \frac{100}{1{,}5} = 1{,}19\ \Omega$$

El calor producido por el conductor, que eleva su temperatura y se contabiliza como energía perdida, es:

$$Q = 0{,}24 \cdot R \cdot I^2 \cdot t = 0{,}24 \cdot 1{,}19 \cdot 6{,}5^2 \cdot 86.400 =$$

$$= 1.042.554 \text{ cal}$$

$$t = 24 \text{ h} \cdot 60 \text{ m} \cdot 60 = 86.400 \text{ s}$$

La energía calorífica desarrollada por una resistencia calefactora o por un conductor cuando es atravesado por una corriente eléctrica tiende a elevar la temperatura de aquel. Esta elevación depende de varios factores, tales como el calor específico de los materiales, su masa, su temperatura, los coeficientes de transmisión por donde se propaga y disipa el calor, etcétera.

4.2. Calor específico

El calor específico de una sustancia es la cantidad de calor que se precisa para aumentar la temperatura en 1 ºC una masa de 1 gramo.

Así, por ejemplo, para elevar la temperatura de un gramo de agua en un grado se necesita una caloría, bastante más que lo que se necesita para hacer lo mismo con un gramo de cobre (0,093 calorías). En la Tabla 4.1 se expone el calor específico de diferentes sustancias, expresado en calorías/gramo · ºC.

Tabla 4.1. Calor específico de diferentes sustancias

Sustancia	Calor específico, cal/g ºC
Cobre	0,093
Acero	0,110
PVC	0,210
Aluminio	0,220
Agua	1

Conociendo el calor específico de una sustancia y su masa es posible calcular la cantidad de calor que es necesario aplicar para elevar su temperatura. Para ello aplicaremos la expresión:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta t^o$$

© Ediciones Paraninfo

Q = Cantidad de calor (calorías).

m = Masa (gramos).

c = Calor específico (cal/g . ºC).

Δt^o = Variación de temperatura.

Actividad resuelta 4.3

Determina el calor necesario para elevar la temperatura de un litro de agua de 20 a 50 ºC.

Solución:

Como 1 litro de agua equivale a 1.000 gramos, el calor específico del agua es 1 y la elevación de temperatura que deseamos conseguir es (50 – 20) = 30 ºC; el calor a aplicar es:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta t^o = 1.000 \cdot 1 \cdot 30 = 30.000 \text{ cal}$$

Actividad resuelta 4.4

Determina la potencia que deberá tener un termo eléctrico de agua para calentar un depósito de 50 litros en 1 hora. El agua entra a 12 ºC y se desea calentarla hasta 60 ºC. Calcula también el valor óhmico de la resistencia de caldeo para una tensión de 230 V (Figura 4.1).



Figura 4.1.

Nota: Para hacer los cálculos no se debe tener en cuenta el calentamiento de la cuba ni de la resistencia calefactora.

Solución:

El calor que debe aportar la resistencia de caldeo es:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta t^o = 50.000 \cdot 1 \cdot (60 - 12) = 2.400.000 \text{ cal}$$

La energía eléctrica necesaria para producir este calor es:

$$Q = 0{,}24\ E, \text{ despejando } E = \frac{Q}{0{,}24} = \frac{2.400.000}{0{,}24} = 10.000.000 \text{ julios}$$

La potencia para desarrollar esta energía en 1 hora (3.600 s) será:

$$P = \frac{E}{t} = \frac{10.000.000}{3.600} = 2.778 \text{ W} = 2{,}8 \text{ kW}$$

La resistencia podemos calcularla así:

$$P = \frac{U^2}{R}\ ; \text{ despejando: } R = \frac{U^2}{P} = \frac{230^2}{2.778} = 19\ \Omega$$

Actividad resuelta 4.5

Averigua cuál será el coste de la energía de la Actividad resuelta 4.4 si el precio del kWh es de 0,088 €.

Solución:

La energía en kWh es:

$$E = P \cdot t = 2{,}8 \cdot 1 = 2{,}8 \text{ kWh}$$

$$\text{Gasto} = 2{,}8 \cdot 0{,}088 = 0{,}25\ €$$

Actividad resuelta 4.6

Determina el aumento de temperatura que experimentará una plancha eléctrica de acero si se la calienta mediante una resistencia de caldeo de 10 ohmios a 125 V durante 10 minutos. La plancha posee una masa de 7 kg y se supone que se pierde un 25 % del calor generado.

Solución:

Calculamos primero el calor generado:

$$Q = 0{,}24 \cdot R \cdot I^2 \cdot t = 0{,}24 \cdot 10 \cdot 12{,}5^2 \cdot 600 = 225.000 \text{ cal}$$

$$I = \frac{U}{R} = \frac{125}{10} = 12{,}5 \text{ A}, \ t = 10 \cdot 60 = 600 \text{ s}$$

El calor transmitido a la plancha será solo el 75 % del total generado:

$$Q = \frac{75}{100} = 225.000 = 168.750 \text{ cal}$$

Como el calor específico del acero es 0,11, el incremento de temperatura será:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta t^o, \text{ despejando:}$$

$$\Delta t^o = \frac{Q}{m \cdot c} = \frac{168.750}{7.000 \cdot 0{,}11} = 219\ ^oC$$

© Ediciones Paraninfo

4.3. Cálculo de la sección de conductores

Uno de los efectos perjudiciales del efecto Joule es el calentamiento que se produce en los conductores eléctricos cuando son recorridos por una corriente eléctrica. Para evitar que este calentamiento alcance valores que sean perjudiciales para los conductores, estos se construyen de diferentes secciones.

Cuanta más intensidad de corriente se prevé que vaya a fluir por un conductor, mayor será su sección.

La sección de un conductor es la superficie que aparece cuando lo cortamos perpendicularmente a su longitud. Por lo general los conductores son cilíndricos, por lo que la sección suele ser un área circular (Figura 4.2). La sección de los conductores se suele expresar en mm^2.



Figura 4.2. Sección de un conductor.

Dado que los conductores no son perfectos y poseen una cierta resistencia eléctrica, cuando son atravesados por una corriente eléctrica se producen dos fenómenos:

- Se calientan y pierden potencia.
- Al estar conectados en serie con los aparatos eléctricos que alimentan, se produce una caída de tensión, que hace que se reduzca apreciablemente la tensión, al final de la línea.

Estos son los dos factores más importantes que hay que tener en cuenta a la hora de seleccionar la sección más adecuada para una instalación eléctrica.

4.3.1. Cálculo de la sección teniendo en cuenta el calentamiento de los conductores

El calor que producen los conductores es proporcional a la potencia P_{PL} que se pierde en ellos. Esta aumenta con la resistencia del conductor (R_L) y con la intensidad de corriente al cuadrado (I^2) que conduce.

$$P_{PL} = R_L \cdot I^2$$

Dado que la resistencia del conductor depende de su sección, si queremos conseguir pérdidas de potencias bajas deberemos aumentar considerablemente su sección.

La potencia perdida en un conductor produce calor que, al acumularse, eleva su temperatura y puede llegar a fundir el aislante del conductor (el plástico que rodea el conductor). Esto puede llegar a ser muy peligroso ya que podrían originarse incendios. Por otro lado, los aislantes, al estar sometidos a estas temperaturas, pierden parte de su capacidad para aislar y envejecen con rapidez, lo que los hace quebradizos y prácticamente inservibles.

Actividad resuelta 4.7

Calcula la potencia que se pierde en un conductor de cobre de 100 m de longitud y 1,5 mm^2 de sección que alimenta un motor eléctrico de 3 kW de potencia a una tensión de 230 V.

Solución:

Primero se calcula la intensidad de corriente que fluye por el conductor:

$$I = \frac{P}{U} = \frac{3.000}{230} = 13 \text{ A}$$

Ahora calcularemos la resistencia del conductor:

$$R = \rho \frac{L}{S} = 0{,}01786 \frac{100}{1{,}5} = 1{,}19\ \Omega$$

Ya podemos calcular la potencia perdida en el conductor que se transforma en calor:

$$P_{PL} = R_L \cdot I^2 = 1{,}19 \cdot 13^2 = 201 \text{ W}$$

Actividad resuelta 4.8

¿Cuál sería la pérdida de potencia si aumentamos la sección de los conductores de la Actividad resuelta 4.7 a 4 mm^2?

Solución:

$$P_{PL} = \ldots = 75{,}5 \text{ W}$$

Está claro que al aumentar la sección del conductor disminuye la pérdida de potencia y, por tanto, el calor producido por aquel.

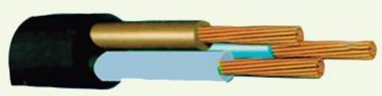
El calentamiento de un conductor, entre otros factores, depende de la intensidad de corriente que circule por él. Luego, cuanto mayor sea la corriente que circula por un conductor, mayor tendrá que ser la sección de este para que no se caliente excesivamente.

Dado que el calor se va a concentrar más en un conductor instalado bajo tubo que en un conductor instalado al aire, también habrá que tener en cuenta, a la hora de determinar la sección, la forma de instalar los conductores. Por el mismo

© Ediciones Paraninfo

razonamiento, también hay que tener en cuenta la forma de agrupación de los conductores (Tabla 4.2).

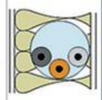
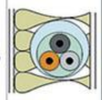
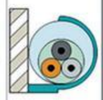
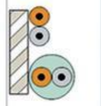
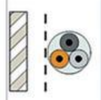
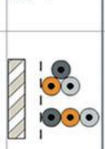
Tabla 4.2. Conductores agrupados

	Conductores aislados unipolares: línea formada por conductores separados.
	Cable bipolar (multipolar 2x): línea formada por dos conductores unidos por material aislante.
	Cable tripolar (multipolar 3x): línea formada por tres conductores unidos por material aislante. 

Son los fabricantes de conductores eléctricos los que tienen que indicar la intensidad que soportan estos (intensidad máxima admisible) en función de las condiciones de instalación. Pero, con el fin de aumentar la seguridad de las instalaciones eléctricas, el *Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión* (*REBT*) nos dicta las normas a seguir para el cálculo de las secciones, facilitando diferentes tablas de consulta que ayudan a dicho cálculo.

En la Tabla 4.3 se indican las intensidades admisibles para cables de cobre a una temperatura ambiente del aire de 40 ºC y para distintos métodos de instalación, agrupamientos y tipos de cables. Esta tabla es un resumen de la Norma UNE-HD 60364-5-52, que data de diciembre de 2014. Para otras temperaturas, métodos de instalación, agrupamientos

Tabla 4.3. Intensidades admisibles (A) para conductores de cobre con una temperatura ambiente de 40 ºC

Método de instalación			Número de conductores cargados y tipo de aislamiento																	
A1		Conductores aislados en un conducto en una pared térmicamente aislante		PVC 3		PVC 2		XLPE 3		XLPE 2										
A2		Cable multipolares en un conducto en una pared térmicamente aislante	PVC 3	PVC 2			XLPE 3		XLPE 2											
B1		Conductores aislados en un conducto sobre una pared de mampostería (1)				PVC 3		PVC 2					XLPE 3				XLPE 2			
B2		Cable multipolar un conducto sobre una pared de mampostería (1)			PVC 3	PVC 2					XLPE 3		XLPE 2							
C		Cables unipolares o multipolares sobre una pared de mampostería (2)						PVC 3				PVC 2			XLPE 3			XLPE 2		
E		Cables multiconductores al aire libre(3). Distancia a la pared no inferior a 0,3*D*								PVC 3				PVC 2			XLPE 3		XLPE 2	
F		Cables unipolares en contacto al aire libre(3). Distancia al muro no inferior a *D* *D* es el diámetro del cable									PVC 3				PVC 2		XLPE 3		XLPE 2	
		Sección mm²	2	3	4	5a	5b	6a	6b	7a	7b	8a	8b	9a	9b	10a	10b	11	12	13
			INTENSIDADES MÁXIMAS ADMISIBLES (A)																	
	COBRE	1,5	11	11,5	12,5	13,5	14	14,5	15,5	16	16,5	17	17,5	19	20	20	20	21	23	—
		2,5	15	15,5	17	18	19	20	20	21	22	23	24	26	27	26	28	30	32	—
		4	20	20	22	24	25	26	28	29	30	31	32	34	36	36	38	40	44	—
		6	25	26	29	31	32	34	36	37	39	40	41	44	46	46	49	52	57	—
		10	33	36	40	43	45	46	49	52	54	54	57	60	63	65	68	72	78	—
		16	45	48	53	59	61	63	66	69	72	73	77	81	85	87	91	97	104	—
		25	59	63	69	77	80	82	86	87	91	95	100	103	108	110	115	122	135	146
		35	—	—	—	95	100	101	106	109	114	119	124	127	133	137	143	153	168	182
		50	—	—	—	116	121	122	128	133	139	145	151	155	162	167	174	188	204	220
		70	—	—	—	148	155	155	162	170	178	185	193	199	208	214	223	243	262	282
		95	—	—	—	180	188	187	196	207	216	224	234	241	252	259	271	298	320	343
		120	—	—	—	207	217	216	226	240	251	260	272	280	293	301	314	350	373	397
		150	—	—	—	—	—	247	259	276	289	299	313	322	337	343	359	401	430	458
		185	—	—	—	—	—	281	294	314	329	341	356	368	385	391	409	460	493	523
		240	—	—	—	—	—	330	345	368	385	401	419	435	455	468	489	545	583	617

(1) Incluyendo tubos en montaje superficial y empotrado en obra, canales para instalaciones, canaletas, huecos de construcción y canales de obra.

(2) Incluyendo en bandeja no perforada

(3) Incluyendo bandeja perforada, sobre escalera de cables y sobre abrazaderas o rejillas

PVC2 = línea formada por dos conductores unipolares o un cable bipolar, aislados con policloruro de vinilo
PVC3 = línea formada por tres conductores unipolares o un cable tripolar, aislados con policloruro de vinilo
XLPE2 = línea formada por dos conductores unipolares o un cable bipolar, aislados con polietileno reticulado (XLPE) o etileno propileno (EPR)
XLPE3 = línea formada por tres conductores unipolares o un cable tripolar, aislados con polietileno reticulado (XLPE) o etileno propileno (EPR)

© Ediciones Paraninfo

y tipos de cable, así como para conductores enterrados, es necesario consultar de forma directa dicha Norma.

En la Instrucción Técnica Complementaria ITC-BT 19 del REBT se indican las normas a seguir para el cálculo de secciones de conductores en instalaciones interiores o receptoras. Si consultas dicha ITC en el REBT, observarás que la tabla que aparece en el texto reglamentario sobre las intensidades admisibles difiere un poco de la que aquí se expone. Eso es debido a que el REBT todavía no se ha actualizado al contenido de la nueva Norma UNE-HD 60364-5-52 que desde el año 2015 sustituye a la Norma UNE 20460-5-23 (que es la que figura en el texto del Reglamento).

Actividad resuelta 4.9

¿Cuál será la intensidad máxima que podrán conducir los conductores de una línea bipolar aislada con PVC instalada directamente sobre la pared si su sección es de 10 mm^2? ¿Y si se instala bajo tubo empotrado en obra?

Solución:

Consultando la Tabla 4.3:

Para «cables multiconductores directamente sobre la pared» (fila C) «PVC 2» nos encontramos en la columna 8a, que nos indica que para una sección de 10 mm^2 la intensidad máxima admisible para este conductor es de 54 A.

Para «cables multiconductores en tubos empotrados en obra» (fila B2) «PVC 2» nos encontramos en la columna 5a, que nos indica que para una sección de 10 mm^2 la intensidad máxima es de 43 A.

Actividad resuelta 4.10

Para la alimentación eléctrica de un horno se utiliza una línea formada por dos conductores unipolares aislados con polietileno reticulado (XLPE) instalados bajo tubo en pared aislante. Calcula la sección de los conductores si la corriente que absorbe el horno es de 25 A.

Solución:

Consultando la Tabla 4.3, para «conductores aislados en tubos empotrados en paredes aislantes» (fila A1) «XLPE 2» nos encontramos en la columna 7a, que nos indica que un conductor de 4 mm^2 sería suficiente ya que posee una intensidad máxima admisible de 29 A.

Actividad propuesta 4.1

Consigue el Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión y extrae todas aquellas tablas que se utilicen para determinar la intensidad máxima admisible de los conductores eléctricos para diferentes tipos de instalaciones.

Consulta en el REBT las Instrucciones Técnicas Complementarias: ITC-BT 06 (Redes aéreas para distribución en baja tensión), ITC-BT 07 (Redes subterráneas para distribución en baja tensión, e ITC-BT 19 (Instalaciones interiores o receptoras).

4.3.2. Densidad de corriente de un conductor

La densidad de corriente de un conductor nos indica los amperios por milímetro cuadrado que circulan por él:

$$\delta = \frac{I}{S} \text{ en A/mm}^2$$

La densidad de corriente del conductor de la Actividad resuelta 4.10 sería, entonces:

$$\delta = \frac{I}{S} = \frac{25}{4} = 6{,}25 \text{ A/mm}^2$$

La densidad de corriente admisible por un conductor depende de las condiciones de instalación, tipo de cable y sección del conductor (según aumenta la sección, el calor se disipa peor y la densidad admisible disminuye).

4.3.3. Por qué se emplean altas tensiones en el transporte de energía eléctrica

Veamos un ejemplo. Deseamos generar y transportar por una línea eléctrica una pequeña potencia de 1.000 W. ¿Qué tensión utilizaremos? Estudiaremos dos casos extremos:

- Con una tensión de 1.000 V:

$$I_1 = \frac{P}{U_1} = \frac{1.000}{1.000} = 1 \text{ A}$$

Con una tensión de 1 V:

$$I_2 = \frac{P}{U_2} = \frac{1.000}{1} = 1.000 \text{ A}$$

Queda claro con este ejemplo que al aumentar la tensión reducimos la intensidad y, por tanto, la sección de los conductores podrá ser más reducida. A su vez, se reducen las pérdidas caloríficas en los conductores ($P_{PL} = R_L I^2$).

© Ediciones Paraninfo

Tampoco conviene utilizar tensiones demasiado elevadas, ya que esto trae también consigo un encarecimiento de los aislantes (torres más altas, cables más separados, aislantes más perfectos, inclusión de sofisticados sistemas de seguridad, etc.). En general se busca un equilibrio entre la potencia a transportar, la tensión a utilizar y la intensidad de la línea. La solución que resulte más económica es la que se empleará.

4.3.4. Caída de tensión en las líneas eléctricas

Seguro que habrás podido observar cómo en ciertas ocasiones la luz que emiten las lámparas eléctricas que están conectadas a la red eléctrica disminuye durante un breve periodo de tiempo su luminosidad.

Estos fenómenos son debidos a que las líneas producen una cierta pérdida de tensión.

Como todos sabemos, las líneas que transportan la energía eléctrica están compuestas por conductores eléctricos de una cierta resistencia que, al ser recorridos por una corriente eléctrica, se calientan y, por tanto, producen una pérdida de potencia. Pues bien, también hay que pensar que los conductores de las líneas están conectados en serie con los receptores, y que al ser recorridos por la corriente ocasionan una caída de tensión. De tal forma que la tensión que le llega al receptor es menor que la que existe al principio de la línea.

Actividad resuelta 4.11

Se desea suministrar energía eléctrica a un motor de 10 kW a 230 V. Para ello, se tiende una línea de cobre de 6 mm^2 de sección desde un transformador de distribución situado a 75 m (Figura 4.3). Calcula: **a)** la resistencia de la línea; **b)** la intensidad del circuito; **c)** la caída de tensión en la línea; **d)** la tensión que tiene que suministrar el transformador; **e)** la potencia perdida en la línea.

Solución:

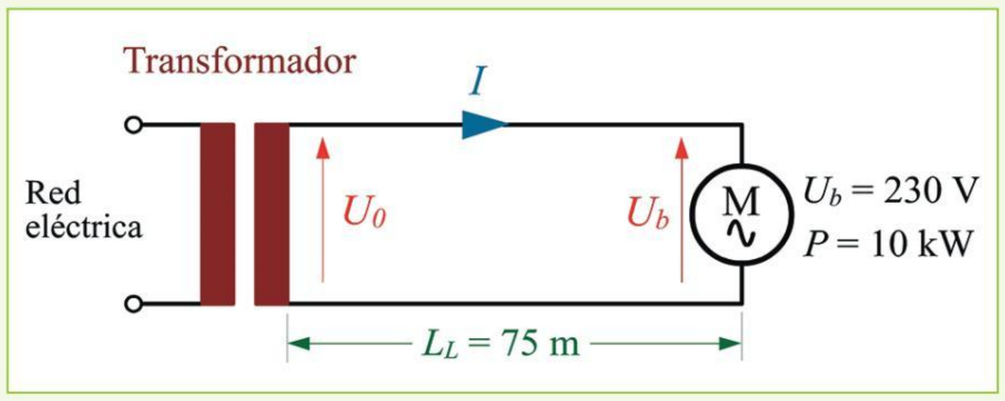


Figura 4.3.

a) Para calcular la resistencia de la línea hay que tener en cuenta que la longitud total del conductor son 75 + 75 = 150 m (conductor de ida + conductor de vuelta).

$$R_L = \rho \frac{L}{S} = 0{,}01786 \frac{150}{6} = 0{,}447\ \Omega$$

Esta resistencia la podemos representar como si estuviese concentrada en un punto de la línea (Figura 4.4).

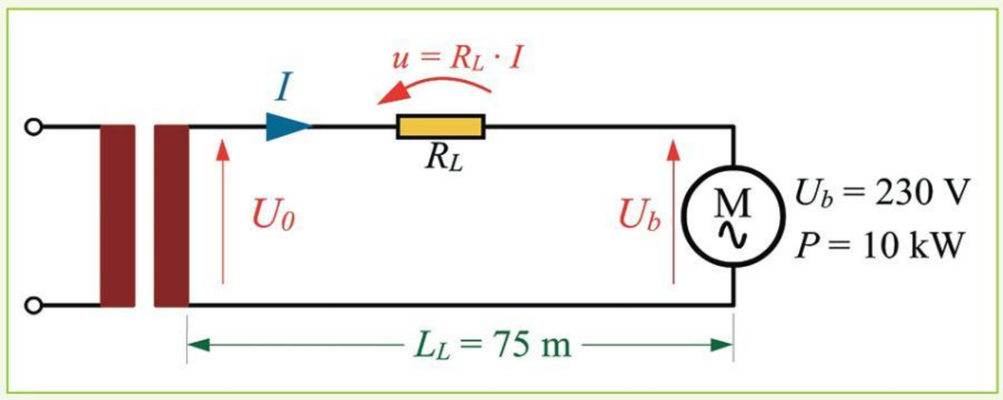


Figura 4.4.

b) La intensidad de la línea es:

$$I = \frac{P}{U} = \frac{10.000}{230} = 43{,}48\ \text{A}$$

c) La caída de tensión u la calculamos aplicando la ley de Ohm entre los terminales de la hipotética resistencia de línea R_L cuando es recorrida por la intensidad I.

$$u = R_L \cdot I = 0{,}447 \cdot 43{,}48 = 19{,}4\ \text{V}$$

A veces, conviene expresar este resultado en tantos por ciento referidos a la tensión de alimentación. En nuestro caso:

$$u\ \% = \frac{19{,}4}{230} \cdot 100 = 8{,}4\ \%$$

Si aplicásemos las normas contempladas en el Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión (REBT), habría que aumentar la sección de los conductores de la línea, ya que este porcentaje de caída de tensión es en cualquier caso inadmisible. El porcentaje máximo que se suele admitir para instalaciones de BT entre el origen de estas y cualquier punto de consumo es del 3 % del valor nominal para circuitos de alumbrado, y del 5 % para los demás usos (contrasta lo indicado con la Instrucción Técnica Complementaria ITC-BT-19 Apartado 2.2.2).

d) La tensión en el transformador es (Figura 4.5):

$$U_0 = U_b + u = 230 + 19{,}4 = 249{,}4\ \text{V}$$

e) La potencia que se pierde en la línea la calculamos con la expresión:

$$P_{PL} = R_L \,.\, I^2 = 0{,}447 \,.\, 43{,}48^2 = 845\ \text{W}$$

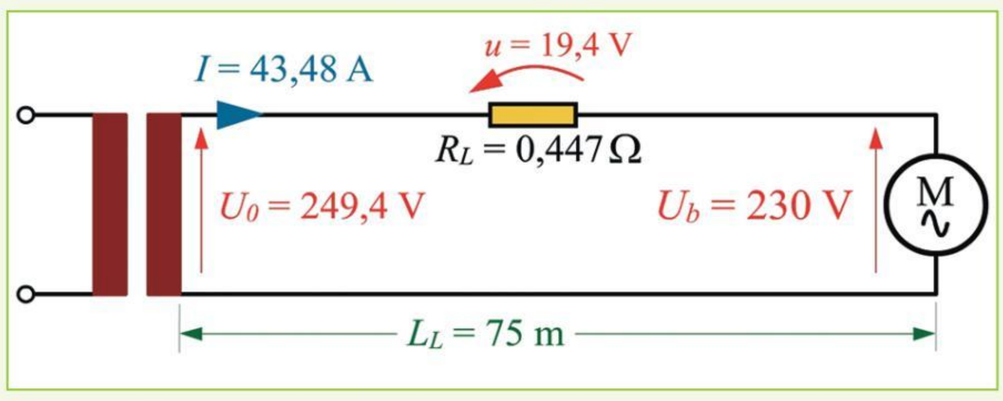


Figura 4.5.

© Ediciones Paraninfo

4.3.5. Cálculo de la sección teniendo en cuenta la caída de tensión

La caída de tensión en las líneas puede llegar a ser un problema para el correcto funcionamiento de los receptores, ya que estos están diseñados para trabajar a una cierta tensión. Una tensión más baja puede impedir el arranque de un motor, el encendido de un tubo fluorescente, etc. Por todo ello, la caída de tensión no puede exceder de unos límites prefijados en el REBT para cada caso. De esta forma, no solo habrá que tener en cuenta el calentamiento del conductor para determinar su sección, sino que también será necesario no sobrepasar el porcentaje de caída de tensión prefijado en el REBT.

Actividad resuelta 4.12

Calcula la sección que le correspondería a una línea compuesta por dos conductores de cobre unipolares instalados bajo tubo empotrado en obra y aislados con PVC de 100 metros de longitud, que alimenta a un taller de 15 kW/400 V, si la caída máxima de tensión que se admite es del 1 % de la de alimentación (Figura 4.6).

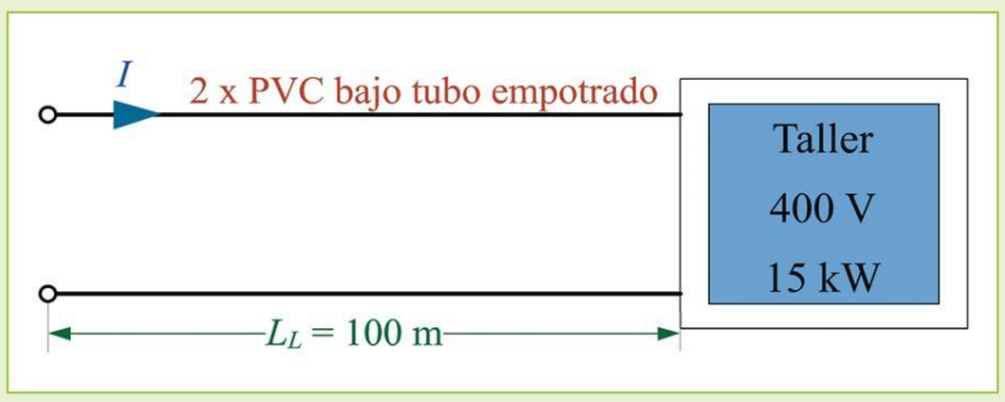


Figura 4.6.

Solución:

Primero calculamos la intensidad:

$$I = \frac{P}{U} = \frac{15.000}{400} = 37{,}5 \text{ A}$$

La caída de tensión en voltios la calculamos así:

$$u = \frac{400}{100} 1\ \% = 4 \text{ V}$$

Ahora, vamos a encontrar la relación que existe entre la sección del conductor y esta caída de tensión:

$u = R_L\, I$, sustituimos R_L por su expresión general:

$u = \rho \frac{L}{S} I$, despejando la sección:

$$S = \rho \frac{L}{u} I = 0{,}01786 \frac{2 \cdot 100}{4} 37{,}5 = 33{,}5 \text{ mm}^2$$

La sección comercial que le corresponde es de 35 mm^2. Ahora comprobamos la intensidad máxima que admite este conductor según la Tabla 4.3: dos conductores unipolares instalados bajo tubo empotrado en obra y aislados con PVC de 35 mm^2 admiten una intensidad de 101 amperios sin calentarse excesivamente. Como la intensidad de la línea es inferior (37,5 A), damos como válido el resultado de 35 mm^2 (Figura 4.7).

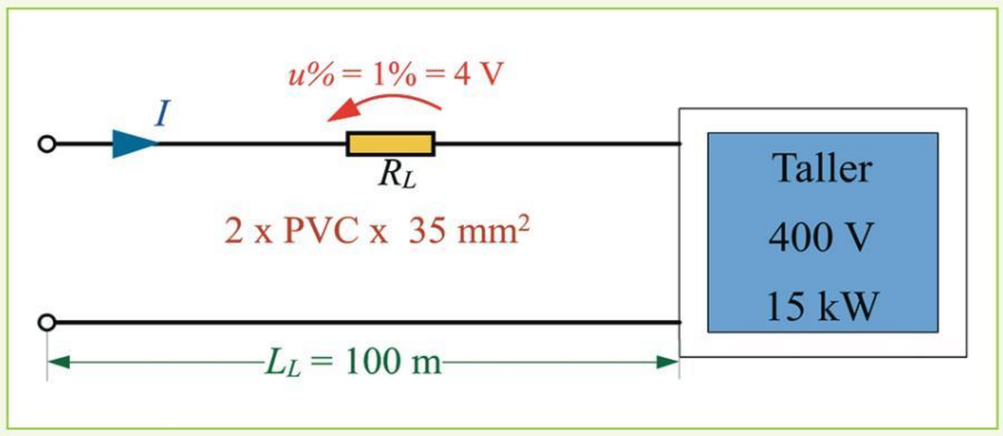


Figura 4.7.

En el caso de que el conductor tuviese una intensidad máxima admisible inferior a la que circula por la línea, habría que tomar una sección superior, predominando en este caso el cálculo de la sección por calentamiento de los conductores al cálculo por caída de tensión.

¿Qué sección le correspondería a esta línea si no se tuviese en cuenta la caída de tensión de la misma?... $S = 10$ mm^2.

En resumen, siempre que necesitemos determinar la sección de un conductor emplearemos la siguiente expresión:

$$S = \rho \frac{2L_L}{u} I$$

ρ = Resistividad del conductor ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$).

u = Caída de tensión máxima en la línea (V).

L_L = Distancia de la carga al punto de alimentación (m).

I = Intensidad por la línea (A).

S = Sección del conductor de la línea (mm^2).

Para concluir, recuérdese que para calcular la sección de los conductores de una línea hay que tener en cuenta dos aspectos fundamentales:

a) La caída de tensión máxima permitida.

b) La corriente máxima admitida por el conductor en función de su tipo e instalación (para evitar sobrecalentamientos).

Cuando se trata de líneas de corta longitud, la caída de tensión es pequeña y, por tanto, predominará en el cálculo la sección determinada mediante la corriente admisible. Para líneas más largas, la caída de tensión se hace considerable y, por lo general, es la que exige una sección mayor en el cálculo.

© Ediciones Paraninfo

Actividad resuelta 4.13

Determina la sección de los conductores de una línea compuesta por un cable bipolar de cobre y aislado con PVC e instalado bajo conducto en pared aislante que alimenta una vivienda unifamiliar mediante paneles fotovoltaicos. La longitud de la línea es de 8 m y se admite una caída de tensión del 4 %. La carga prevista es de 2 kW a 24 V.

Solución:

Primero calculamos la intensidad:

$$I = \frac{P}{U} = \frac{2.000}{24} = 83 \text{ A}$$

La caída de tensión máxima que se permite en voltios es:

$$u = \frac{24}{100} \cdot 4\ \% = 0{,}96 \text{ V}$$

La sección necesaria para no superar esta caída es:

$$S = \rho \frac{2L_L}{u} I = 0{,}01786 \frac{2 \cdot 8}{0{,}96} 83 = 24{,}7 \text{ mm}^2$$

La sección comercial que se fabrica es la superior: 25 mm^2.

Al comprobar la intensidad admisible en la Tabla 4.3 observamos que este conductor admite 63 A. Dado que la intensidad nominal que va a transcurrir por él es de 83 A, habrá que aumentar la sección hasta 50 mm^2 para que no se caliente excesivamente.

4.3.6. Cálculo de la sección teniendo en cuenta la norma UNE-HD 60364-5-52

Esta norma nos indica que hay que tener en cuenta la resistividad o conductividad del material conductor a utilizar, en las peores condiciones de temperatura que pueda trabajar.

Según esta norma las temperaturas máximas de servicio para los conductores que aparecen en la Tabla 4.3 de intensidades máximas admisibles son:

- 70 ºC para los conductores aislados con PVC.
- 90 ºC para los conductores aislados con XLPE o EPR.

Hay que tener en cuenta que, si los conductores operan a temperaturas por encima de los 20 ºC, su resistividad se verá aumentada en función del coeficiente de temperatura correspondiente, lo que da como resultado una sección mayor en el cálculo por caída de tensión.

Así, por ejemplo, para el caso de un conductor de cobre aislado con XLPE o EPR, la resistividad a 90 ºC la calcularíamos como sigue:

$$\rho_{90\,^\circ\text{C}} = \rho_{20\,^\circ\text{C}} (1 + \alpha \Delta t^\circ) = 0{,}01786[1 + 0{,}0039(90 - 20)] =$$
$$= 0{,}02274\ \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$$

En el caso de que el conductor fuese de cobre y estuviese aislado con PVC, la resistividad a 70 ºC la calcularíamos así:

$$\rho_{70\,^\circ\text{C}} = \rho_{20\,^\circ\text{C}} (1 + \alpha \Delta t^\circ) = 0{,}01786[1 + 0{,}0039(70 - 20)] =$$
$$= 0{,}02134\ \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$$

Actividad resuelta 4.14

Calcula la sección de los conductores de la línea de la Actividad resuelta 4.12, teniendo en cuenta la norma UNE 20460-5-523.

Solución:

Lo que hacemos es tener en cuenta que para un conductor de cobre aislado con PVC, la resistividad a 70 ºC es de 0,02134 $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$.

$$S = \rho \frac{2L_L}{u} I = 0{,}02134 \frac{2 \cdot 100}{4} 37{,}5 = 40 \text{ mm}^2$$

La sección comercial que se fabrica es la superior: 50 mm^2.

Observamos cómo en este caso al aplicar la norma UNE-HD 60364-5-52 la sección final de los conductores calculada es mayor que en el caso de no haberla aplicado (en la Actividad resuelta 4.12 el resultado fue de 35 mm^2).

4.3.7. Cálculo de la sección de conductores teniendo en cuenta la conductividad

Es muy habitual encontrar el término de la conductividad en las expresiones de cálculo de la sección de conductores por caída de tensión. La conductividad suele ser un número entero que da mayor precisión al cálculo.

$$S = \rho \frac{2L_L}{u} I = \frac{2L_L}{\gamma u} I$$

En la Tabla 4.4 se ha calculado la conductividad que poseerían los conductores para diferentes temperaturas con la idea de tener en cuenta estos resultados a la hora de aplicar la norma UNE-HD 60364-5-52.

Tabla 4.4.

	Cobre	Aluminio	
$\gamma_{20\,^\circ\text{C}}$	56	35	
$\gamma_{70\,^\circ\text{C}}$	48	30	PVC
$\gamma_{90\,^\circ\text{C}}$	44	28	XLPE EPR

© Ediciones Paraninfo

Actividad resuelta 4.15

Calcula la sección de los conductores de una línea eléctrica que alimenta a un grupo de lámparas de 4.000 W a 230 V. La línea posee una longitud de 110 m y consta de un cable bipolar de cobre aislado con PVC instalado directamente sobre la pared. La caída de tensión máxima que se admite es del 0,5 %. Calcula la sección para el caso de que el conductor esté aislado con XLPE.

Solución:

Calculamos la intensidad:

$$I = \frac{P}{U} = \frac{4.000}{230} = 17{,}4 \text{ A}$$

La caída de tensión máxima que se permite en voltios es:

$$u = \frac{230}{100}\ 0{,}5\ \% = 1{,}15 \text{ V}$$

La sección necesaria para no superar esta caída en el conductor aislado con PVC es:

$$S = \frac{2L_L}{\gamma_{70\,°C} \cdot u}\ I = \frac{2 \cdot 110}{48 \cdot 1{,}15}\ 17{,}4 = 69 \text{ mm}^2$$

La sección comercial que se fabrica es la superior: 70 mm^2.

Al comprobar la intensidad admisible en la Tabla 4.3 observamos que este conductor admite 185 A.

En el caso de que el conductor estuviese aislado con XLPE:

$$S = \frac{2L_L}{\gamma_{90\,°C} \cdot u}\ I = \frac{2 \cdot 110}{44 \cdot 1{,}15}\ 17{,}4 = 75 \text{ mm}^2$$

La sección comercial que se fabrica es la superior: 95 mm^2.

En este ejemplo hemos comprobado cómo puede llegar a influir la temperatura de funcionamiento del conductor en el cálculo de la sección de conductores por caída de tensión. De tal forma que si utilizamos un conductor con aislamiento de XLPE tendremos que utilizar un conductor de 95 mm^2 de sección, mientras que si hubiéramos utilizado conductores aislados con PVC, la sección de estos sería de 70 mm^2.

4.3.8. La caída de tensión según el Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión

En el REBT se pueden consultar las caídas de tensión máximas admitidas según el tipo de instalación. En la Tabla 4.6 se expone un extracto de las más significativas.

Como ejemplo, y para entender mejor los datos de la Tabla 4.6, en la Figura 4.8 se muestra el esquema eléctrico de la instalación de enlace de un edificio de viviendas con los contadores totalmente centralizados.

Actividad propuesta 4.2

Calcula la sección de los conductores de cobre de las líneas para las instalaciones interiores que aparecen en la Tabla 4.5 (aplicar en todos los casos la norma UNE-HD 60364-5-52).

Tabla 4.5.

Ejerc.	P (kW)	U (V)	u (%)	L_L (m)	Instalación	Conduc.
1.º	2	230	1	10	Unipolares bajo tubo en montaje superficial	PVC 2
2.º	6	400	2	50	Multipolar en bandeja perforada	XLPE 2
3.º	9	230	5	30	Unipolares bajo tubo empotrado en pared aislante	EPR 2
4.º	2,5	100	1,5	15	Multipolar bajo tubo empotrado en obra	PVC 2
5.º	3	400	3	100	Multipolar directamente sobre la pared	XLPE 2

La solución a esta Actividad propuesta la puedes encontrar dentro del MATERIAL WEB elaborado para este texto.

© Ediciones Paraninfo

Tabla 4.6. Caída de tensión admisible para líneas de alimentación según el tipo de instalación

Instalación de los contadores	Instalaciones de enlace		Instalación interior		
	Línea general de alimentación	Derivación individual	Viviendas	Otras instalaciones	
				Alumbrado	Otros usos
Para un solo usuario	No existe línea general de alimentación	1,5 %	3 %	3 %	5 %
Para dos usuarios alimentados desde el mismo lugar					
Contadores totalmente centralizados	0,5 %	1 %			
Contadores centralizados en más de un lugar	1 %	0,5 %			
TOTAL en el conjunto de la instalación	1,5 %		4,5 %	4,5 %	6,5 %

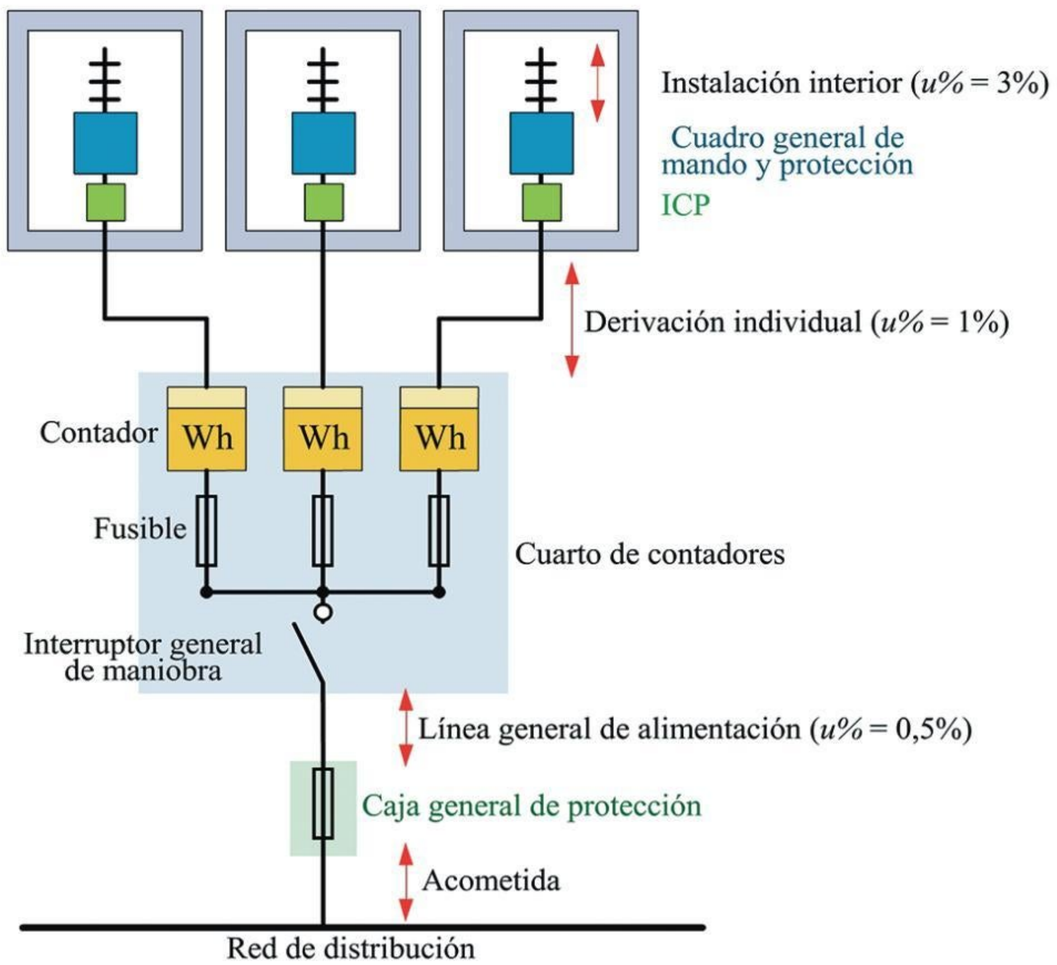


Figura 4.8. Esquema eléctrico unifilar de las instalaciones de enlace de un edificio de viviendas.

Actividad propuesta 4.3

Suponiendo que las instalaciones de enlace de un edificio de viviendas son de C.C. *(lo habitual es que el suministro sea de C.A., por lo que las fórmulas empleadas para calcular la intensidad de corriente y de la sección por caída de tensión serían algo diferentes. Estos cálculos se realizarán en las Unidades 13, 14 y 15)*, calcular la sección de los conductores de las derivaciones individuales de un edificio con viviendas de grado de electrificación básica según el esquema de la Figura 4.9. Los conductores empleados son multipolares de polietileno reticulado en montaje empotrado y los contadores están totalmente centralizados.

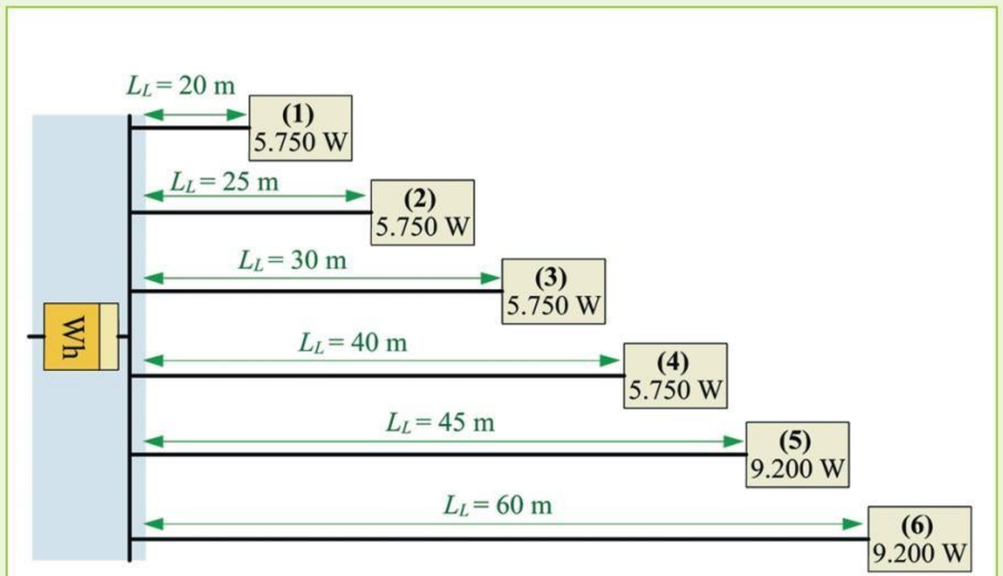


Figura 4.9.

Para resolver este ejemplo se ha tenido en cuenta la Instrucción Técnica Complementaria **ITC-BT-15** del REBT que indica que la sección mínima será de 6 mm^2 para este tipo de instalación.

La solución a esta Actividad propuesta la puedes encontrar dentro del MATERIAL WEB elaborado para este texto.

© Ediciones Paraninfo

Actividades de comprobación

4.1. Suponiendo dos conductores de la misma masa, uno de cobre y otro de aluminio, que al ser recorridos por una corriente eléctrica se calientan, ¿en cuál de los dos conductores se elevará más la temperatura?

a) Toman los dos la misma temperatura, por tener la misma masa.

b) El cobre, por poseer un menor calor específico.

c) El aluminio, por poseer un mayor calor específico.

4.2. Una plancha eléctrica basa su funcionamiento en la transmisión de calor por:

a) Radiación.

b) Convección.

c) Conducción.

4.3. Calcula el calor generado por un termo eléctrico de características 2.000 W/230 V durante 2 horas de funcionamiento.

4.4. Calcula el tiempo aproximado que hay que tener conectada la resistencia calefactora de un calentador eléctrico de agua sanitaria de 3.500 vatios de potencia, si la capacidad de su depósito es de 75 litros y el agua se calienta de 10 °C a 50 °C.

4.5. Un termo eléctrico de 1.500 W tarda en calentar 40 litros de agua una hora y media. Determina el rendimiento del dispositivo si el agua entra a 12 °C y sale a 55 °C.

4.6. Si se consiguiese fabricar un material superconductor a la temperatura ambiente, ¿de qué forma afectaría a la instalación de líneas eléctricas?

a) La ausencia de resistencia en el conductor provocaría un calentamiento inferior en los conductores.

b) No los afectaría en absoluto.

c) No serían necesarias las redes de alta tensión para el transporte de electricidad.

4.7. Con la ayuda de la Tabla 4.3, comprueba la densidad de corriente admisible para todas las secciones correspondientes a conductores de 4 mm^2 en diferentes formas de instalación y agrupación de conductores.

4.8. Se necesita instalar una motobomba de 6 kW a 230 V. Para ello, se tiende una línea bajo tubo en pared aislante, consistente en dos cables unipolares.

¿Cuál será la sección de los conductores, como mínimo, si estos son de cobre aislados con PVC? Averigua también la densidad de corriente del conductor (se supone que la longitud de este es muy corta, por lo que se prescinde de la caída de tensión).

** *Para calcular la sección de los conductores de las Actividades de comprobación 4.8, 4.9, 4.10, 4.11 y 4.12, téngase en cuenta la aplicación de la norma UNE-HD 60364-5-52.*

4.9. ¿Cuál sería la sección del conductor y la densidad de corriente si para instalar la motobomba de la actividad anterior optamos por realizar la instalación mediante un cable bipolar instalado directamente en la pared?

4.10. La potencia máxima que se espera que pueda consumir una cocina eléctrica de uso doméstico es de unos 5.000 W. Sabiendo esto, calcula la sección de los conductores del circuito que la alimenta, teniendo en cuenta que está conectada a una red de 230 V y que los conductores son unipolares de cobre aislados con PVC y que están instalados bajo tubo empotrado en obra.

4.11. Un local posee una instalación de 20 puntos de luz de 100 W cada uno a una tensión de 230 V. Se quiere alimentar a través de una línea de cobre bipolar de 75 metros de longitud instalada al aire y aislada con PVC. Determina la sección más recomendable para que la caída máxima de tensión no supere el 3 % de la de alimentación. ¿Cuál será la densidad de corriente del conductor?

4.12. La instalación de un pequeño taller se compone de los siguientes receptores: dos motores de C.C. de 4 kW cada uno, 20 puntos de luz de 100 W cada uno y cinco calefactores de 1,5 kW cada uno. La tensión de alimentación es de 400 V (Figura 4.10). Averigua la sección de los conductores de la línea general si esta se compone de un cable bipolar de PVC instalado bajo tubo empotrado en obra y se admite una caída de tensión máxima del 4 % de la de alimentación. La longitud de la línea es de 100 m.

El esquema de la Figura 4.10 es del tipo unifilar. El trazo representa a la línea y el número de conductores de esta se representa por unas rayitas cruzadas (como en nuestro caso la línea tiene dos conductores: //).

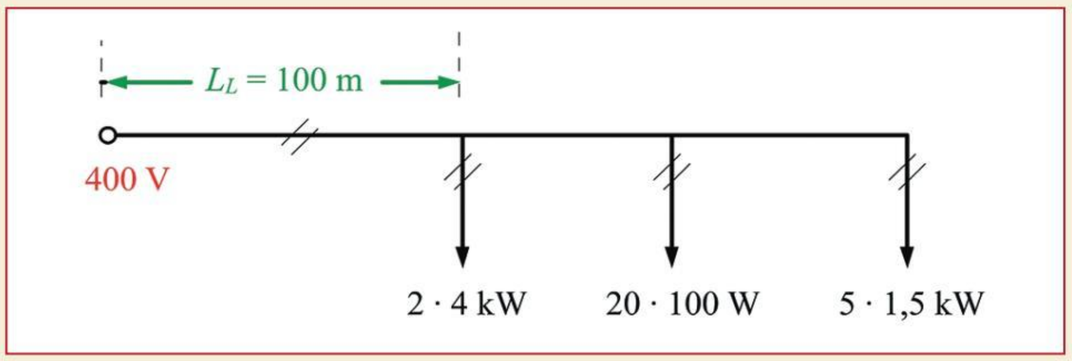


Figura 4.10.

© Ediciones Paraninfo

Actividades de evaluación resueltas

A continuación se dan los enunciados de una serie de actividades de evaluación. Estas actividades las podrás encontrar resueltas accediendo al MATERIAL WEB creado para este texto.

4.1. Un generador de corriente continua alimenta una instalación que absorbe 20 kW a una tensión de 400 V mediante un línea bifilar. La línea tiene una longitud de 300 m y la sección del conductor 20 mm^2. Sabiendo que la resistividad del conductor es $\rho = 0{,}017\ \Omega \cdot mm^2/m$, halla:

a) Resistencia que presenta la línea de alimentación.

b) Caída de tensión en la línea.

c) Tensión a la salida del generador.

4.2. A partir de la información de la Tabla 4.7:

Tabla 4.7. Intensidad máxima admisible en amperios para cables aislados trenzados en haz (tripolar o tetrapolar) para $t = 40$ °C

Sección mm^2	Cobre		Aluminio	
	P	R	P	R
4	36	41	—	—
6	47	52	—	—
10	64	72	50	56
16	86	95	67	75
25	115	130	89	100
35	140	155	110	120

P = Policloruro de vinilo.
R = Polietileno reticulado.

a) Calcula la densidad de corriente en un cable de aluminio, aislado con policloruro de vinilo, trenzado en haz de 16 mm^2.

b) Calcula la sección de un cable trifásico de cobre, aislado con polietileno reticulado, trenzado en haz, que alimenta a un motor trifásico de 30 CV, rendimiento 0,9, factor de potencia 0,8 y tensión nominal 380 V (se supone despreciable la distancia de alimentación).

4.3. Un horno eléctrico monofásico se conecta a una tensión alterna de valor eficaz $U = 230$ V durante 1 hora y genera una cantidad de calor de 1.500 kcal. Se pide:

a) La potencia eléctrica del horno.

b) La resistencia eléctrica del horno.
(DATO: 1 cal = 4,18 J).

4.4. Una instalación fotovoltaica alimenta a 24 V, en corriente continua, una casa aislada con los siguientes receptores: frigorífico (120 W), televisión (240 W), bomba de agua (420 W), lámparas (3 × 40 W).

Si la distancia entre el cuarto de baterías y la caja de derivación que reparte a los receptores es de 16 m, determina (si todas las cargas están alimentadas al mismo tiempo):

a) La sección teórica del cable de cobre, si se desea que la caída de tensión de la línea sea del 1 % (cobre $\rho = 0{,}0178\ \Omega \cdot mm^2/m$).

b) La sección normalizada a instalar.

c) La potencia perdida en el cable normalizado seleccionado.

Actividades de ampliación

Con el fin de conseguir una mayor profundización en la materia, se han incluido los enunciados de una serie de ***«actividades de evaluación propuestas de ampliación (4)»*** para esta unidad que podrás encontrar dentro del MATERIAL WEB elaborado para este texto. Selecciona alguna de estas actividades y encuentra su solución.

4.1. Toma el Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión e indica en qué Instrucciones Técnicas Complementarias aparece información sobre las caídas de tensión máximas admitidas para conductores de alimentación.

4.2. Consigue catálogos técnicos sobre conductores eléctricos (directamente de los fabricantes o en internet), analiza sus características técnicas y su campo de aplicación. ¿Qué es el CPR?

CPR y marcado CE de cables eléctricos por su reacción al fuego

El Reglamento de Productos de la Construcción (CPR, del inglés *Construction Products Regulation*) es la nueva legislación europea en la que se establecen los requisitos básicos y características esenciales armonizadas de todos los productos destinados a la construcción.

© Ediciones Paraninfo

Uno de los requisitos básicos de la CPR se refiere a la seguridad que deben presentar los cables de energía, de telecomunicaciones, datos y control en caso de incendio.

El reglamento CPR introduce las llamadas euroclases, que establece unos criterios para el desarrollo de cables eléctricos con baja emisión de humos y gases tóxicos. Estos cables conceden más tiempo para realizar la evacuación en caso de incendio y son menos dañinos para los equipos de protección, facilitando las labores de rescate.

La **reacción frente al fuego** de un cable en relación con el CPR tiene en cuenta:

1. El calor emitido en la propia combustión del cable.
2. La cantidad y transparencia de los humos emitidos.
3. La acidez de los gases desprendidos.

Siguiendo estos criterios los cables eléctricos se clasifican en **euroclases** según se muestra en la Tabla 4.8.

Para adaptar la legislación española a los requisitos CPR, el Ministerio de Industria publicó el pasado julio de 2016 los documentos de adaptación al REBT. La Tabla 4.9 muestra un resumen de estas adaptaciones.

Tabla 4.9. Adaptación del REBT a los requisitos CPR

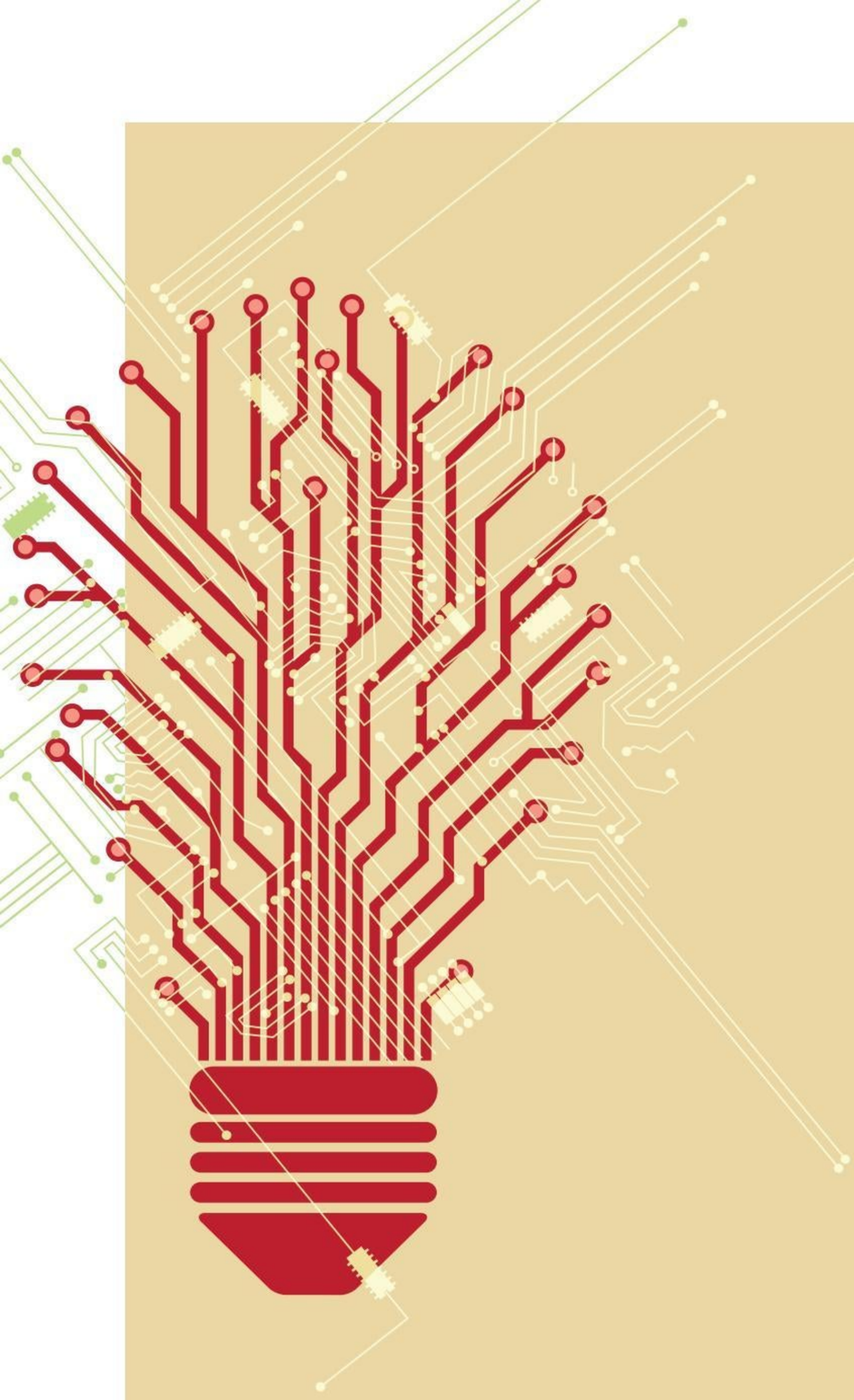
REBT	Instalación	Clase CPR mínima
ITC-BT 14	Línea general de alimentación.	C_{ca}-s1b, d1, a1
ITC-BT 15	Derivaciones individuales.	C_{ca}-s1b, d1, a1
ITC-BT 16	Contadores.	C_{ca}-s1b, d1, a1
ITC-BT 20	Instalaciones interiores.	E_{ca}
ITC-BT 28	Instalaciones en locales de pública concurrencia.	C_{ca}-s1b, d1, a1
ITC-BT 29	Locales con riesgo de incendio o explosión.	C_{ca}-s1b, d1, a1

Tabla 4.8. Euroclases de los cables eléctricos

Según la energía liberada y propagación del fuego	
A_{ca}	Incombustible.
$B1_{ca}$	Combustible no inflamable. Con muy baja o nula propagación del fuego.
$B2_{ca}$	Combustible difícilmente inflamable. No propagan el fuego de forma continua y emiten muy poco calor. Propagación del fuego muy limitada.
C_{ca}	Combustible difícilmente inflamable. No propagan el fuego de forma continua y emiten muy poco calor. Propagación del fuego limitada.
D_{ca}	Moderadamente combustible. Mejor comportamiento frente a la llama que los cables sin retardante de la misma.
E_{ca}	Combustible fácilmente inflamable. Cables que tienen fácil propagación del fuego con la exposición a las llamas.
F_{ca}	Sin comportamiento declarado.
Clasificación adicional según la opacidad de humos	
s1	Escasa producción y lenta propagación de humo.
s1a	s1 y transparencia de humos superior al 80 %.
s1b	s1 y transparencia de humos superior al 60 % e inferior al 80 %.
s2	Valores intermedios de producción y propagación de humo.
s3	Ni s1 ni s2.
Clasificación adicional según el desprendimiento de gotas durante la combustión	
d0	Sin caída de gotas y partículas inflamadas durante 1.200 s.
d1	Sin caída de gotas y partículas inflamadas durante más de 10 s.
d2	Ni d0 ni d1
Clasificación adicional según la acidez de los humos	
a1	Baja acidez, conductividad < 2,5 µS/mm y pH > 4,3.
a2	Valor intermedio de acidez, conductividad < 10 µS/mm y pH > 4,3.
a3	Ni a1 ni a2.

© Ediciones Paraninfo

5 Aplicaciones del efecto térmico



Contenidos

- **5.1.** Elementos de caldeo
- **5.2.** Transmisión de calor
- **5.3.** Inconvenientes del efecto térmico

Gracias al efecto térmico se pueden construir multitud de dispositivos de gran aplicación práctica, tales como lámparas incandescentes, elementos de caldeo, calefactores, termos eléctricos y fusibles.

Objetivos

- Aplicar el efecto Joule para la fabricación de dispositivos capaces de aprovecharse de la corriente eléctrica.
- Distinguir entre cortocircuito y sobrecarga.
- Describir el funcionamiento del fusible y del interruptor automático, y seleccionar el calibre adecuado para cada aplicación.

5.1. Elementos de caldeo

Son resistencias preparadas para transformar la energía eléctrica en calor (Figura 5.1). Se utilizan para la fabricación de estufas, placas de cocina, hornos, planchas eléctricas, secadores, calentadores eléctricos de agua, soldadores, etcétera.

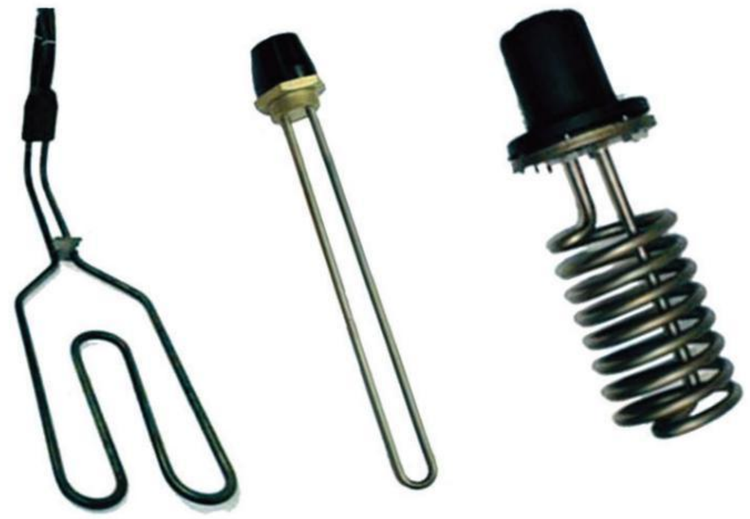


Figura 5.1. Resistencias calefactoras. (Cortesía de Aplicaciones térmicas Vitoria.)

El calor eléctrico presenta múltiples ventajas frente a otras formas de producir calor, como la ausencia de llama y gases de combustión, la limpieza y la facilidad para controlar y regular su funcionamiento.

Los elementos de caldeo se fabrican, por lo general, con hilos de aleaciones metálicas resistivas cubiertos por materiales aislantes que soportan altas temperaturas.

El elemento básico de control de temperatura que suelen poseer la mayoría de los aparatos calefactores es el termostato. Con este dispositivo prefijamos la temperatura de funcionamiento del aparato. Una vez alcanzada dicha temperatura, el termostato abre el circuito y desconecta el calefactor hasta que la temperatura vuelve a descender, momento en el cual se vuelve a cerrar el circuito. De esta forma, abriendo y cerrando el circuito de alimentación del calefactor se consigue mantener la temperatura prefijada (Figura 5.2).

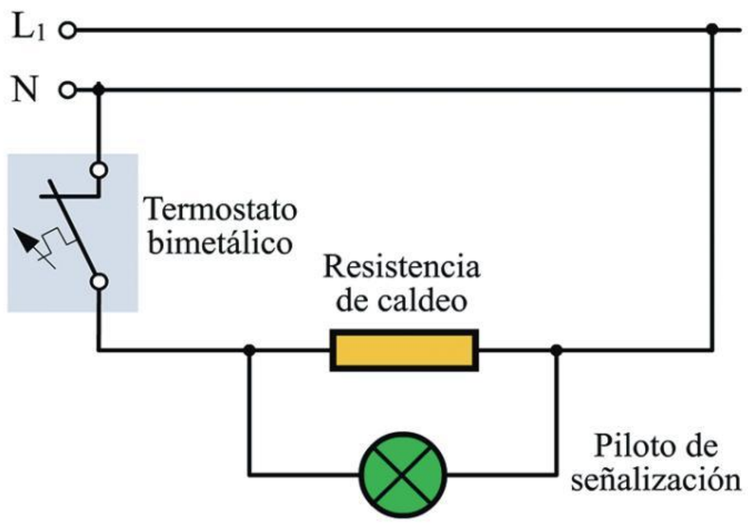


Figura 5.2. Esquema del control de temperatura por termostato.

Los termostatos pueden ser de varios tipos; los más utilizados son los bimetálicos y los electrónicos.

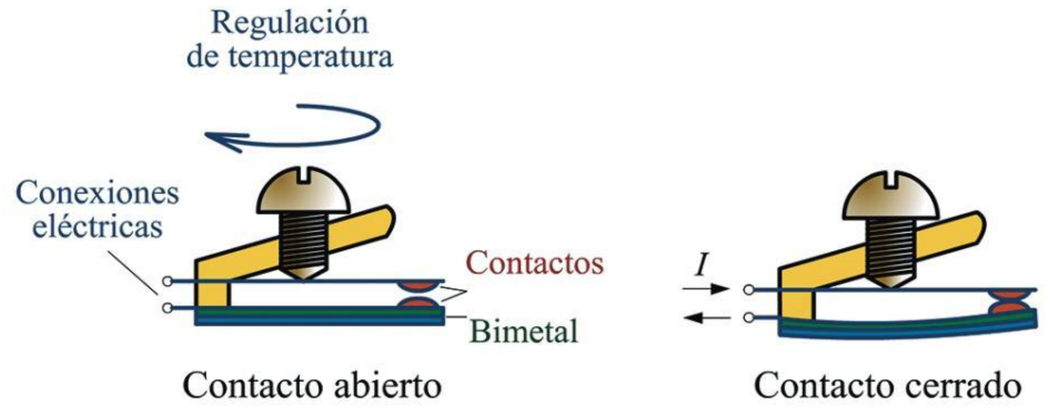


Figura 5.3. Termostato bimetálico.

En la Figura 5.3 se puede apreciar la composición de un termostato bimetálico. El elemento fundamental es el bimetal, que está fabricado a base de unir dos metales de muy diferente coeficiente de dilatación. Al calentarse, una de las láminas tiende a estirarse más que la otra y provoca un arqueo del bimetal. Este movimiento puede aprovecharse para abrir o cerrar un contacto eléctrico.



Figura 5.4. (a) Termostato bimetálico. (b) Termostato electrónico programable.

Los termostatos no solo son útiles para prefijar la temperatura, por ejemplo, el aire de una habitación o del agua de un termo eléctrico, sino también como elemento de seguridad en los calefactores, ya que así nos aseguramos de que la temperatura de funcionamiento de los aparatos nunca alcance valores peligrosos. Por ejemplo, los secadores de pelo llevan integrado un pequeño termostato en el interior del aparato; así nos aseguramos de que, aunque el motor que ventila la resistencia de caldeo deje de funcionar, la temperatura de las resistencias calefactoras no podrán alcanzar temperaturas peligrosas, ya que en este caso el termostato abre el circuito de alimentación hasta que se reponga la temperatura.

5.2. Transmisión de calor

La energía calorífica generada en un punto se transmite desde las zonas de más altas temperaturas a las más bajas. Esta transmisión puede conducirse de tres formas diferentes:

- **Conducción:** el calor se transmite por contacto íntimo entre dos materiales, como por ejemplo en los metales. Una aplicación práctica podría ser la transmisión de calor por contacto directo entre una sartén y una placa eléctrica de cocina, o soldador eléctrico de estaño (Figura 5.5).

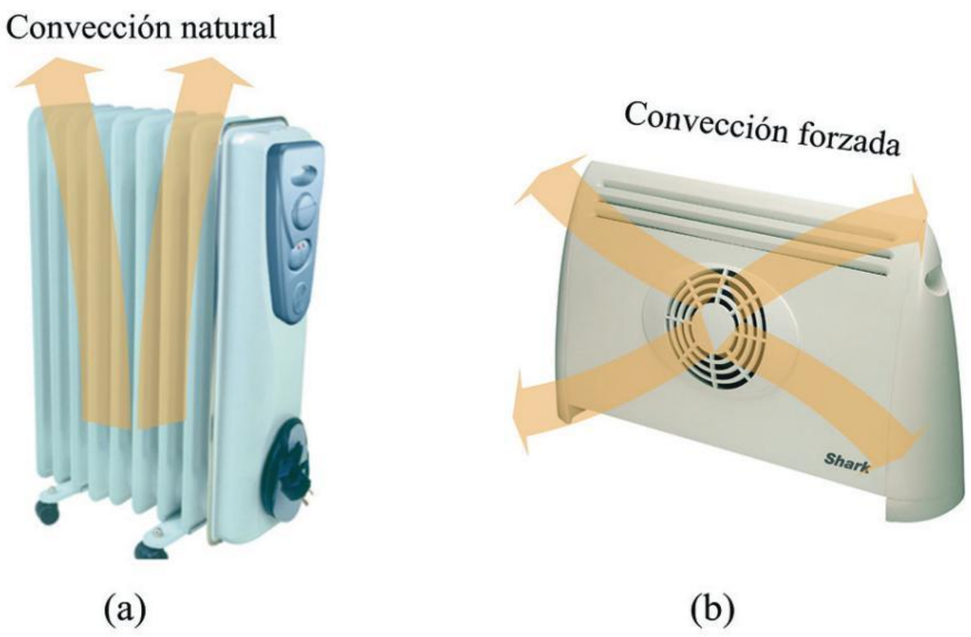
© Ediciones Paraninfo



(a) (b)

Figura 5.5. Conducción térmica. (a) Placa eléctrica. (b) Soldador eléctrico de estaño.

- **Convección:** todos los gases y líquidos, cuando se calientan se dilatan y disminuyen de densidad, lo que hace que tiendan a desplazarse. Así, por ejemplo, un radiador eléctrico, que transmita calor por convección (convector), calienta el aire que entra en contacto con su superficie, lo que hace que este ascienda y se mueva por toda la estancia que hay que calentar. Gracias a este fenómeno funcionan multitud de aparatos de calefacción, como los radiadores eléctricos, que consiguen que se produzca una circulación natural de aire cálido por toda la estancia sin que la temperatura de los aparatos de calefacción sea peligrosamente elevada. También existe la posibilidad de acelerar el paso de aire por el aparato de calefacción mediante un ventilador (convección forzada) (Figura 5.6).



(a) (b)

Figura 5.6. Convector. (a) Radiador eléctrico por convección natural. (b) Calefactor eléctrico por convección forzada.

- **Radiación:** este tipo de transmisión se produce por ondas y es similar a la que se produce por el Sol. De esta forma de transmisión se aprovechan elementos calefactores como, por ejemplo, las estufas de rayos infrarrojos, placas solares de alta temperatura, hornos eléctricos. El uso de este tipo de aparatos para la calefacción eléctrica debe realizarse con las debidas medidas de seguridad, ya que las temperaturas que alcanzan suelen ser elevadas y podrían ocasionar accidentes como quemaduras o incendios (Figura 5.7).

Aprovechando estas formas de transmisión del calor también se construyen otros sistemas de calefacción, como los suelos y techos radiantes y la calefacción por acumulación.

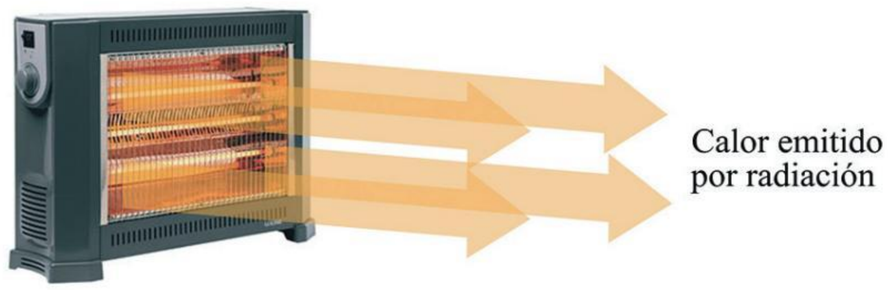


Figura 5.7. Radiación.

5.2.1. Calefacción por suelos y techos radiantes

Se construyen a base de cables calefactores de baja resistencia eléctrica (Figura 5.9) que se instalan debajo del suelo o en el techo. Este tipo de calefacción es un sistema de radiación a baja temperatura que suele utilizarse como apoyo y en combinación con otro tipo de calefacción. La calefacción por suelo radiante resulta, por ejemplo, muy confortable para caldear suelos de aseos y baños (Figura 5.8).

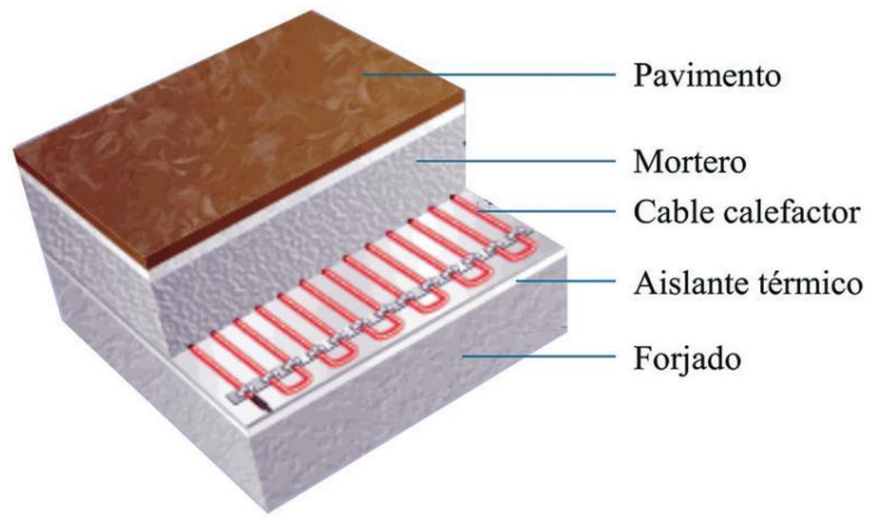


Figura 5.8. Calefacción por suelo radiante.

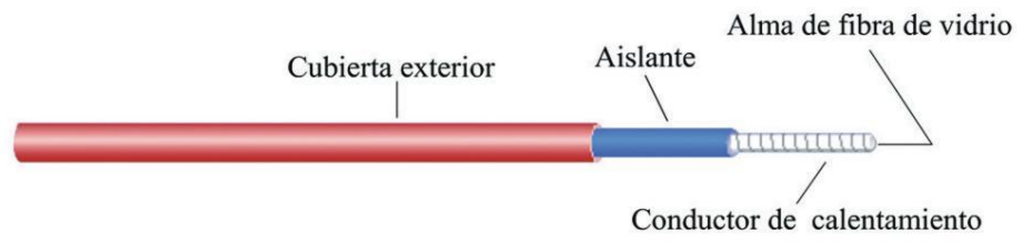


Figura 5.9. Composición de un cable calefactor.

Consulta en el REBT la Instrucción Técnica ITC-BT 45 sobre la instalación de cables y folios radiantes en viviendas.

5.2.2. Calefacción por acumulación

Este tipo de calefactores eléctricos están constituidos por materiales de tipo refractario que hacen posible la acumulación de grandes cantidades de calor durante su conexión a la red eléctrica, para posteriormente poder ceder este calor cuando sea necesario sin tener por qué estar conectadas las resistencias eléctricas. Su principal aplicación es la de poder

© Ediciones Paraninfo

acumular el calor por la noche, donde es posible contratar con la compañía eléctrica la tarifa nocturna y beneficiarse de un precio del kWh mucho más bajo.

Se fabrican de dos tipos, estáticos y dinámicos. La diferencia entre ellos consiste en que en los dinámicos se fuerza a salir al calor mediante una convección forzada a través de un ventilador, mientras que en los estáticos el calor acumulado en los materiales refractarios emana del calefactor por convección natural (Figura 5.10).

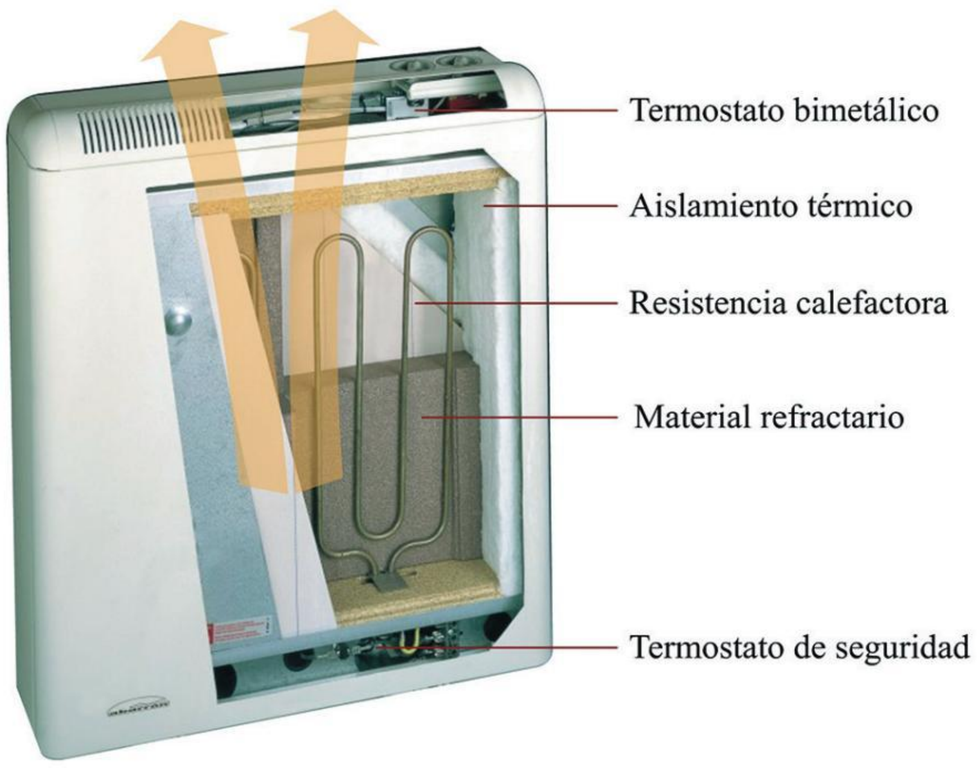


Figura 5.10. Acumulador de calor estático. (Cortesía de Abarrón.)

5.2.3. El termo eléctrico

Sirve para tener disponible una cantidad suficiente de agua caliente para el sector doméstico e industrial. Estos aparatos calientan el agua mediante una resistencia eléctrica sumergida en un calderín con el agua. Funcionan por acumulación, lo que les permite disponer de una gran cantidad de agua caliente con una potencia eléctrica moderada, evitando tener que contratar una elevada potencia con la compañía eléctrica.

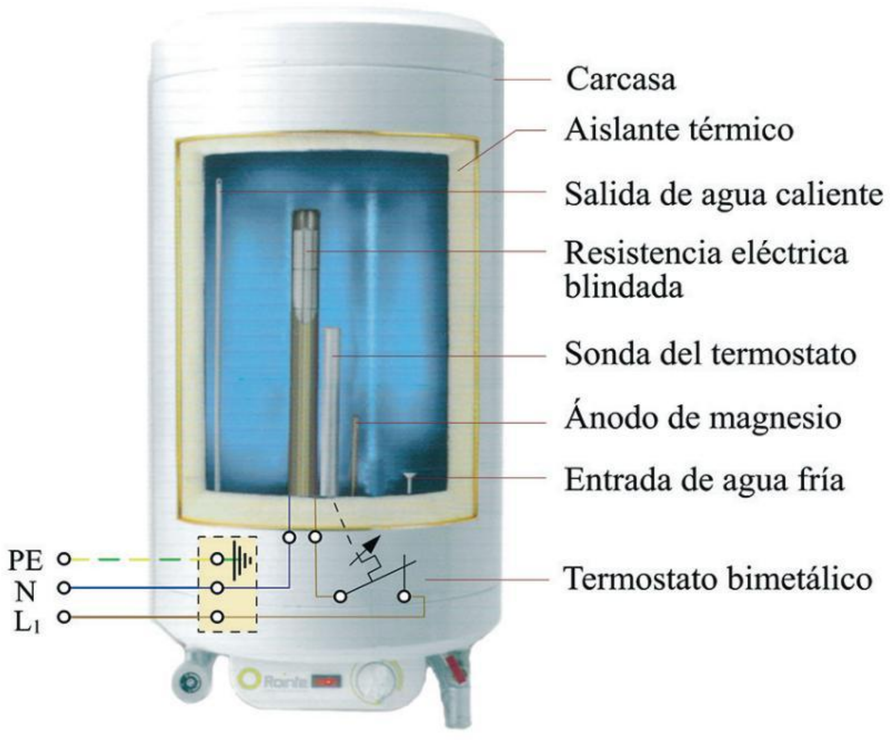


Figura 5.11. Partes de un termo eléctrico. (Cortesía de Rointe.)

El agua del calderín se puede calentar entre 35 ºC y 85 ºC en función de la regulación del termostato y se mantiene caliente hasta su uso gracias al aislante térmico del calderín. Para el sector doméstico su potencia eléctrica es del orden de 2 kW y su capacidad se encuentra entre 50 y 200 litros.

En la Figura 5.11 se muestran las partes de un termo eléctrico con ánodo de magnesio que evita la corrosión interna de las paredes del calderín.

Consulta en el REBT la Instrucción Técnica ITC-BT 45 del REBT sobre la instalación de aparatos de caldeo.

5.3. Inconvenientes del efecto térmico

El efecto térmico se vuelve indeseable cuando no es esperado. Este caso se da:

- En el calentamiento de conductores en las líneas eléctricas, lo que condiciona la sección de los conductores en función de la intensidad de la corriente que los atraviesa.
- En los conductores que forman los bobinados de transformadores, motores y generadores, lo que limita su potencia nominal.
- En resistencias que tienen la misión de limitar corriente y tensión al ser conectadas en serie con la carga (reostatos, potenciómetros, resistores en circuitos electrónicos, etc.).
- En ciertos fallos, como el cortocircuito y la sobrecarga, que pueden llegar a dañar las instalaciones eléctricas si no se emplea la protección adecuada.

5.3.1. El cortocircuito

El cortocircuito se produce cuando se unen accidentalmente las dos partes activas del circuito eléctrico.

Estos accidentes suelen ser provocados por un error en el montaje de la instalación, un fallo de un aislamiento que separa las partes activas o por una falsa maniobra (Figura 5.12).

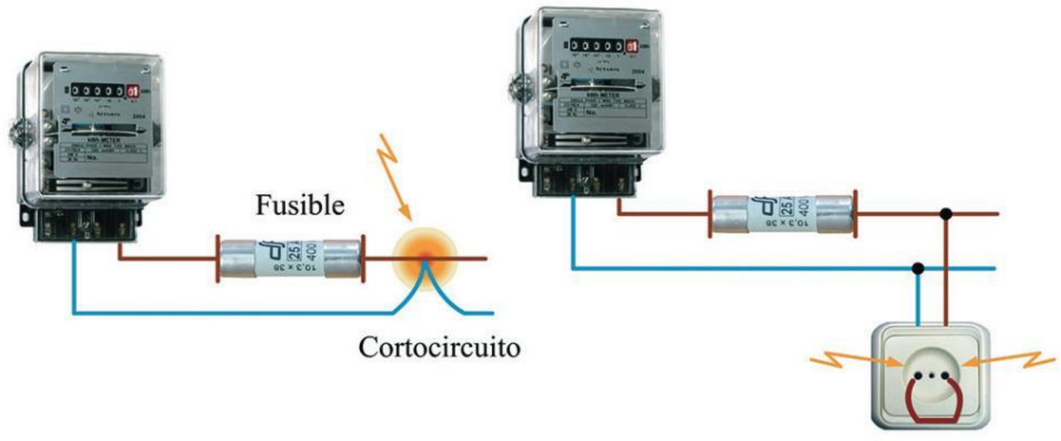


Figura 5.12. Ejemplos de cortocircuito accidental.

© Ediciones Paraninfo

Actividad experimental 5.1

Vamos a comprobar experimentalmente el efecto del cortocircuito. Para ello consigue una pila y una lámpara y conéctalos. Seguidamente une mediante un conductor los terminales de la lámpara (Figura 5.13).

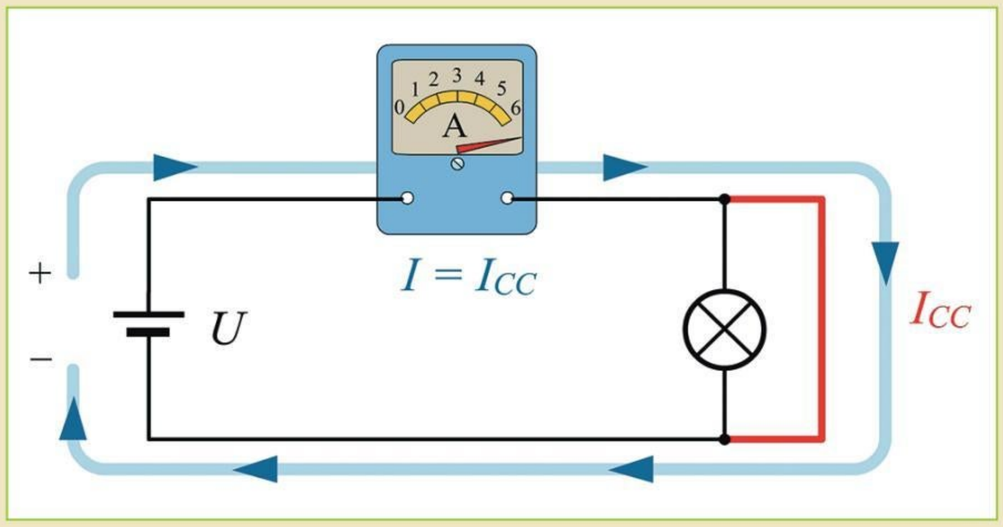


Figura 5.13.

Se podrá observar cómo la lámpara se apaga, ya que toda la corriente eléctrica tiende a derivarse por el conductor de menos resistencia que el filamento. Mediante un amperímetro comprueba el valor de la corriente.

Esta experiencia se puede realizar porque la pila no es capaz de suministrar una corriente muy grande, ya que de haber provocado un cortocircuito, por ejemplo, en una base de enchufe de la red eléctrica, la corriente habría alcanzado valores muy elevados y peligrosos para los conductores eléctricos.

En un cortocircuito la intensidad de corriente que aparece es muy elevada, debido a que la única resistencia que existe en el circuito es la propia de los conductores de línea (Figura 5.14).

$$I_{CC} = \frac{U}{R_{\text{Línea}}}$$

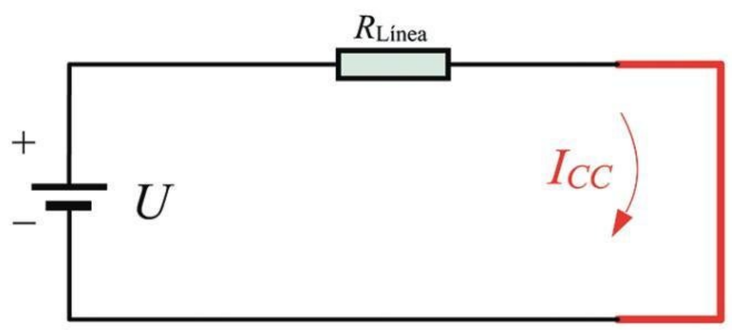


Figura 5.14.

Actividad resuelta 5.1

Determina la intensidad de cortocircuito que aparecerá en una toma de corriente si la energía proviene de un transformador de distribución de 230 V y la línea de alimentación consiste en un conductor de cobre de 4 mm^2 de sección con una longitud total de 100 m.

Solución:

La resistencia del conductor es:

$$R_L = \rho \frac{L}{S} = 0{,}01786 \frac{100}{4} = 0{,}447\ \Omega$$

La corriente de cortocircuito queda limitada por esta pequeña resistencia:

$$I_{CC} = \frac{U}{R_L} = \frac{230}{0{,}447} = 514{,}5\ \text{A}$$

¿Cuál sería la intensidad de cortocircuito si la sección del conductor hubiese sido de 25 mm^2?

En el caso de que la resistencia del cortocircuito sea muy baja o cuando trabajamos con tensiones elevadas, pueden llegar a establecerse miles de amperios. Si esta fuerte intensidad no se corta inmediatamente, los conductores se destruyen por efecto del calor ($Q = 0{,}24 \cdot R_{\text{Línea}} \cdot I^2 \cdot t$) en un corto periodo de tiempo (a veces no llega a unos pocos milisegundos).

5.3.2. La sobrecarga

Se produce una sobrecarga cuando hacemos pasar por un conductor eléctrico más intensidad de corriente que la nominal (intensidad para la que ha sido calculada la línea).

Las sobrecargas pueden venir provocadas por conectar demasiados receptores en una línea eléctrica (Figura 5.15), por un mal funcionamiento de un receptor que tiende a un mayor consumo eléctrico o por un motor eléctrico que es obligado a trabajar a más potencia que su nominal.

Las sobrecargas originan un aumento de intensidad por los conductores que, con el tiempo suficiente, puede llegar a provocar su destrucción por elevación de temperatura.



Figura 5.15. Sobrecarga causada por conectar a una línea un exceso de receptores.

© Ediciones Paraninfo

Para medir una sobrecarga hay que tener en cuenta dos factores:

- El número de veces que se supera la intensidad nominal.
- El tiempo que dura la sobrecarga.

Una sobrecarga provoca daños cuando estos dos factores son considerables. Así, por ejemplo, si provocamos una sobrecarga en un conductor de dos veces su intensidad nominal durante unos pocos segundos, seguro que el conductor no sufre daños. Sin embargo, si el tiempo es de horas, esta sobreintensidad puede llegar a dañar seriamente los aislantes del conductor.

5.3.3. Protección de los circuitos contra cortocircuitos y sobrecargas

Los excesos de temperatura de un conductor lo pueden destruir inmediatamente. Este es el caso del cortocircuito (corriente muy elevada que no puede durar mucho tiempo porque destruye todos los elementos de la instalación que se encuentran a su paso). Las sobrecargas tardan más en dañar el conductor. Aun así, los excesos constantes de temperatura de los materiales aislantes hacen que se envejezcan con más rapidez, limitando la vida útil del conductor (los aislantes sometidos a altas temperaturas acaban volviéndose quebradizos y perdiendo parte de sus propiedades aislantes).

Para la protección contra cortocircuitos y sobrecargas se emplean los fusibles y los interruptores automáticos.

5.3.4. Fusibles

Un fusible está compuesto por un hilo conductor de menor sección que los conductores de la línea. En caso de una sobrecarga o cortocircuito, la intensidad se eleva a valores peligrosos para los conductores de la línea, y el fusible, que es más débil, se funde debido al efecto Joule, e interrumpe el circuito antes de que la intensidad de la corriente alcance esos valores peligrosos (Figura 5.17).

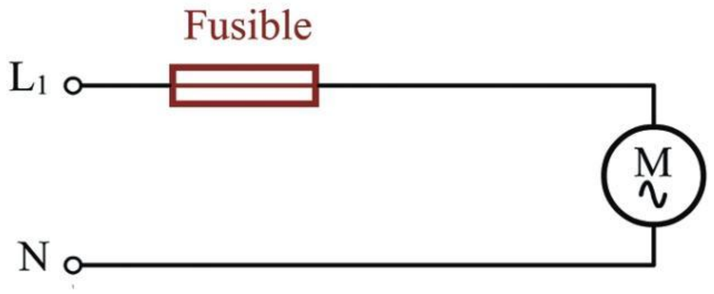


Figura 5.16. Fusible protegiendo un motor eléctrico.

Para que el hilo fusible se caliente antes que los conductores de la línea debe ser de mayor resistencia eléctrica. Esto se consigue con un hilo de menor sección o con un hilo de mayor coeficiente de resistividad. Por otro lado, este hilo debe tener un punto de fusión más bajo que los conductores de línea que protege.



Fusible cilíndrico — Fusible con indicador de fusión — Fusible de cuchillas

Figura 5.17. Cartuchos fusibles calibrados.

Hoy en día, para la fabricación de hilos fusibles, se emplean aleaciones especiales estudiadas para conseguir los mejores resultados. Estas aleaciones pueden ser de cobre-plata, plomo-estaño, etcétera.

Cuando un hilo fusible se funde, las gotas de material en estado líquido se proyectan, lo que puede producir quemaduras y accidentes, incluido peligro de incendio. Por esta razón, los hilos fusibles se deben colocar en el interior de recipientes herméticamente cerrados, dando así lugar a los llamados cartuchos fusibles. La Figura 5.18 muestra el aspecto de una gama de cartuchos fusibles comerciales de diferente tamaño, así como sus calibres en amperios.

Cuando el fusible conduce una intensidad de corriente muy elevada, el hilo fusible se funde como si se tratara de una pequeña explosión. Las partículas del hilo se convierten prácticamente en gas metálico que hace que la zona donde se produce sea favorable a la conducción de dicha corriente. En estos casos puede generarse un arco eléctrico entre los contactos del fusible y producirse así una continuación del cortocircuito hasta la destrucción de la instalación. Para evitar este fenómeno, los hilos fusibles se sitúan dentro de una cámara de extinción cuya función es apagar el arco de forma rápida y efectiva. Cuanto mayor sea la corriente de cortocircuito, más difícil será apagar el arco.



Tamaño	*U*	kA	Calibrados en amperios											
			2	4	6	10	16	20	25	32	40	50	63	80
8 x 31	380	20												
10 x 38	500	100												
14 x 51	500	100												
22 x 58	500	100												

Figura 5.18. Gama de cartuchos comerciales calibrados en amperios.

© Ediciones Paraninfo

El poder de corte de un cartucho fusible es la intensidad que el fusible es capaz de cortar en caso de un cortocircuito a su tensión nominal.

Así, por ejemplo, si se estima que en una instalación eléctrica la corriente de cortocircuito es de 30.000 A (30 kA), el cartucho fusible deberá poseer un poder de corte superior a esta intensidad. Habitualmente este valor se expresa en kA. En la gama de fusibles de la Figura 5.18 podemos ver cómo el fusible de 8×31 posee un poder de corte de 20 kA, mientras que para el resto de los tamaños es de 100 kA.

Habitualmente los cartuchos fusibles poseen un elevado poder de corte, lo que garantiza que las intensidades elevadas que se dan en un cortocircuito van a ser cortadas antes de que produzcan daños irreversibles en las instalaciones.

Una de las ventajas de los cartuchos fusibles es que están calibrados en amperios. El calibre de un fusible nos indica la intensidad que puede pasar por él sin fundirse.

Cuando en una línea se supera esta intensidad, el fusible corta el circuito. La rapidez con que lo hace está en función de lo alta que sea la intensidad del fallo, tal como se muestra en las curvas de fusión facilitadas por los fabricantes.

En la Figura 5.19 se dan las curvas de fusión de los cartuchos fusibles de una cierta gama comercial. En el eje (*X*) se representan los valores de la intensidad. En el eje (*Y*) aparecen representados los tiempos de respuesta del fusible. Para averiguar este tiempo, basta con trazar una recta, perpendicular al eje *X*, desde la intensidad del fallo hasta la intersección con la curva correspondiente al calibre del fusible.

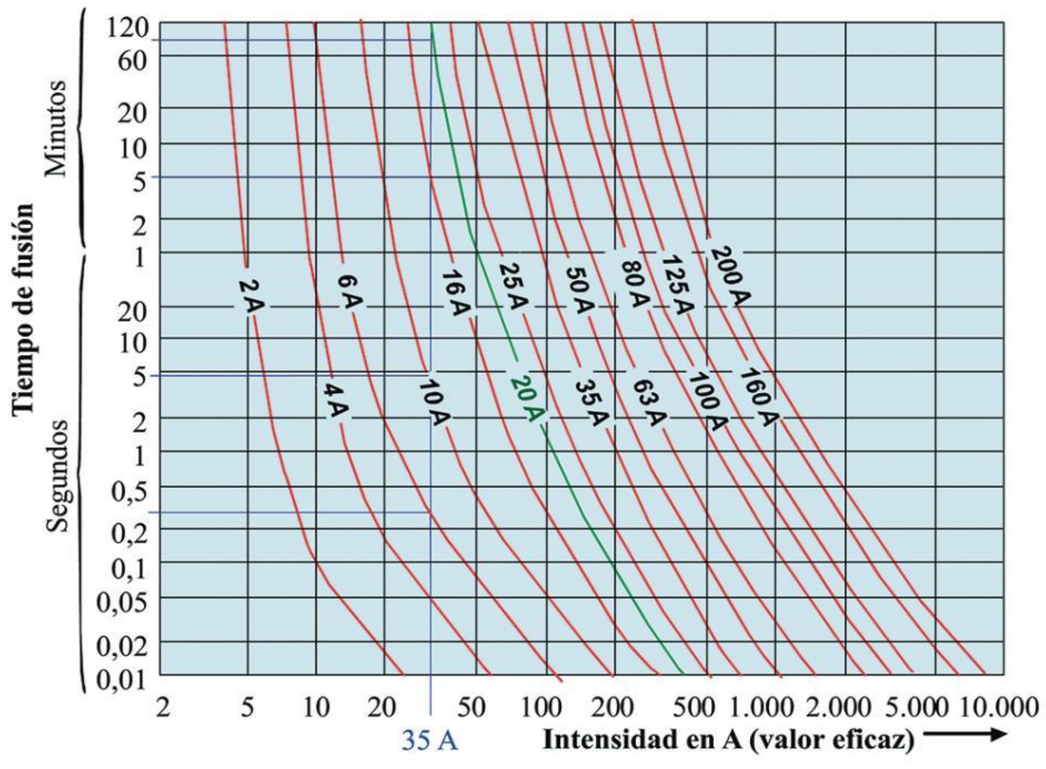


Figura 5.19. Curvas de fusión de una gama de cartuchos fusibles comerciales.

Así, por ejemplo, se puede apreciar que para una intensidad por el circuito de 35 A, el fusible de 2 A corta el circuito en un tiempo inferior a 0,01 segundos, el fusible de 6 A lo hace en un tiempo de 0,3 segundos, el de 10 A en 5 segundos, el de 16 A en 5 minutos, el de 20 A en 90 minutos, y por encima de 35 A no llega nunca a fundirse.

Otra de las características de los cartuchos fusibles calibrados es que son *selectivos*, lo que significa, tal como hemos podido apreciar en el ejemplo, que siempre funde más rápido aquel fusible que posee el menor calibre. Esto tiene una gran importancia en instalaciones con muchas ramificaciones, ya que ante un cortocircuito se consigue separar rápidamente de la red solamente la zona afectada y, además, en el tiempo más breve posible. Además no se perturba innecesariamente el servicio de energía al resto de los consumidores.

En la Figura 5.20 se muestra un ejemplo de la selectividad de los fusibles. En el caso de que aparezca un cortocircuito en el punto A de la instalación, el fusible que actuará será solo el de 10 A, ya que su tiempo de fusión es inferior al de los cartuchos fusibles de 25 y 50 A que se encuentran más cerca de la línea general de alimentación.

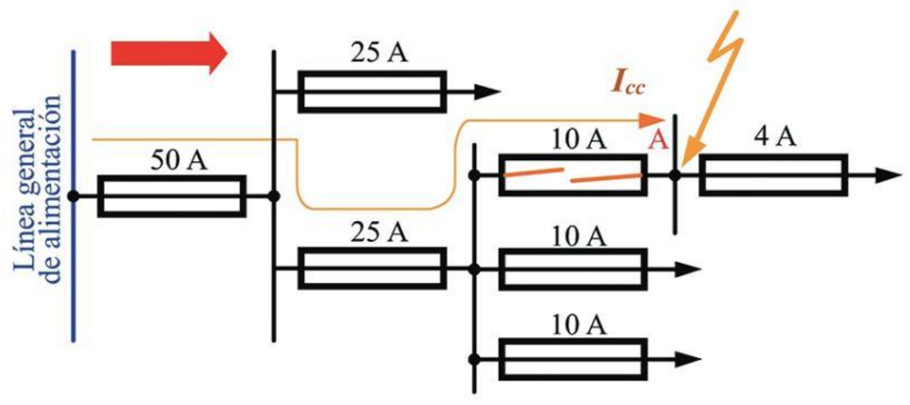


Figura 5.20. Selectividad de los cortacircuitos fusibles.

Actividad resuelta 5.2

La potencia máxima que se prevé para la electrificación de una vivienda es de 5.750 W. Determina el cartucho fusible necesario para la protección del contador y de la derivación individual si la tensión de suministro es de 230 V.

Solución:

$$I = \frac{P}{U} = \frac{5.750}{230} = 25 \text{ A}$$

Si consultamos la gama de cartuchos fusibles comerciales de la Figura 5.18, el calibre del fusible que más se acerca es el de 25 A. Aunque si no queremos fusiones intempestivas podríamos seleccionar un calibre de 40 o 50 A, siempre y cuando no exista antes una protección de menos calibre.

© Ediciones Paraninfo

Se fabrican cartuchos fusibles de fusión extrarrápida, rápida y lenta, dependiendo de las características de la instalación a proteger. Así, por ejemplo, para la protección de dispositivos electrónicos con semiconductores son más adecuados los fusibles extrarrápidos; por el contrario, es mejor utilizar fusibles lentos para la protección de motores, ya que en el momento del arranque hacen circular una corriente muy elevada (punta de arranque) que desaparece en cuanto el motor alcanza sus revoluciones nominales.

La clasificación de los cartuchos fusibles en función de su tiempo de fusión está dada por dos letras, la primera minúscula y la segunda mayúscula (Tabla 5.1).

De esta forma, existen fusibles de tipo gG, gL, gR, aG, aR, etc. Así, por ejemplo, los fusibles **gL** son de uso general y son adecuados para la protección de líneas y conductores eléctricos, los **aM** se adaptan muy bien a la protección de motores y los **gR** son idóneos para la protección de dispositivos electrónicos con semiconductores.

Tabla 5.1. Nomenclatura de fusibles

Primera letra	g	Fusible limitador de corriente. Corta corrientes de cortocircuito y de sobrecarga.
	a	Fusible limitador de corriente. Corta solo en caso de corriente de cortocircuito. No corta para corrientes de sobrecarga.
Segunda letra	G	Fusible para protección de circuitos de uso general.
	K	Fusible para protección específica de líneas.
	M	Fusible para protección específica de circuitos de motores.
	R	Fusible de actuación rápida o ultrarrápida para protección de circuitos con semiconductores de potencia.

Los fusibles resultan muy seguros en la protección de cortocircuitos, pero presentan el inconveniente de que son difíciles de reponer.

Al fundirse el fusible queda inutilizado, por lo que hay que encontrar otro de las mismas características y realizar la operación de recambio. En muchas ocasiones esta operación resulta engorrosa y, si no se hace por un especialista, puede ser hasta peligrosa. Además, los fusibles reaccionan muy lentamente ante las sobrecargas. Por ejemplo, un fusible de 16 A tarda 5 minutos en fundirse cuando se lo somete a un paso de corriente de sobrecarga de 30 A, según las curvas de la Figura 5.19. En ciertas aplicaciones este tiempo puede ser suficiente para destruir alguna parte vulnerable de la instalación.

5.3.5. Los interruptores automáticos

Los interruptores automáticos, también conocidos con el nombre de disyuntores, están sustituyendo en muchas aplicaciones a los fusibles, ya que protegen bien contra los cortocircuitos y actúan ante las sobrecargas más rápido y de una forma más selectiva. Así, por ejemplo, en las viviendas se instala un cuadro de mando y protección con varios interruptores automáticos. Cada uno de estos dispositivos protege de las sobrecargas y cortocircuitos a cada uno de los circuitos independientes de la vivienda. En la Figura 5.21 se muestra el aspecto de una gama comercial de interruptores automáticos, junto con sus características más relevantes.

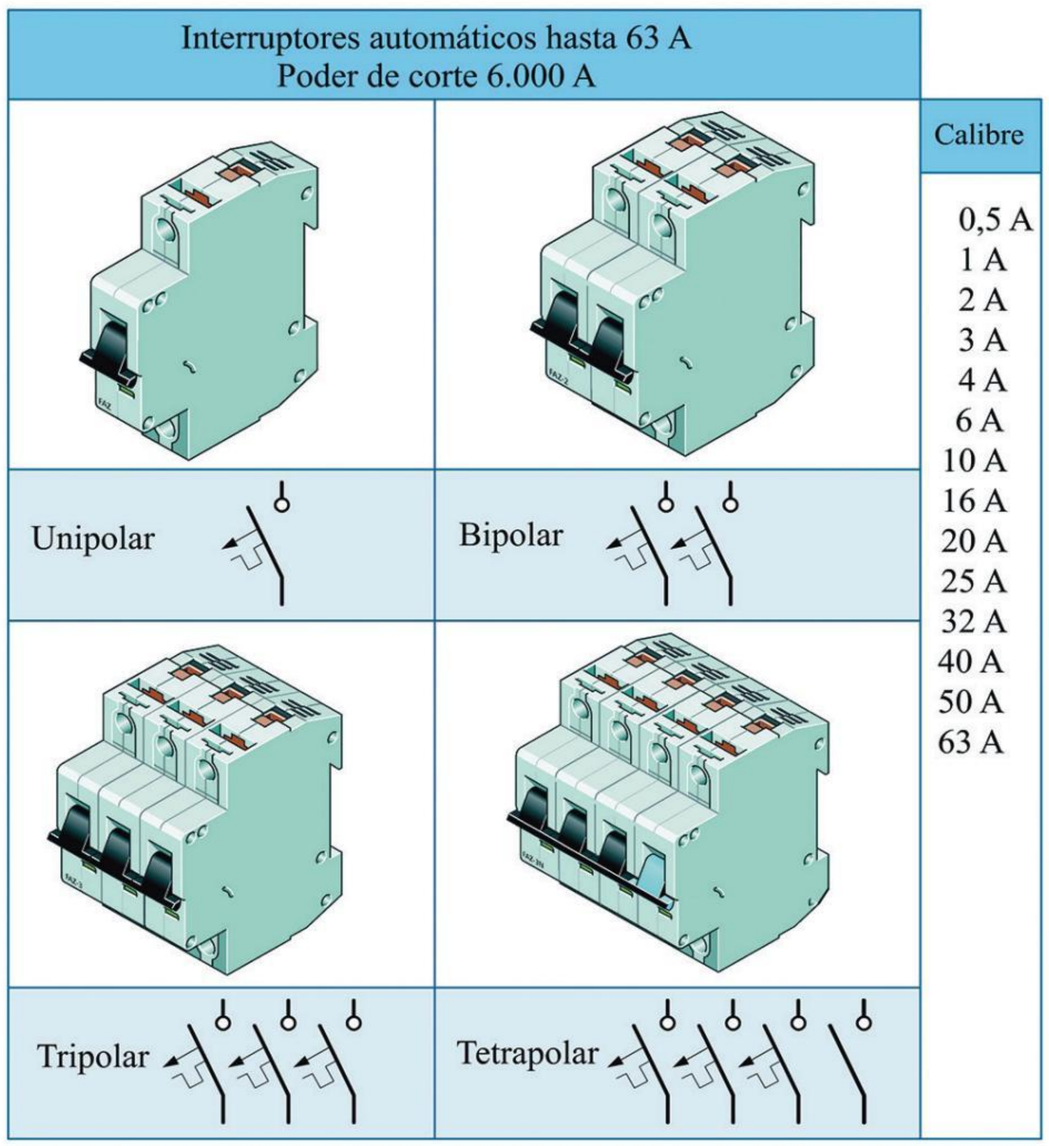


Figura 5.21. Gama comercial e interruptores automáticos calibrados en amperios.

Así, por ejemplo, en una vivienda con un nivel de electrificación básico, el número de circuitos que hay que proteger es 5: un pequeño interruptor automático de 10 A para la protección del circuito de puntos de iluminación; uno de 16 A para el circuito de tomas de corriente de uso general y frigorífico; uno de 25 A para el circuito de cocina y horno; uno de 20 A para el circuito de lavadora, lavavajillas y termo eléctrico, y uno de 16 A para el circuito de tomas de corriente de los cuartos de baño, así como para las bases auxiliares del cuarto de cocina (Figura 5.22).

© Ediciones Paraninfo

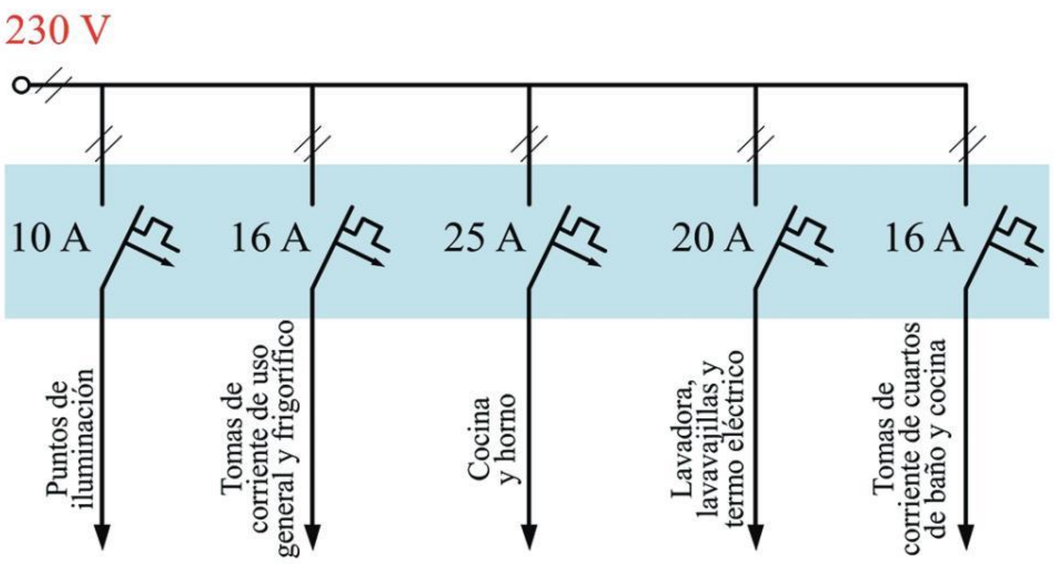


Figura 5.22. Interruptores automáticos protectores de los circuitos independientes de una vivienda de grado de electrificación básica.

Los interruptores automáticos tienen la ventaja de que una vez que han abierto el circuito por sobrecarga o cortocircuito se pueden reponer manualmente con rapidez (una vez que se haya reparado la causa del fallo) y sin necesidad de utilizar recambios, como ocurre en el caso de los fusibles.

Al igual que los fusibles, los interruptores automáticos se fabrican calibrados en amperios. El calibre nos indica los amperios que pueden pasar por el interruptor de una forma permanente sin que este abra el circuito; superada esta intensidad, el interruptor realiza la apertura del circuito. El tiempo de respuesta dependerá de las veces que se supere la intensidad nominal del interruptor. Para intensidades de sobrecargas este tiempo puede ser desde unos pocos segundos a unos pocos minutos. Para intensidades de cortocircuito la respuesta es mucho más rápida, del orden de milésimas de segundos.

En la Figura 5.23 se muestra, como ejemplo, el aspecto de las curvas de disparo de los interruptores automáticos.

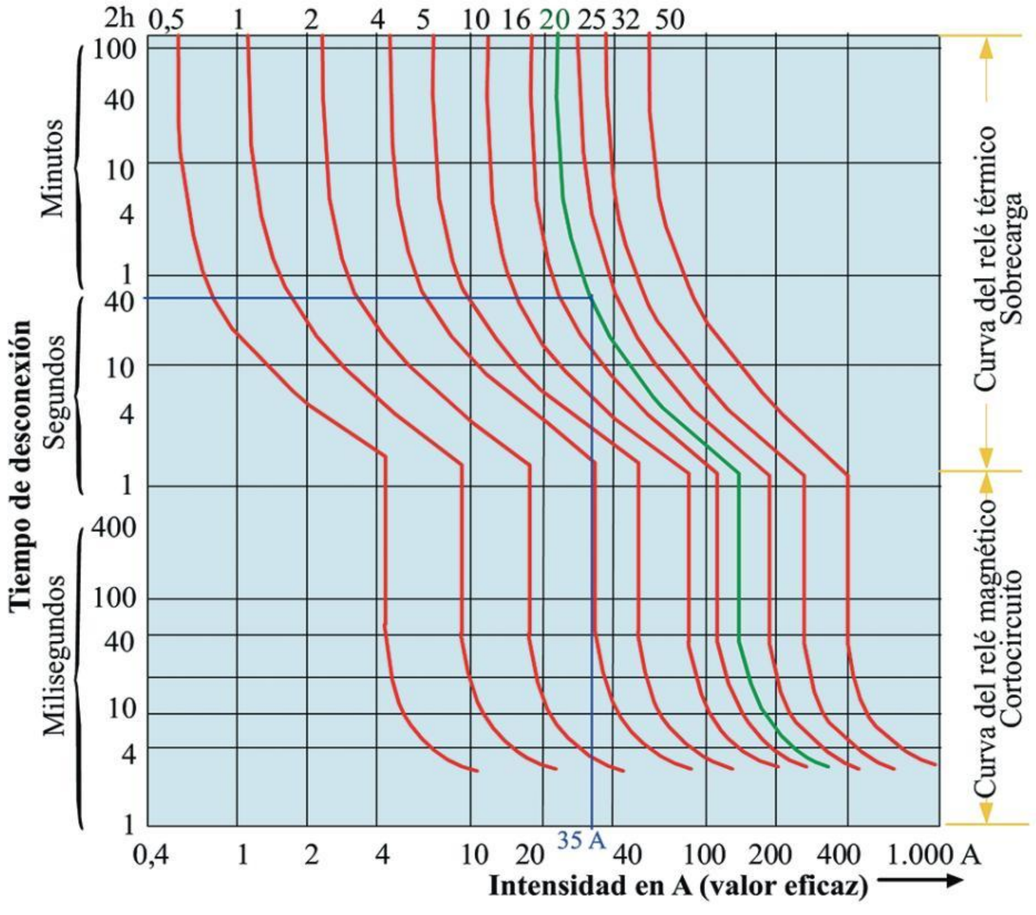


Figura 5.23. Curvas de disparo de una gama comercial de interruptores automáticos.

Los diferentes calibres de los interruptores automáticos también son selectivos.

Una de las desventajas que presentan los interruptores automáticos frente a la protección que brindan los fusibles es que su poder de corte suele ser inferior al de estos últimos.

Para conseguir apagar el arco que se produce en la desconexión entre los contactos del interruptor, los automáticos disponen de una cámara de extinción del arco. Así, por ejemplo, los pequeños interruptores automáticos suelen tener un poder de corte de 1,5; 3; 4,5; 6; 10; 15; 20; y 25 kA, frente a los 40 o 100 kA que alcanzan con facilidad los cartuchos fusibles. Por esta razón, aunque los interruptores automáticos se utilizan para la protección de todo tipo de receptores y líneas, es aconsejable la instalación de un fusible general de protección que garantice la desconexión en el caso de que un interruptor automático no sea capaz de cortar una corriente demasiado elevada.

5.3.6. Funcionamiento de un interruptor automático

El interruptor automático está compuesto por dos dispositivos de protección diferentes: el relé magnético y el relé térmico.

Estos dos elementos están conectados en serie con el circuito a proteger, por lo que toda la corriente pasa por ambos.

Relé magnético (Figura 5.24): se encarga de la protección de los cortocircuitos. Está constituido básicamente por una bobina de poca resistencia eléctrica. En su interior hay un núcleo de hierro que en posición de reposo se encuentra separado de su centro. Mientras la intensidad de corriente que atraviesa la bobina sea la nominal, el interruptor permanece cerrado. Cuando la intensidad crece rápidamente, hasta valores de cortocircuito, la bobina crea un campo magnético suficientemente fuerte como para succionar el núcleo móvil que, a su vez, provoca la apertura del interruptor.

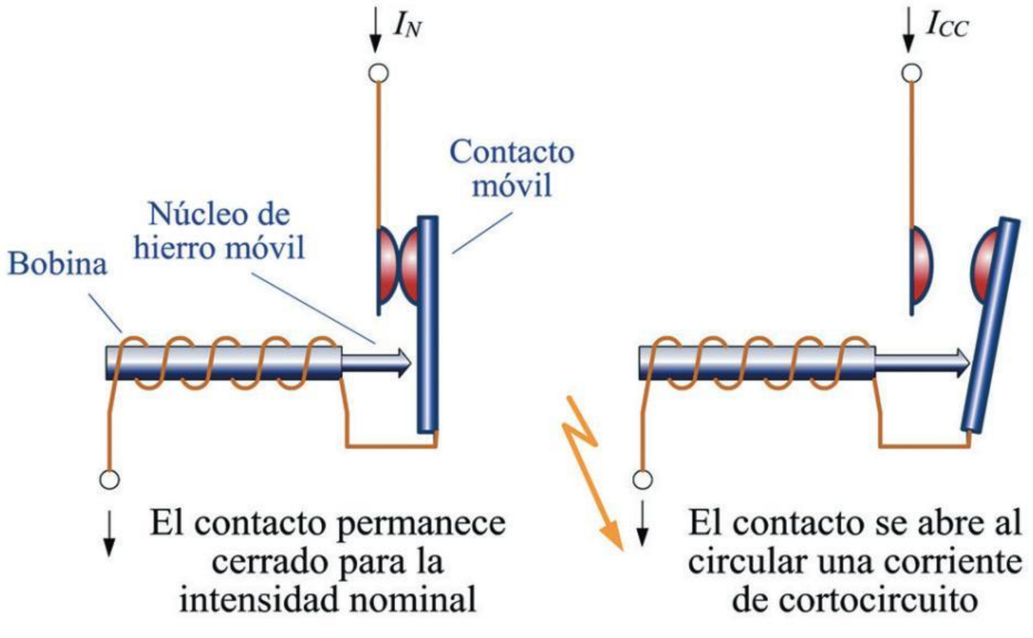


Figura 5.24. Relé magnético.

© Ediciones Paraninfo

Relé térmico (Figura 5.25): se encarga de la protección de las sobrecargas. La corriente se hace pasar por un elemento bimetálico similar al de un termostato. Cuando la intensidad se eleva a valores considerados de sobrecarga, la lámina bimetálica se calienta por efecto Joule, por lo que se deforma y actúa sobre el sistema de apertura del interruptor.

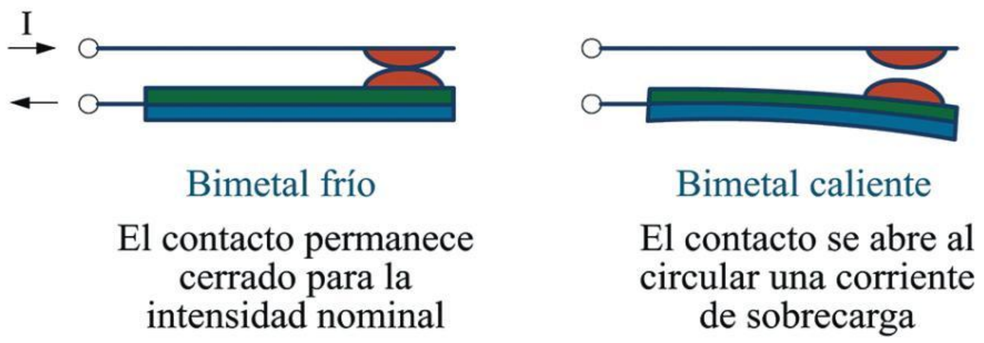


Figura 5.25. Relé térmico.

El relé térmico garantiza la protección de las sobrecargas mucho mejor que el fusible.

Así, por ejemplo, un automático de 20 A tardaría 40 segundos en cortar el circuito cuando se dé una sobrecarga de 35 A, según las curvas de la Figura 5.23. Recuérdese que un cartucho fusible de 20 A tardaba en fundir 90 minutos en esta misma situación.

En un interruptor automático se conectan en serie el relé magnético y el térmico, de tal forma que, en el caso de que fluya por él una corriente de cortocircuito o una de sobrecarga superior a la del calibre del mismo, este produzca la desconexión (Figura 5.26).

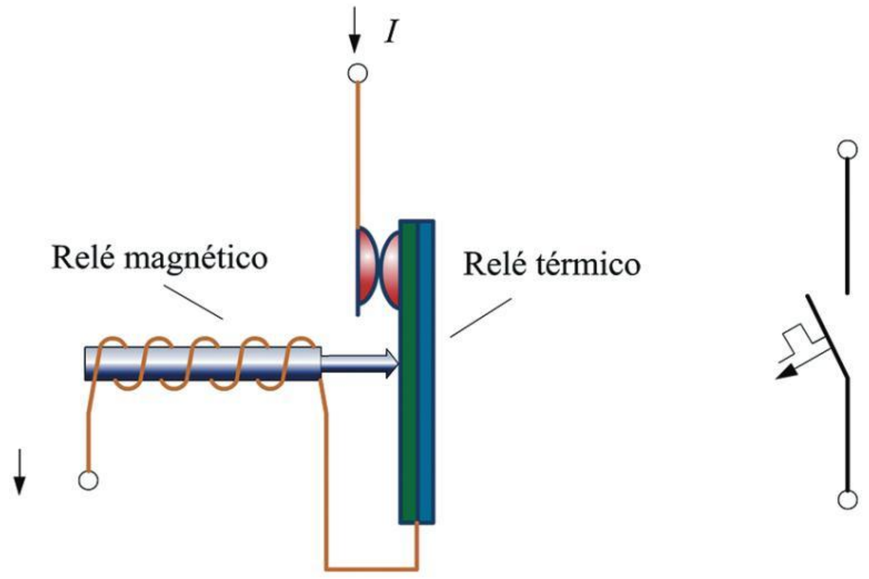


Figura 5.26. Relé magnético y térmico de un interruptor automático.

En la Figura 5.27 se muestra el aspecto interno de un interruptor automático (también llamado interruptor magnetotérmico), donde se incluye el relé magnético y el térmico conectados en serie.

Al igual que se fabricaban diferentes tipos de cartuchos fusibles en función del tiempo de respuesta ante el cortocircuito, los interruptores automáticos también se fabrican con diferentes curvas de desconexión en función de los sistemas que se vayan a proteger. Las más utilizadas son las que se explican en la Figura 5.28.

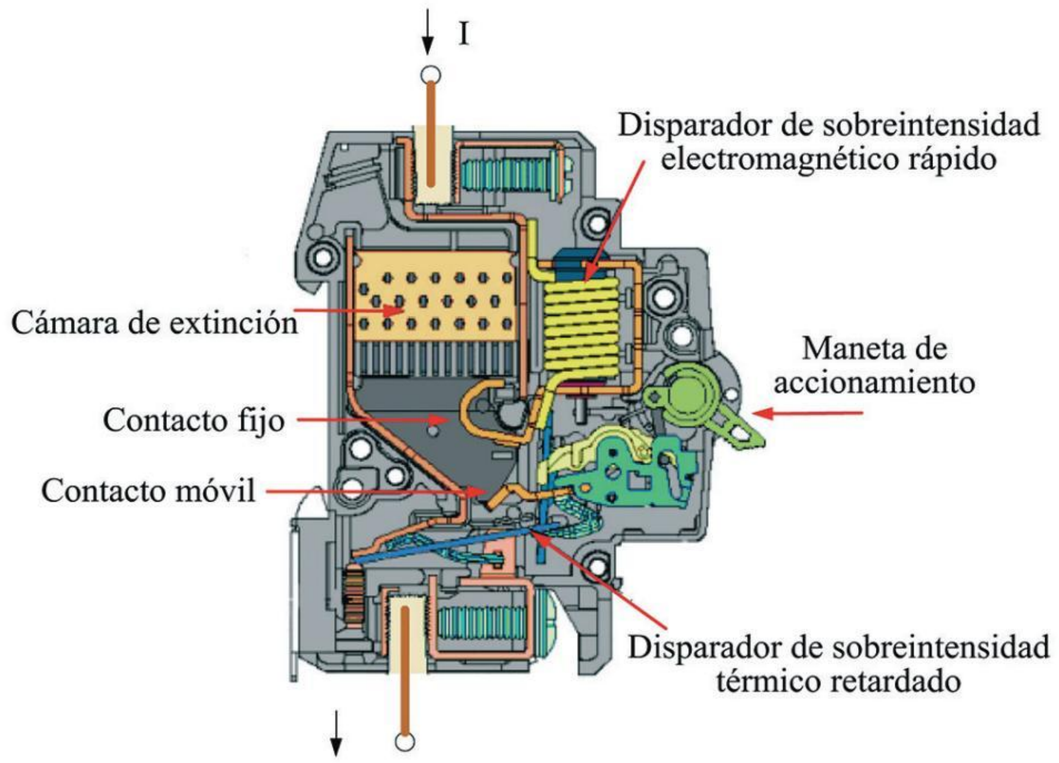


Figura 5.27. Aspecto interno de un interruptor automático.

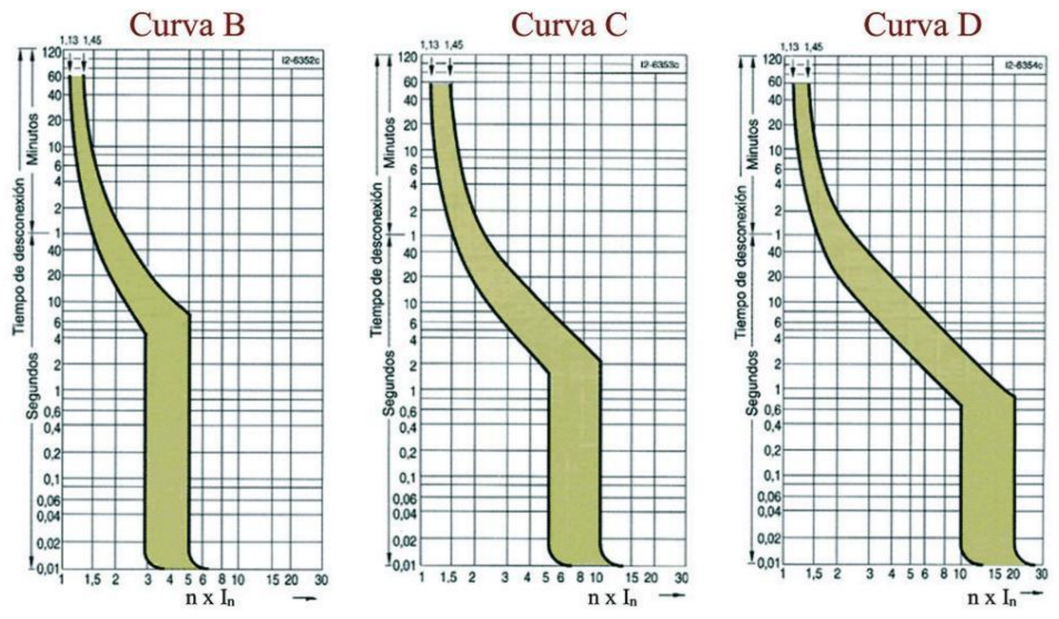


Figura 5.28. Curvas de desconexión de los interruptores automáticos.

Curva de disparo B: instalaciones de tipo general, como viviendas, donde se vayan a prever intensidades de cortocircuito reducidas (grandes longitudes de los conductores).

Curva de disparo C: instalaciones donde se vayan a prever grandes intensidades de conexión o arranque (lámparas de descarga, motores, etc.).

Curva de disparo D: instalaciones que generen elevados impulsos de intensidad de corriente (transformadores, condensadores, etc.).

5.3.7. Los motores pueden producir sobrecargas en su funcionamiento

Cuando un motor trabaja por encima de sus valores nominales se dice que está sometido a una sobrecarga. En otras palabras, cuando nosotros exigimos a un motor que

© Ediciones Paraninfo

arrastre una carga mecánica más alta que la nominal, este lo hace a costa de absorber más intensidad de la red. Estas sobrecargas aumentan la temperatura de los bobinados del motor y si no se cortan en un tiempo prudencial los destruyen (el aislante de los conductores de las bobinas es una especie de barniz que se destruye con facilidad a una cierta temperatura).

Tomemos, por ejemplo, el motor de un ascensor. Supongamos que el ascensor está preparado para transportar a cuatro personas y, sin embargo, se suben seis, y además pesadas. El motor que mueve el ascensor sigue funcionando, pero lo hace de forma forzada y a costa de absorber una mayor intensidad de corriente de la red. La única manera de cortar esta sobrecarga, antes de que el motor se sobrecaliente e incluso llegue a quemarse, es incorporar en el circuito un relé térmico especial para la protección de motores (Figura 5.29).

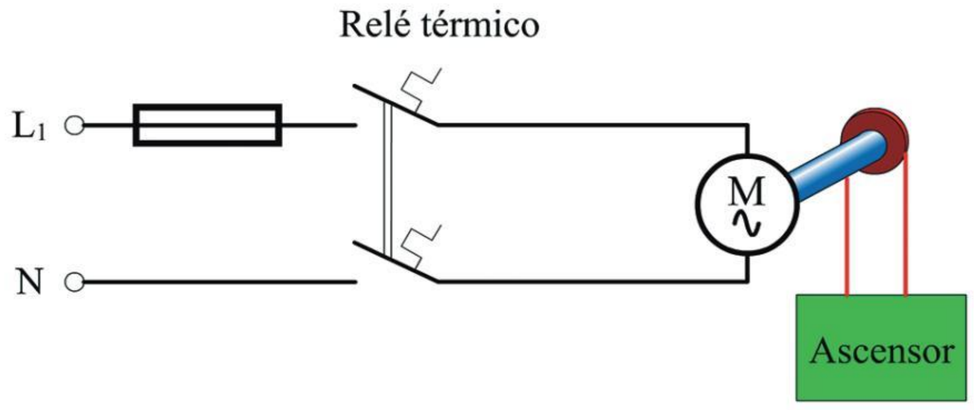
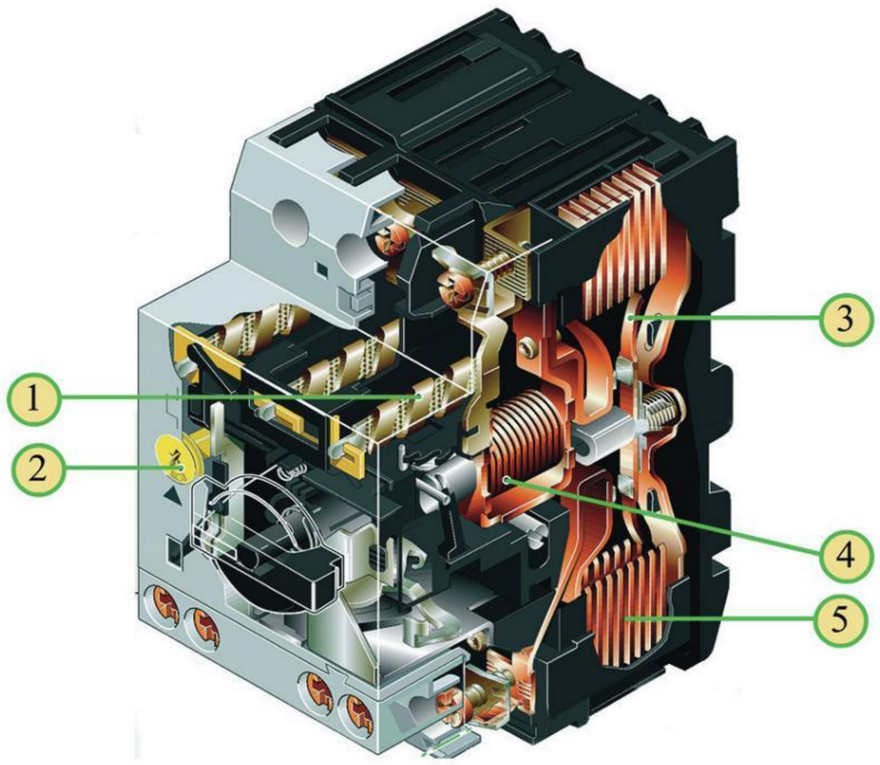


Figura 5.29. Relé térmico protegiendo un motor contra sobrecargas.

Para la protección de motores se fabrican interruptores térmicos especiales, como el que se muestra en la Figura 5.30 para motores trifásicos de corriente alterna. Este tipo de interruptores nos dan la posibilidad de poder regular la intensidad de desconexión.



1. Disparador de sobrecarga (bimetal)
2. Botón de regulación de intensidad de sobrecarga
3. Contactos
4. Disparador electromagnético de cortocircuito
5. Cámara de corte (apagachispas)

Figura 5.30. Relé magnetotérmico para la protección de motores trifásicos (Cortesía de Moeller.)

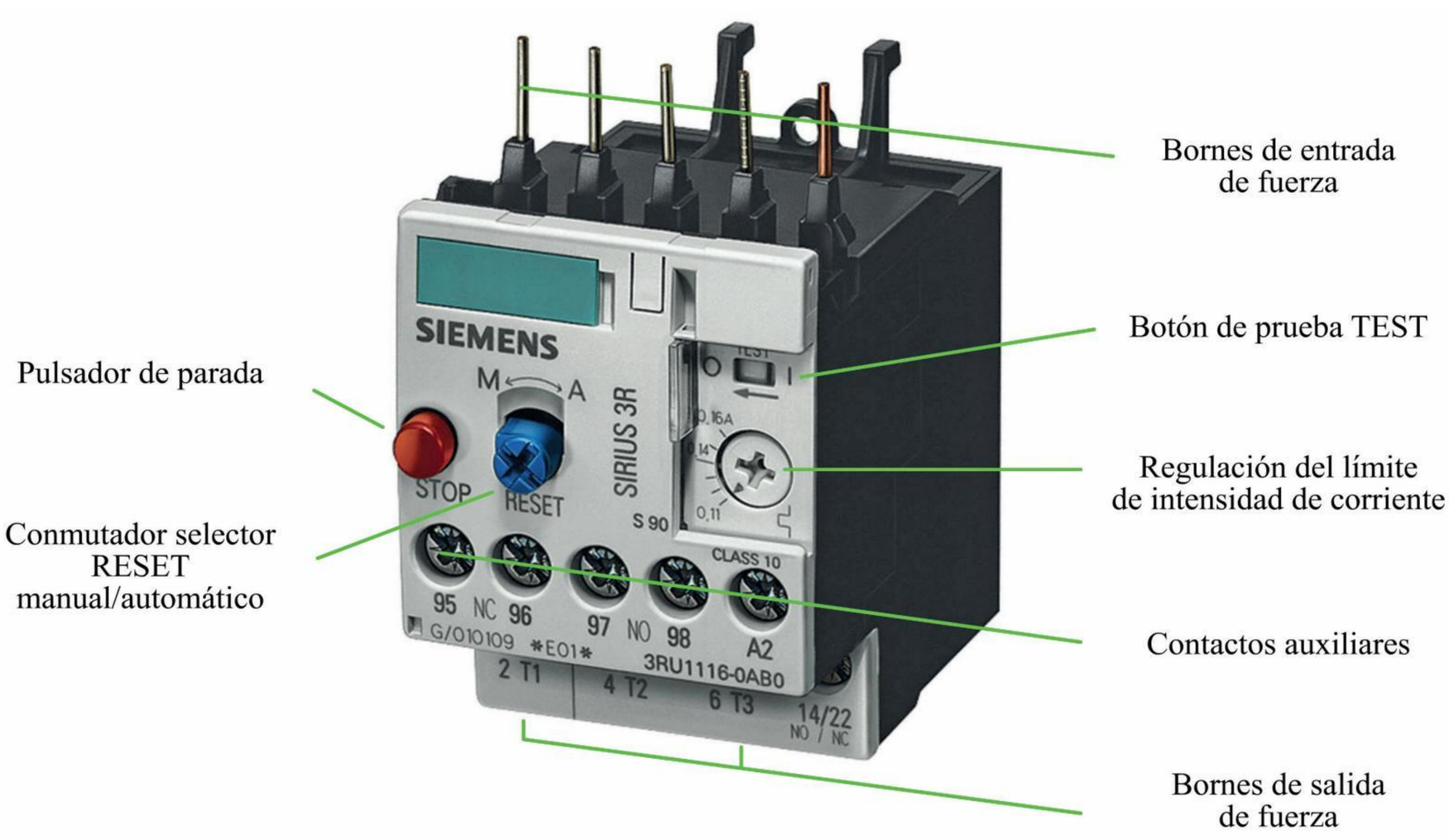


Figura 5.31. Relé térmico para protección de motores (Cortesía de Siemens).

© Ediciones Paraninfo

Comprobación práctica en el laboratorio

5.1. Comprobación práctica de las diferentes cargas de trabajo de un motor. Con esta actividad vamos a comprobar que los motores no trabajan siempre a la misma potencia. Para llevarla a cabo necesitaremos un motor monofásico, un amperímetro, un vatímetro y un freno, por ejemplo, de polvo magnético, tal como se muestra en el esquema de conexiones de la Figura 5.32. Con ayuda del profesor, arranca el motor y somételo a diferentes pares de frenado. Anota los resultados obtenidos de las diferentes lecturas de los aparatos de medida.

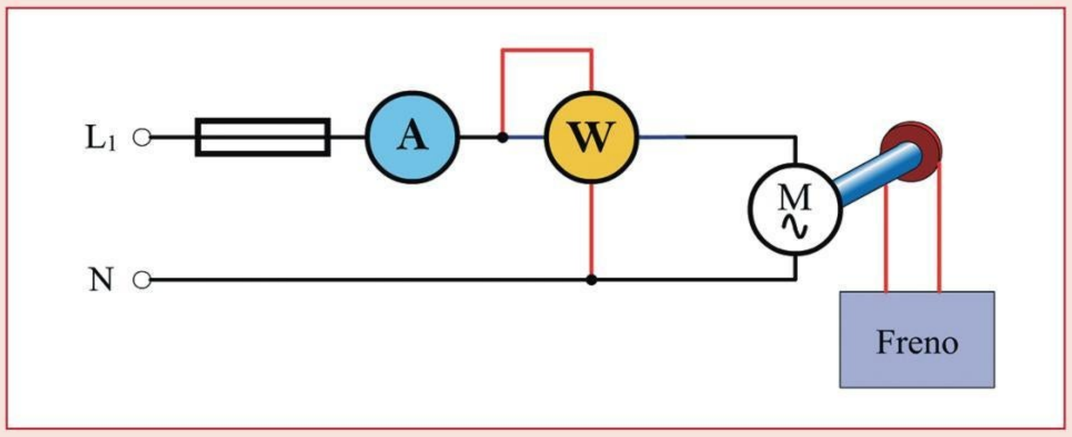


Figura 5.32.

Habrás podido comprobar que:

- El motor cuando arranca absorbe una intensidad de corriente muy elevada, que se va suavizando cuando se alcanzan las revoluciones nominales del mismo.
- Estando el freno desactivado el motor no arrastra carga alguna, exceptuando la suya propia, por lo que trabaja en vacío y tanto la intensidad de corriente como la potencia a la que trabaja son inferiores a las nominales (las características nominales aparecen indicadas en la placa de características del motor).
- Según se va sometiendo al motor a pares de frenado crecientes (trabajo en carga), la intensidad y la potencia van aumentando, pudiendo superar, incluso, valores muy superiores a los nominales (sobrecarga).

Una vez analizado el funcionamiento del motor para diferentes cargas de trabajo, alimenta el motor a través de un relé térmico regulado para interrumpir el circuito a la intensidad nominal del motor. Seguidamente arranca el motor y mediante el freno somételo a diferentes regímenes de carga hasta conseguir el disparo del térmico. Ahora aumenta la intensidad de disparo del relé térmico y repite el ensayo. Anota los resultados obtenidos y compáralos.

Como en otras ocasiones, al finalizar esta actividad deberás elaborar un informe-memoria sobre la actividad desarrollada, indicando los resultados obtenidos y estructurándolos en los apartados necesarios para una adecuada documentación de las mismas (descripción del proceso seguido, medios utilizados, esquemas y planos utilizados, cálculos, medidas, etc.).

© Ediciones Paraninfo

Actividades de comprobación

5.1. ¿Cómo se regula, habitualmente, la temperatura de los elementos de caldeo?

a) Con el termostato.

b) Conectando resistencias en serie.

c) Con el termopar.

5.2. Indica las ventajas de la utilización de los interruptores automáticos.

a) Protegen adecuadamente en cortocircuitos y sobrecargas.

b) Protegen bien en cortocircuitos y no tan bien en sobrecargas.

c) La reposición del dispositivo, una vez actuado, es muy compleja.

5.3. Determina el calibre del cartucho fusible necesario para la protección de cortocircuitos de un horno de 2.000 W a 400 V.

5.4. Teniendo en cuenta que la tensión de uso doméstico es 230 V, averigua la potencia que se puede conectar en los diferentes circuitos de una vivienda de grado básico sin que actúen los interruptores automáticos.

5.5. Una plancha para la ropa transmite casi todo el calor por:

a) Convección.

b) Radiación.

c) Conducción.

5.6. Un radiador eléctrico transmite casi todo el calor por:

a) Convección.

b) Radiación.

c) Conducción.

5.7. Una estufa de rayos infrarrojos transmite la mayor parte del calor por:

a) Convección.

b) Radiación.

c) Conducción.

5.8. El sistema de calefacción con el que se puede beneficiar de tarifas de discriminación horaria de precio reducido es:

a) Radiador eléctrico.

b) Radiador por convección forzada.

c) Acumulador de calor.

5.9. En un termo eléctrico para evitar la corrosión interna del calderín se emplea:

a) Sonda del termostato.

b) Ánodo de magnesio.

c) Resistencia eléctrica blindada.

5.10. Indica cuál de las siguientes afirmaciones sobre el cortocircuito es verdadera:

a) Se produce cuando se unen accidentalmente dos conductores con tensión.

b) La intensidad de corriente de cortocircuito tiende a ser muy elevada.

c) Para proteger las instalaciones del cortocircuito se emplea el relé térmico.

5.11. Indica cuál de las siguientes afirmaciones sobre la sobrecarga es verdadera:

a) Se produce cuando se unen accidentalmente dos conductores con tensión.

b) La intensidad de sobrecarga no es tan elevada como la de cortocircuito.

c) Para proteger las instalaciones de las sobrecargas se emplea el relé térmico.

d) El motor es el receptor que más fácilmente puede producir sobrecargas.

5.12. Indica qué afirmaciones son ciertas en relación con el uso del fusible para la protección contra cortocircuitos y sobrecargas.

a) Protegen muy bien contra el cortocircuito, pero son muy lentos con las sobrecargas.

b) Son muy fáciles de reponer.

c) Poseen un poder de corte muy superior a los interruptores automáticos.

5.13. Indica qué afirmaciones son ciertas en relación con el uso del interruptor automático para la protección contra cortocircuitos y sobrecargas.

a) Protegen muy bien contra el cortocircuito y las sobrecargas.

b) Son muy fáciles de reponer.

c) Su poder de corte es muy elevado.

5.14. El poder de corte de un fusible se expresa en:

a) kA.

b) kW.

c) kj.

© Ediciones Paraninfo

5.15. En la Figura 5.33 se muestran las curvas de fusión de una gama de cartuchos fusibles comerciales. Determina cuál será el tiempo de fusión de los siguientes fusibles para una corriente de 50 A:

a) Fusible de calibre 4 A.

b) Fusible de calibre 6 A.

c) Fusible de calibre 10 A.

d) Fusible de calibre 16 A.

e) Fusible de calibre 20 A.

f) Fusible de calibre 25 A.

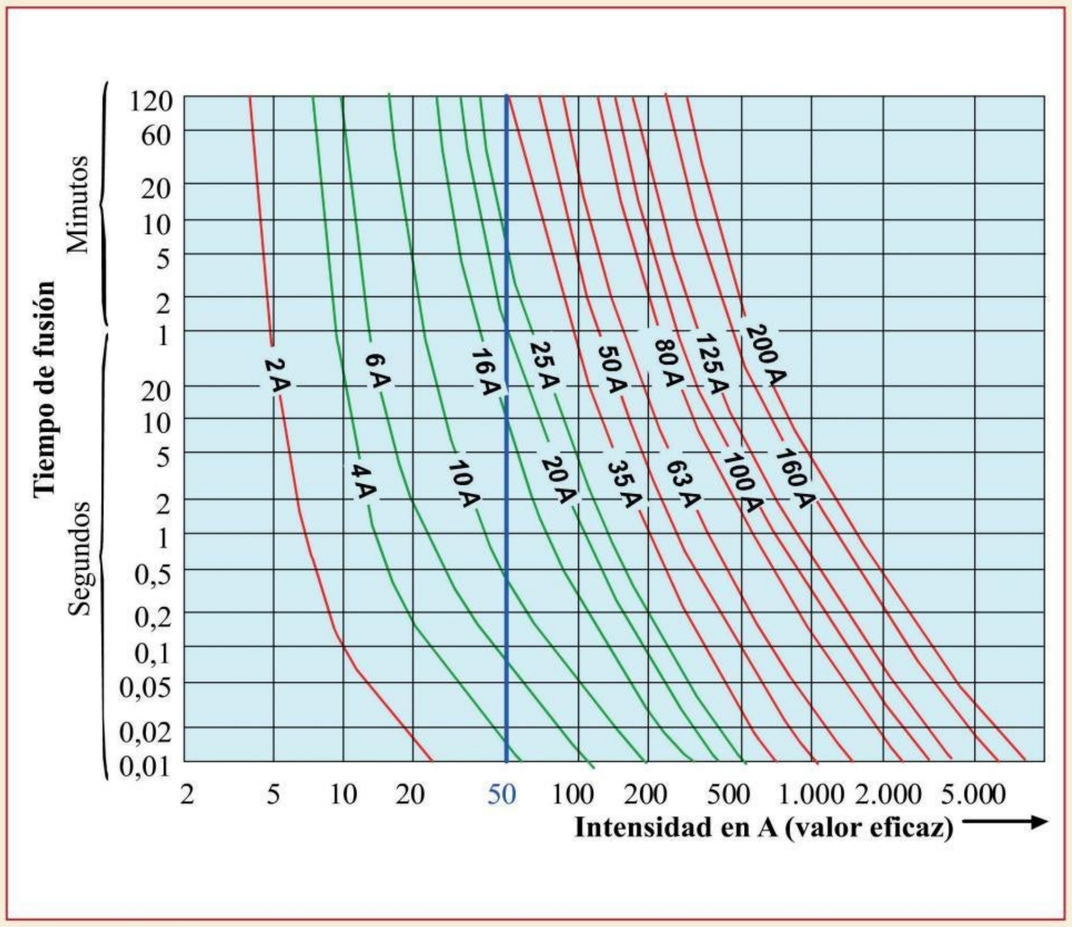


Figura 5.33.

5.16. En la Figura 5.34 se muestra el esquema correspondiente a un cuadro de protección con diferentes fusibles. La línea que alimenta al circuito E suministra energía a un motor de 5 A de intensidad nominal. En caso de cortocircuito en el circuito E:

a) La línea del motor estará protegida, pero el fusible que cortará el circuito más rápido será el F4F de 10 A, dejando sin servicio eléctrico no solo al circuito E, sino también a todas las líneas que alimenta el fusible F4F, como por ejemplo la línea D.

b) Es correcto, ya que el fusible de 16 A es suficiente para proteger una línea de 5 A.

c) No se cumple con la selectividad de los cortocircuitos fusibles.

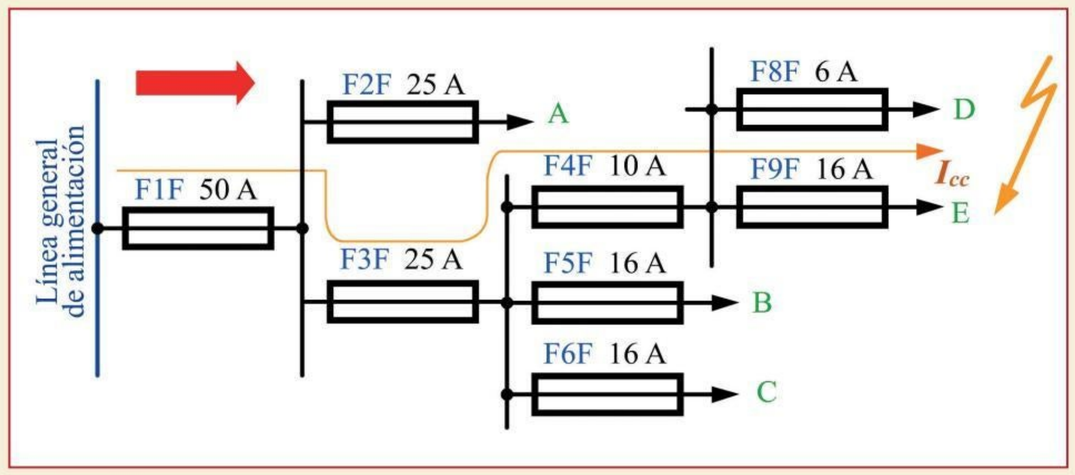


Figura 5.34.

5.17. En el cuadro de protección de la Figura 5.34, la línea que alimenta al circuito D suministra energía a un grupo de lámparas de 6 A de intensidad nominal. En caso de cortocircuito en el circuito D:

a) Se cumple la selectividad de los fusibles, y cortará el circuito únicamente el fusible F8F que alimenta exclusivamente al circuito D.

b) El calibre del fusible F8F es demasiado ajustado, y podría cortar el circuito de forma intempestiva sin que hubiese un cortocircuito.

c) También se fundiría el fusible F4F, dejando sin servicio a los circuitos D y E.

5.18. ¿Qué tipo de fusible es más adecuado para la protección de motores?

a) gL.

b) gR.

c) aM.

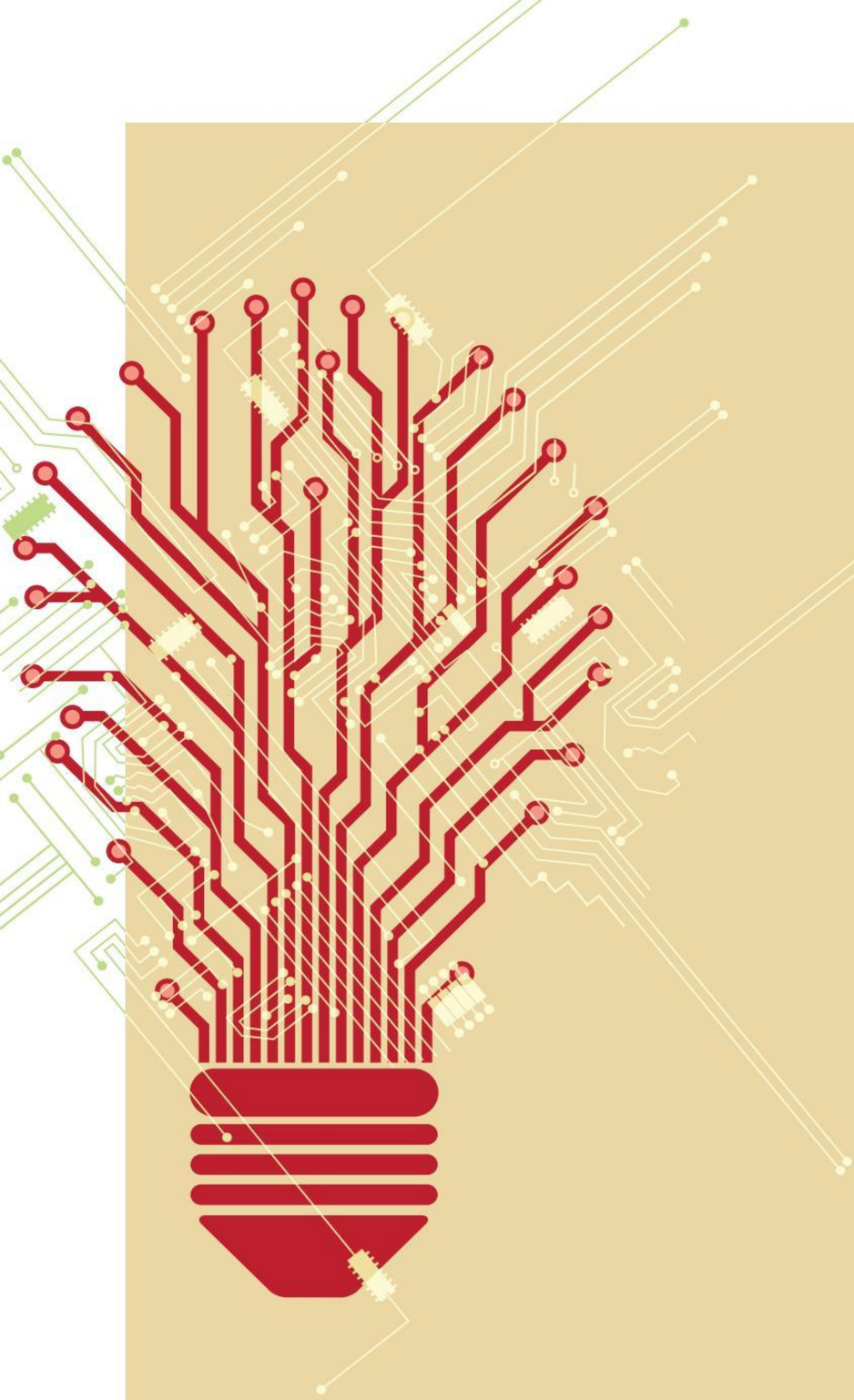
5.19. ¿Qué curva de desconexión de un interruptor automático es más adecuada para la protección de una instalación con motores eléctricos.

a) B.

b) C.

c) D.

© Ediciones Paraninfo



6 Circuitos serie, paralelo y mixto

Contenidos

- **6.1.** Acoplamiento de receptores en serie
- **6.2.** Acoplamiento de receptores en paralelo
- **6.3.** Circuitos mixtos

El montaje de receptores en serie y paralelo ocupa un lugar especial dentro de la Electrotecnia. El cálculo de las magnitudes eléctricas que se dan en los circuitos, como tensión, intensidad, resistencia y potencia, depende de la forma en que están acoplados los receptores.

Por lo general, en la industria y en las viviendas, los receptores se instalan en paralelo. No obstante, en muchas ocasiones aparecen partes de la instalación que quedan interconectadas en serie, por lo que es muy importante realizar también un estudio detallado de esta forma de conexión.

Objetivos

- Distinguir entre acoplamiento en serie y en paralelo.
- Realizar los cálculos precisos para resolver un circuito eléctrico con varias cargas conectadas entre sí.
- Medir las magnitudes en un circuito serie, paralelo y mixto e interpretar y relacionar sus resultados.
- Explicar cualitativamente los fenómenos derivados de una alteración en un elemento de un circuito eléctrico sencillo y describir las variaciones previstas en los valores de tensión y corriente.

6.1. Acoplamiento de receptores en serie

Acoplar varios receptores en serie consiste en ir conectando el terminal de salida de uno con el de entrada del otro, sucesivamente.

En el esquema de la Figura 6.1 se han representado tres resistencias (R_1, R_2, R_3) conectadas en serie. Al cerrar el interruptor, el conjunto de estas tres resistencias quedará sometido a la tensión U del generador, lo que hará que surja una corriente eléctrica I, que se establecerá por todas las resistencias por igual, provocando en cada una de ellas las tensiones U_{AB}, U_{BC} y U_{CD}, respectivamente. De tal manera que la suma de dichas tensiones es igual a la aplicada al conjunto.

$$U = U_{AB} + U_{BC} + U_{CD}$$

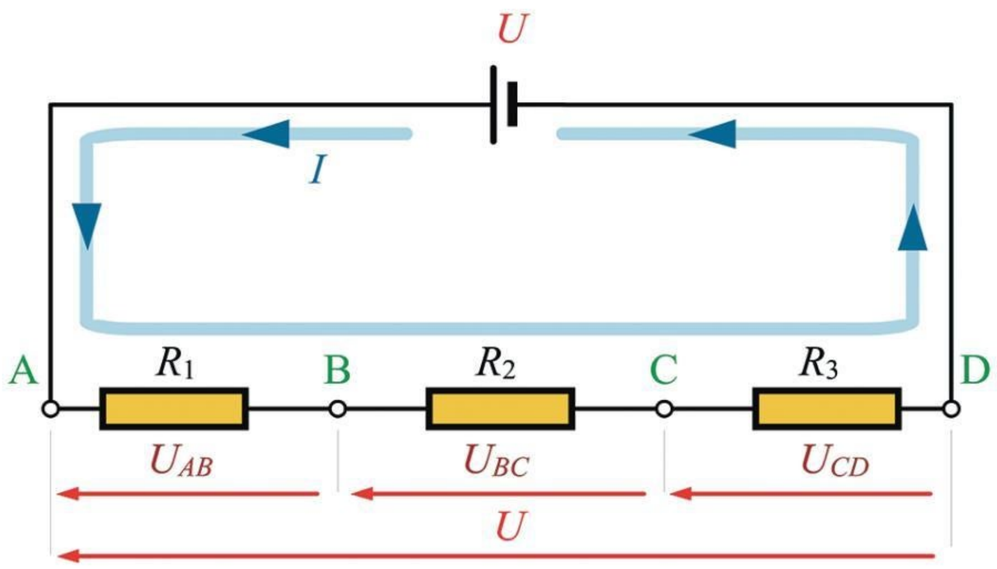


Figura 6.1. Circuito formado por tres resistencias en serie.

¿Por qué la intensidad que atraviesa todas las resistencias es la misma?

La corriente eléctrica es un flujo de electrones que, en este caso, se establece por el generador, el conductor y las tres resistencias. Como los electrones no se quedan acumulados en ningún punto del circuito, los mismos que entran por el terminal de una resistencia salen por otro terminal para, a continuación, entrar por el terminal de la siguiente resistencia, y así sucesivamente (Figura 6.2).

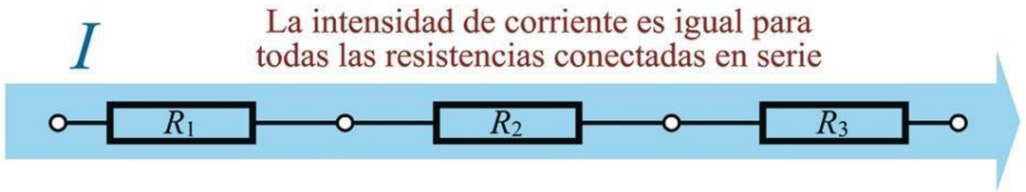


Figura 6.2. Corriente en un circuito en serie.

¿Por qué se reparte la tensión entre las resistencias?

La tensión que aparece entre dos puntos de un circuito surge gracias a la diferencia de cargas que existe entre los mismos. Sabemos que esta diferencia de cargas es la que produce la fuerza que impulsa a moverse a los electrones de un punto a otro del circuito. En un circuito serie la fuerza que provoca la tensión del conjunto irá perdiendo su efecto al realizar sucesivos trabajos en los receptores conectados en serie, y producirá lo que se conoce como caída de tensión en cada uno de ellos. Lógicamente, cabe pensar que al ser igual la corriente para todos los receptores, necesitarán más fuerza de impulsión (más tensión) aquellos que tengan mayor resistencia eléctrica (Figura 6.3).

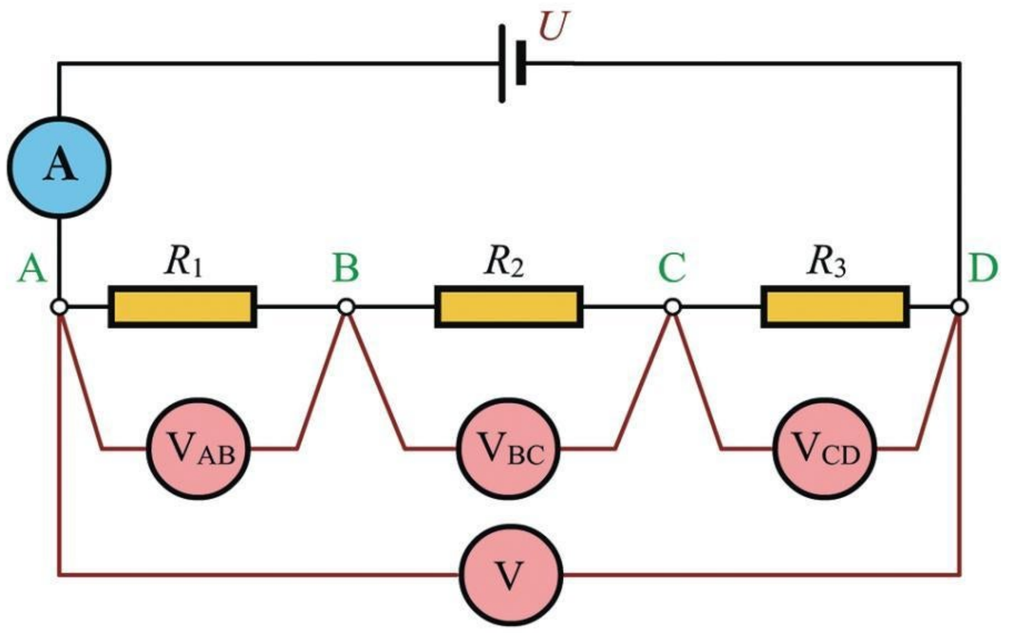


Figura 6.3. Tensiones en un circuito en serie.

¿Cómo se calculan estas caídas de tensión?

De la ley de Ohm tenemos que: $U = R \cdot I$.

Nota importante: La ley de Ohm siempre se aplica entre dos puntos concretos del circuito.

Así, por ejemplo, para determinar el valor de la tensión U_{AB}, habrá que aplicar esta ley entre los puntos A y B. Como entre estos puntos la resistencia es R_1 y la corriente I, tendremos que:

$$U_{AB} = R_1 \cdot I$$

Por la misma razón:

$$U_{BC} = R_2 \cdot I$$

$$U_{CD} = R_3 \cdot I$$

Por otro lado, como $U = U_{AB} + U_{BC} + U_{CD}$ y sustituyendo los valores de U_{AB}, U_{BC} y U_{CD} en esta ecuación, nos queda la siguiente expresión:

$$U = R_1 \cdot I + R_2 \cdot I + R_3 \cdot I$$

operando:

$$U = (R_1 + R_2 + R_3) \cdot I$$

despejando I:

$$I = \frac{U}{R_1 + R_2 + R_3} \qquad \text{(I)}$$

© Ediciones Paraninfo

Esta expresión indica que para calcular la intensidad que se establece en un circuito de resistencias en serie, basta con dividir la tensión total aplicada al circuito entre la suma de resistencias conectadas en serie.

Resistencia total o equivalente (R_T): se denomina así a la resistencia que produce los mismos efectos que todo el conjunto de resistencias (Figura 6.4).

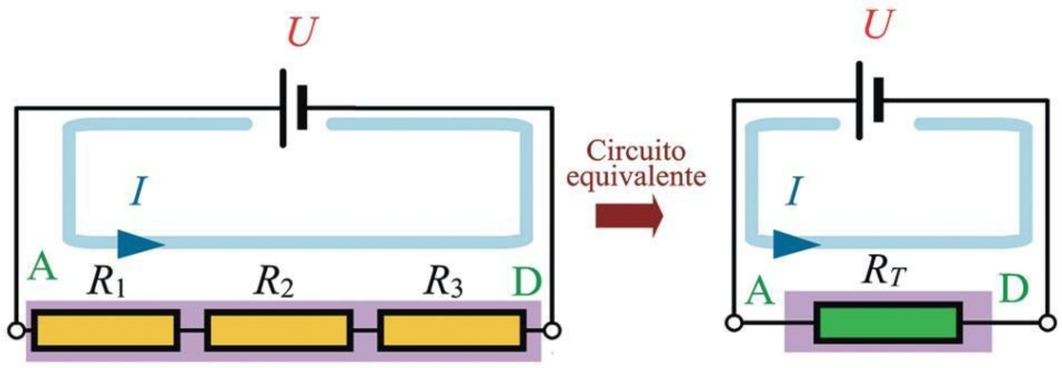


Figura 6.4. Resistencia total o equivalente.

En el circuito equivalente se cumple la ley de Ohm teniendo en cuenta toda la tensión y toda la resistencia:

Luego: $$I = \frac{U}{R_T} \qquad \text{(II)}$$

Si comparamos la expresión (I) y la (II) podemos deducir que la resistencia total o equivalente es igual a la suma de las resistencias de cada uno de los receptores:

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3$$

Potencia eléctrica de cada receptor: se aplica la expresión general de potencia eléctrica $P = U \cdot I$, teniendo en cuenta que, al igual que hicimos al aplicar la ley de Ohm, siempre se hace sobre los dos puntos concretos del circuito donde queremos calcular la potencia. De esta forma, tenemos que:

$$P_1 = U_{AB} \cdot I; \quad P_2 = U_{BC} \cdot I; \quad P_3 = U_{CD} \cdot I$$

La potencia total la calculamos sumando cada una de las potencias parciales:

$$P_T = P_1 + P_2 + P_3$$

o empleando la expresión de potencia y aplicando la tensión total aplicada:

$$P_T = U \cdot I$$

En un circuito en serie la intensidad de corriente es igual para todas las resistencias y la tensión aplicada se reparte entre ellas.

Actividad resuelta 6.1

Se conectan a una batería de acumuladores de 24 V dos resistencias en serie de 20 Ω y 10 Ω, respectivamente (Figura 6.5). Se quiere determinar la intensidad que recorre el circuito, la tensión a la que queda sometida cada resistencia, la potencia de cada una de las resistencias y la potencia total del circuito.

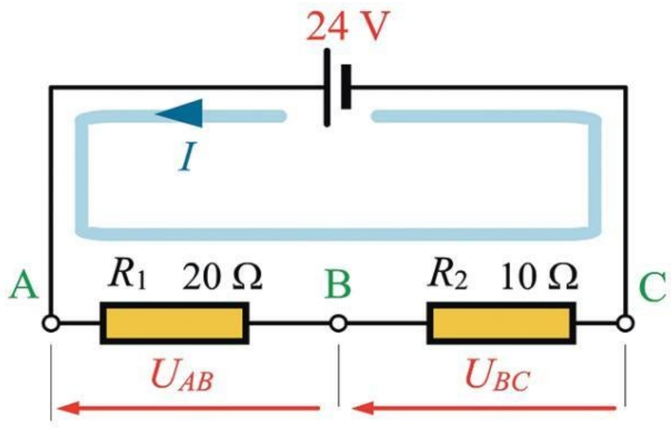


Figura 6.5.

Solución:

Primero, calculamos la resistencia total:

$$R_T = R_1 + R_2 + = \ldots = 30\ \Omega$$

La intensidad será entonces:

$$I = \frac{U}{R_T} = \ldots = 0{,}8\ \text{A}$$

La tensión a que queda sometida cada resistencia es:

$$U_{AB} = R_1 \cdot I = \ldots = 16\ \text{V}$$

$$U_{BC} = \ldots = \ldots = 8\ \text{V}$$

Comprueba la igualdad:

$$U = U_{AB} + U_{BC} = \ldots = 24\ \text{V}$$

La potencia de cada resistencia es:

$$P_1 = U_{AB} \cdot I = \ldots = 12{,}8\ \text{W}$$

$$P_2 = \ldots = \ldots = 6{,}4\ \text{W}$$

La potencia total es:

$$P_T = U \cdot I = 24 \cdot 0{,}8 = 19{,}2\ \text{W}$$

Comprueba la igualdad:

$$P_T = P_1 + P_2 = \ldots = 19{,}2\ \text{W}$$

Actividad resuelta 6.2

En el circuito de la Figura 6.6, la tensión que se ha medido con un voltímetro en la resistencia R_2 es de 100 V. Con

© Ediciones Paraninfo

estos datos, calcula la intensidad de corriente por el circuito, así como la tensión y potencia de cada una de las resistencias y del conjunto.

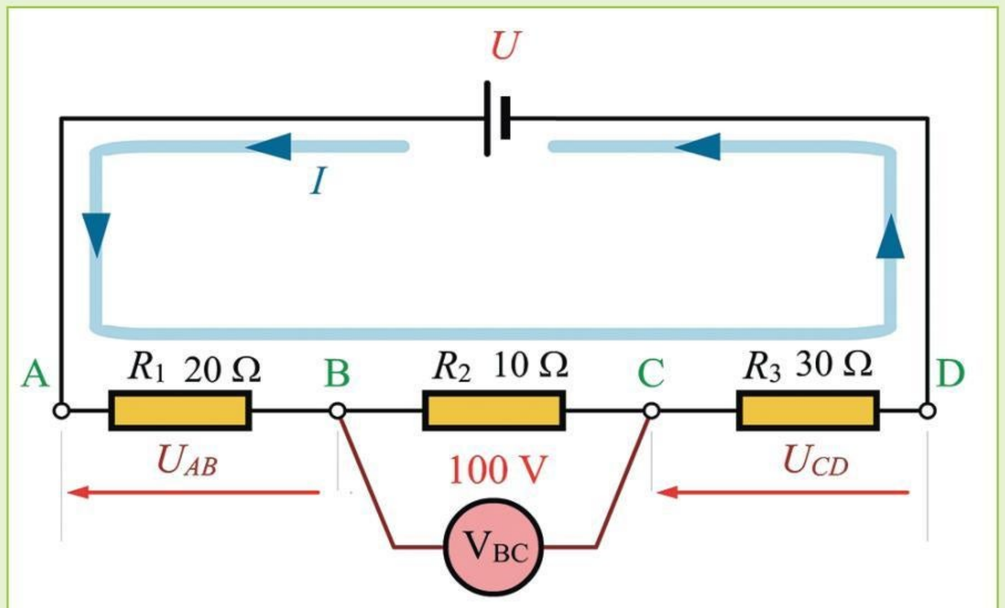


Figura 6.6.

Solución:

Si aplicamos la ley de Ohm entre los puntos B y C, podemos calcular la intensidad de corriente por R_2:

$$I = \frac{U_{BC}}{R_2} = \ldots = 10 \text{ A}$$

Como esta intensidad es igual para todas las resistencias conectadas en serie, la tensión a la que quedan sometidas el resto de las resistencias es:

$$U_{AB} = R_1 \cdot I = \ldots = 200 \text{ V}$$

$$U_{CD} = \ldots = \ldots = 300 \text{ V}$$

La tensión total del circuito es entonces:

$$U = U_{AB} + U_{BC} + U_{CD} = \ldots = 600 \text{ V}$$

La potencia de cada resistencia y del conjunto es:

$$P_1 = U_{AB} \cdot I = 200 \cdot 10 = 2.000 \text{ W}$$

$$P_2 = \ldots = \ldots = 1.000 \text{ W}$$

$$P_3 = \ldots = \ldots = 3.000 \text{ W}$$

$$P_T = U \cdot I = 600 \cdot 10 = 6.000 \text{ W}$$

Comprueba la igualdad:

$$P_T = P_1 + P_2 + P_3 \ldots = 6.000 \text{ W}$$

Actividad resuelta 6.3

Se desea aprovechar unas lámparas de 115 V/40 W para conectarlas a una red de 230 V. ¿Cuántas lámparas será necesario montar en serie? ¿Qué intensidad recorrerá el circuito? ¿Cuál será la potencia total consumida por el conjunto de lámparas? ¿Cuál será la resistencia de cada lámpara y la equivalente al conjunto de las mismas?

Solución:

Como todas las lámparas son iguales y de la misma tensión, el número que hay que conectar en serie será (Figura 6.7):

$$\frac{230 \text{ V}}{115 \text{ V}} = 2 \text{ lámparas}$$

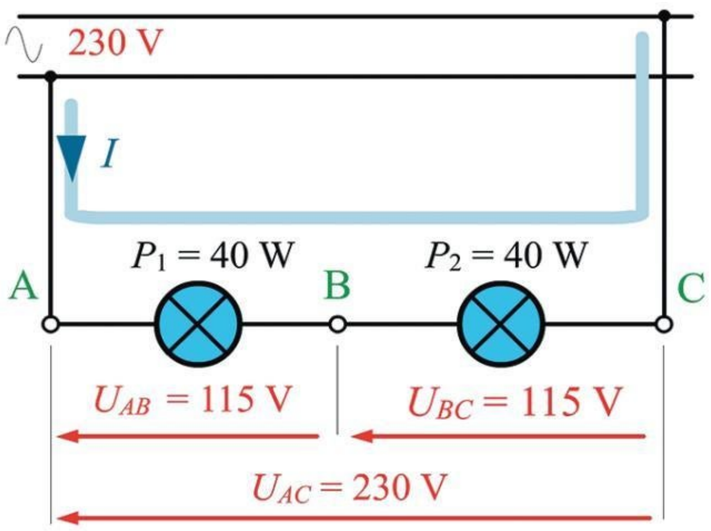


Figura 6.7.

La potencia total será: $P_T = 2 \cdot 40 = 80$ W.

La intensidad la podemos calcular así: $P_T = U \cdot I$; despejando:

$$I = \frac{P_T}{U} = \frac{80}{230} = 0{,}35 \text{ A}$$

Como todas las lámparas son iguales, sus resistencias también lo serán.

$$R_1 = \frac{U}{I} = \frac{115}{0{,}35} = 328{,}6 \ \Omega$$

$$R_T = 328{,}6 + 328{,}6 = 657{,}2 \ \Omega$$

Actividad resuelta 6.4

Para que una lámpara incandescente de 110 V/40 W no se funda al conectarla a una red de 230 V se le conecta una resistencia en serie. Calcula el valor óhmico de esta resistencia, así como su potencia.

Solución:

Lo más importante para resolver este tipo de problemas es dibujar un esquema eléctrico donde se puedan ver las diferentes magnitudes del circuito eléctrico, como, por ejemplo, el que se muestra en la Figura 6.8.

Se puede deducir fácilmente que la tensión a que debe quedar la resistencia es $U_{AB} = 230 - 110 = 120$ V.

Aplicando la expresión de la potencia entre los bornes de la lámpara (puntos B y C) determinamos la intensidad del circuito:

© Ediciones Paraninfo

$$I = \frac{P_L}{U_{BC}} = \frac{40}{110} = 0{,}36 \text{ A}$$

Si aplicamos ahora la ley de Ohm entre los extremos de la resistencia (puntos A y B) calculamos su valor óhmico.

$$R = \frac{U_{AB}}{I} = \frac{120}{0{,}36} = 333\ \Omega$$

La potencia de esta resistencia es:

$$P = U_{AB} \cdot I = 120 \cdot 0{,}36 = 43{,}2 \text{ W}$$

Es importante tener en cuenta este último dato, ya que nos indica que a la vez que la resistencia provoca una caída de tensión de 120 V, lo hace a costa de producir un consumo de 43,2 W, que se disipa en forma de calor como una potencia perdida.

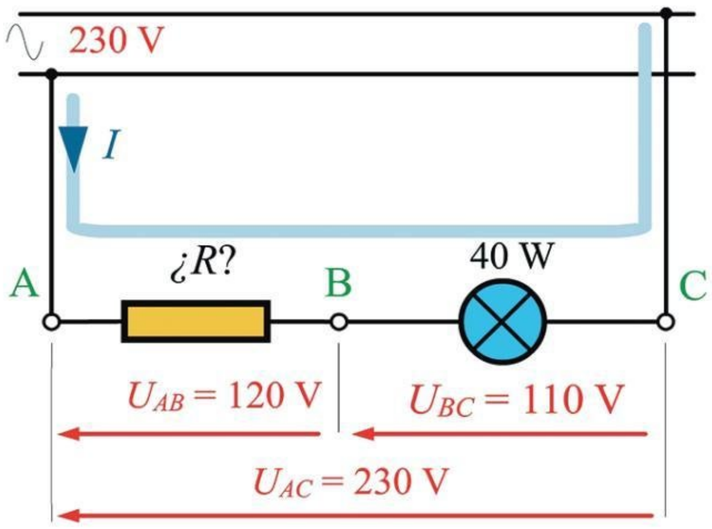


Figura 6.8.

6.1.1. Aplicaciones prácticas del acoplamiento en serie

En algunas instalaciones de iluminación, como por ejemplo las luces de un árbol de navidad, se conectan las lámparas en serie. El principal inconveniente que se presenta es que cuando se funde una lámpara el circuito se interrumpe y, por tanto, dejan de lucir todas las demás.

Otra aplicación consiste en la construcción de *reostatos*. Estos son resistencias variables que al ser acopladas en serie con un receptor provocan una caída de tensión que se modifica al variar la resistencia del reostato, con lo que se consigue regular la intensidad, tensión y potencia de dicho receptor (Figura 6.9).

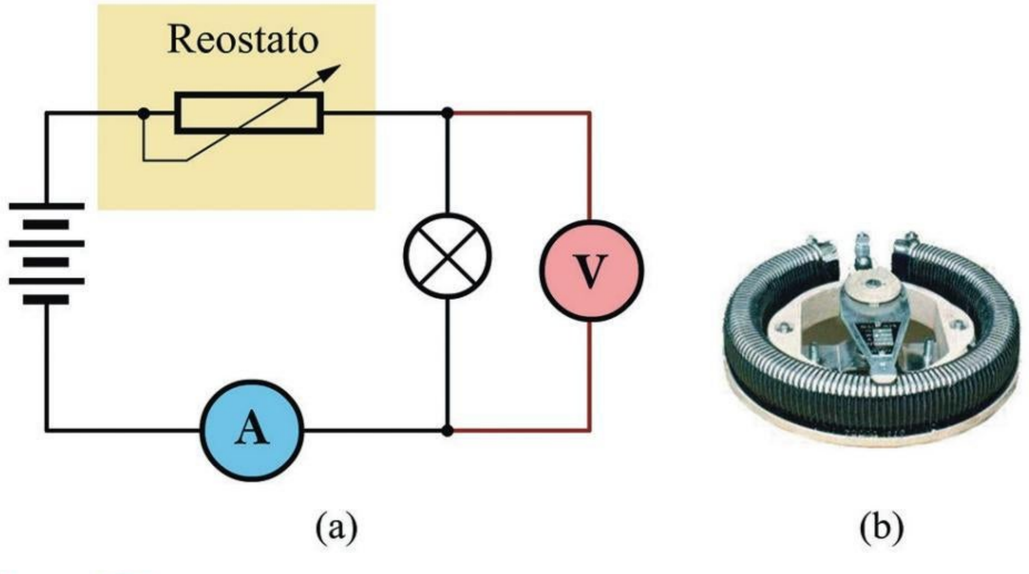


Figura 6.9. (a) Al colocar una resistencia variable en serie con un receptor se consigue regular la intensidad, tensión y potencia de aquel. (b) Reostato toroidal.

Actividad resuelta 6.5

Para regular la intensidad que recorre un receptor eléctrico de 10 ohmios de resistencia se conecta en serie con él un reostato. Determina los valores óhmicos que habrá de tener dicho reostato para conseguir que la intensidad de corriente esté entre 1 y 10 A al aplicar al conjunto una tensión de 230 V.

Solución:

Calcularemos primero la resistencia total del circuito serie formado por la resistencia R del receptor y R_r del reostato para que la corriente sea de 1 A al aplicar 230 V:

$$I = \frac{U}{R_T}\text{, despejando } R_T = \frac{U}{I} = \frac{230}{1} = 230\ \Omega$$

Como $R_T = R + R_r$, despejando:

$$R_r = R_T - R = 230 - 10 = 220\ \Omega$$

Para la corriente de 10 A tendremos que:

$$R_T = \frac{230}{10} = 23\ \Omega \qquad R_r = 23 - 10 = 13\ \Omega$$

Por lo que el reostato deberá regular su resistencia entre 13 y 220 Ω.

La tensión y potencia que se dan en el receptor R entre estos dos valores será:

a) Para $I = 1$ A

$$U_R = R \cdot I = 10 \cdot 1 = 10 \text{ V}$$

$$P_R = U_R \cdot I = 10 \cdot 1 = 10 \text{ W}$$

b) Para $I = 10$ A

$$U_R = R \cdot I = 10 \cdot 10 = 100 \text{ V}$$

$$P_R = U_R \cdot I = 100 \cdot 10 = 1.000 \text{ W}$$

Por otro lado, al pasar corriente por el reostato este produce una potencia P_r, que se pierde en forma de calor, y que será:

a) Para $I = 1$ A: $P_r = R_r \cdot I^2 = 220 \cdot 1^2 = 220$ W

b) Para $I = 10$ A: $P_r = R_r \cdot I^2 = 13 \cdot 10^2 = 1.300$ W

De este ejemplo se puede deducir que el reostato no es muy buena solución para regular corrientes de carga considerables, dada la elevada potencia perdida que se desarrolla en él. En la práctica, hoy solo se emplean reostatos o resistencias variables en los circuitos en que las corrientes son muy pequeñas (del orden de algunos miliamperios), como

© Ediciones Paraninfo

es el caso de los potenciómetros, resistencias ajustables, etc., en aplicaciones de circuitos electrónicos. Las nuevas tecnologías han encontrado medios más eficaces de regulación a base de semiconductores.

Actividad propuesta 6.1

En la Tabla 6.1 aparecen los datos de seis circuitos diferentes donde se conectan tres resistencias en serie. Averigua las magnitudes desconocidas.

Tabla 6.1.



Ejercicio	1.º	2.º	3.º	4.º	5.º	6.º
R_1 (Ω)	100	4	?	?	?	?
R_2 (Ω)	50	6	5	?	100	?
R_3 (Ω)	200	?	?	?	?	10
U_{AB} (V)	?	?	?	?	?	20
U_{BC} (V)	?	?	?	10	10	50
U_{CD} (V)	?	?	?	10	?	?
P_1 (W)	?	?	10	10	5	?
P_2 (W)	?	?	?	?	?	?
P_3 (W)	?	?	?	?	?	?
R_T (Ω)	?	?	?	?	?	?
U_T (V)	250	10	20	?	100	200
I_T (A)	?	0,5	1	10	?	?
P_T (W)	?	?	?	?	?	?

La solución a esta Actividad propuesta la puedes encontrar dentro del MATERIAL WEB elaborado para este texto.

6.2. Acoplamiento de receptores en paralelo

Acoplar varios receptores en paralelo (o derivación) es conectar los terminales de dichos receptores entre sí, tal como se muestra en la Figura 6.10.

En el esquema de la Figura 6.10 las resistencias están conectadas a los mismos puntos A y B.

El montaje de receptores en paralelo se caracteriza porque todos ellos están sometidos a la misma tensión ($U = U_{AB}$).

El generador suministra una corriente I_T que se reparte por cada una de las resistencias: I_1 por R_1, I_2 por R_2 e I_3 por R_3. Se cumple que la corriente suministrada al circuito (I_T) es igual a la suma de corrientes (I_1, I_2, I_3) que fluyen por cada uno de los receptores conectados en paralelo.

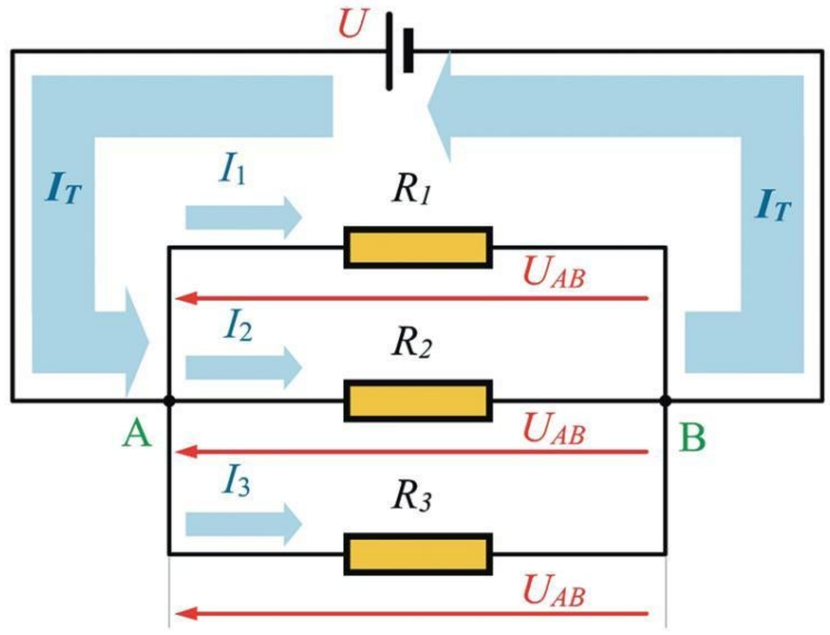


Figura 6.10. Esquema de conexión de tres resistencias acopladas en paralelo.

La razón de que se cumpla esta expresión se halla en que los electrones que entran en el nudo (A) no quedan acumulados en él, por lo que toda la intensidad I_T que entra al nudo tiene que salir también de él.

$$I_T = I_1 + I_2 + I_3$$

Para calcular las intensidades I_1, I_2 e I_3 basta con aplicar la ley de Ohm entre los puntos A y B y en cada una de las resistencias correspondientes.

$$I_1 = \frac{U}{R_1} \qquad I_2 = \frac{U}{R_2} \qquad I_3 = \frac{U}{R_3}$$

¿Cómo se determina la resistencia total o equivalente?

Sabemos que $I_T = I_1 + I_2 + I_3$; sustituyendo en esta expresión los valores de las intensidades parciales por su igualdad, tenemos que:

$$I_T = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3}$$

y sacando factor común a U:

$$I_T = U \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) \qquad \text{(I)}$$

Por otro lado, sabemos que para calcular la corriente eléctrica que suministra el generador al conjunto del circuito, tendremos que tener en cuenta la resistencia equivalente

© Ediciones Paraninfo

(R_T), que es la que produce los mismos efectos que todas las resistencias acopladas en paralelo (Figura 6.11).

$$I_T = \frac{U}{R_T} \qquad \text{(II)}$$

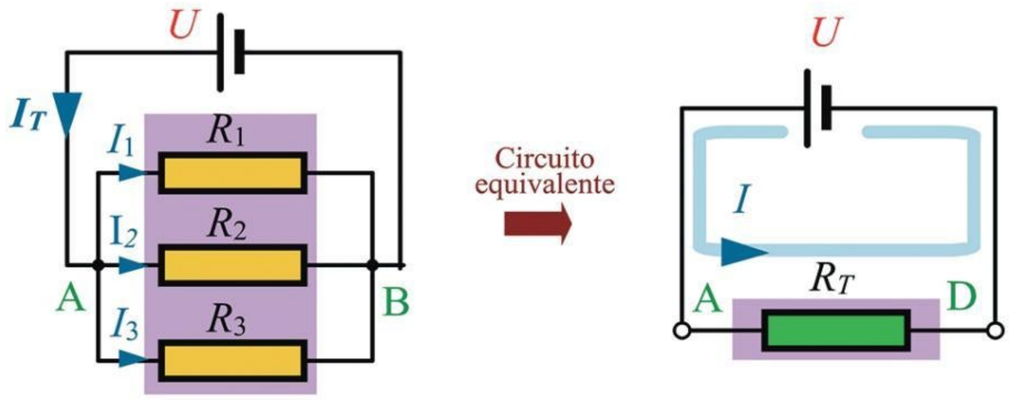


Figura 6.11. Resistencia total o equivalente.

Si ahora comparamos las expresiones (I) y (II), podemos llegar a la siguiente igualdad:

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

y despejando:

$$R_T = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}}$$

Para un número n de resistencias la expresión quedaría así:

$$R_T = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \ldots + \frac{1}{R_n}}$$

Para calcular las potencias se opera como ya conocemos:

$$P_1 = U \cdot I_1; \qquad P_2 = U \cdot I_2; \qquad P_3 = U \cdot I_3$$

$$P_T = U \cdot I_T \qquad \text{o} \qquad P_T = P_1 + P_2 + P_3$$

Actividad resuelta 6.6

A una pila de 9 V se le conectan dos resistencias en paralelo de 6 y 2 Ω, respectivamente. Calcula: **a)** la resistencia total; **b)** la intensidad de cada resistencia y del conjunto; **c)** la potencia de cada una, así como la total cedida por la pila (Figura 6.12).

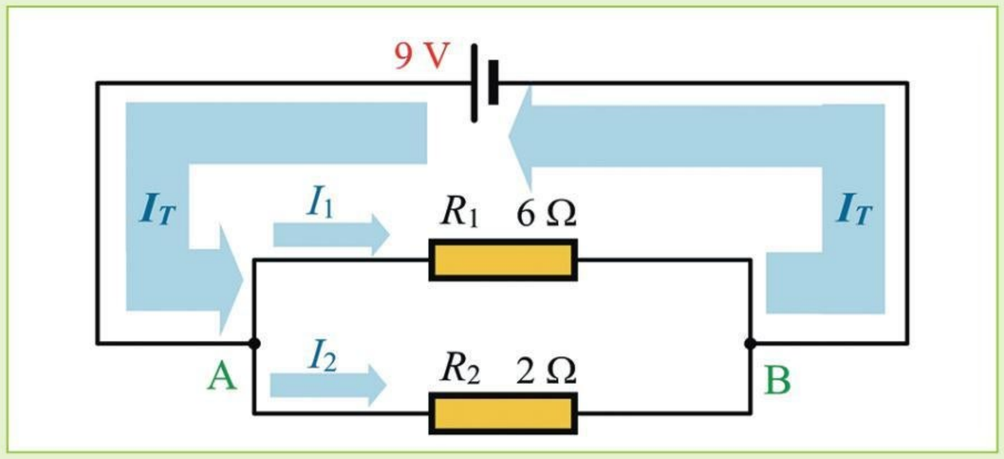


Figura 6.12.

Solución:

a) $R_T = \dfrac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} = \dfrac{1}{\frac{1}{6} + \frac{1}{2}} = \dfrac{1}{\frac{1+3}{6}} = \dfrac{6}{4} = 1{,}5\ \Omega$

Nota: Para sumar las fracciones 1/6 + 1/2 se las ha reducido al mismo denominador.

Es importante señalar que la resistencia total o equivalente da como resultado un valor inferior a la más pequeña de las resistencias conectadas en paralelo. Este resultado es el esperado, ya que cuantos más circuitos derivados existan, habrá también más caminos por donde pueda pasar la corriente eléctrica y, por tanto, menos dificultad para el establecimiento de la intensidad total.

b)

$$I_1 = \frac{U}{R_1} = \frac{9}{6} = 1{,}5\ \text{A}$$

$$I_2 = \frac{U}{R_2} = \ldots = 4{,}5\ \text{A}$$

$$I_T = \frac{U}{R_T} = \frac{9}{1{,}5} = 6\ \text{A}$$

Comprueba si el resultado obtenido al calcular la intensidad total es el mismo que sumando las intensidades:

c)

$$I_T = I_1 + I_2 = \ldots + \ldots = 6\ \text{A}$$

$$P_1 = U \cdot I_1 = 9 \cdot 1{,}5 = 13{,}5\ \text{W}$$

$$P_2 = \ldots = \ldots = 40{,}5\ \text{W}$$

$$P_T = U \cdot I_T = 9 \cdot 6 = 54\ \text{W}$$

Comprueba si se obtiene el mismo resultado empleando la expresión:

$$P_T = P_1 + P_2 = \ldots + \ldots = 54\ \text{W}$$

Actividad resuelta 6.7

En el circuito de la Figura 6.13 la intensidad de corriente que se ha medido con un amperímetro en la resistencia R_2 es de 2 A. Con estos datos, calcula la intensidad de corriente por

© Ediciones Paraninfo

el resto de las resistencias, así como la tensión y corriente suministrada por el generador.

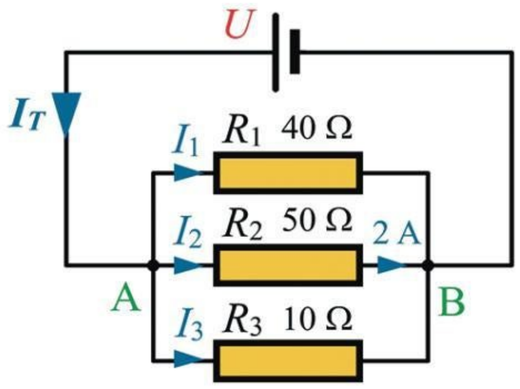


Figura 6.13.

Solución:

Si aplicamos la ley de Ohm en la resistencia R_2 podremos calcular la tensión a la que está sometida:

$$U_{AB} = R_2 \cdot I_2 = 50 \cdot 2 = 100 \text{ V} = U$$

Como esta tensión es la que está aplicada a las demás resistencias que están conectadas en paralelo:

$$I_1 = \frac{U}{R_1} = \frac{100}{40} = 2{,}5 \text{ A}$$

$$I_3 = \frac{U}{R_3} = \ldots = 10 \text{ A}$$

$$I_T = I_1 + I_2 + I_3 = \ldots + \ldots = 14{,}5 \text{ A}$$

Actividad resuelta 6.8

Una línea eléctrica de 230 V alimenta a los siguientes receptores: una lámpara incandescente de 60 W, una cocina eléctrica de 3 kW y una estufa de 1 kW (Figura 6.14). Calcula: **a)** intensidad que absorbe cada receptor de la red; **b)** resistencia de cada receptor; **c)** resistencia total.

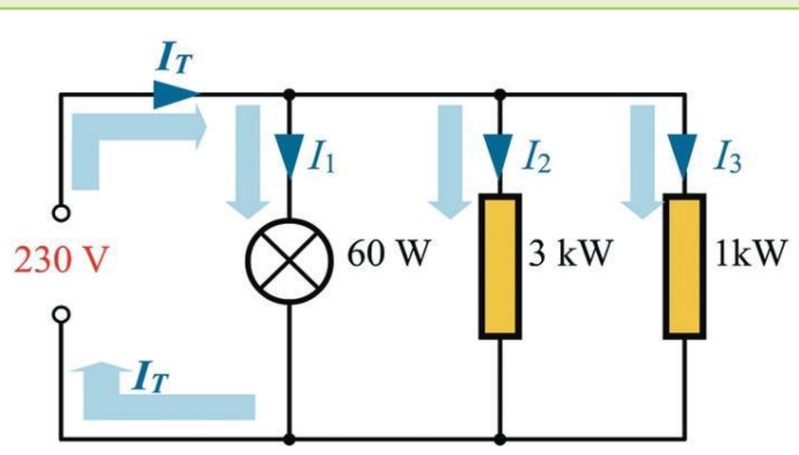


Figura 6.14.

Solución:

a) Como todos los receptores están sometidos a la misma tensión, se trata de un montaje en paralelo.

Como conocemos la potencia de cada receptor y la tensión a la que están sometidos, es fácil calcular la intensidad de cada uno.

$$I_1 = \frac{P_1}{U} = \frac{60}{230} = 0{,}26 \text{ A}$$

$$I_2 = \frac{P_2}{U} = \ldots = 13{,}04 \text{ A}$$

$$I_3 = \ldots = \ldots = 4{,}35 \text{ A}$$

La intensidad total la calculamos sumando estas intensidades:

$$I_T = I_1 + I_2 + I_3 = 0{,}26 + \ldots + \ldots = 17{,}65 \text{ A}$$

b) Las resistencias de cada uno de los receptores las calculamos aplicando la ley de Ohm en los extremos de cada uno de aquellos:

$$R_1 = \frac{U}{I_1} = \frac{230}{0{,}26} = 884{,}6 \ \Omega$$

$$R_2 = \frac{U}{I_2} = \ldots = 17{,}6 \ \Omega$$

$$R_3 = \ldots = \ldots = 52{,}9 \ \Omega$$

c) Como ya conocemos la intensidad total, para calcular la resistencia total o equivalente nos valdremos de la expresión:

$$R_T = \frac{U}{I_T} = \frac{230}{17{,}65} = 13 \ \Omega$$

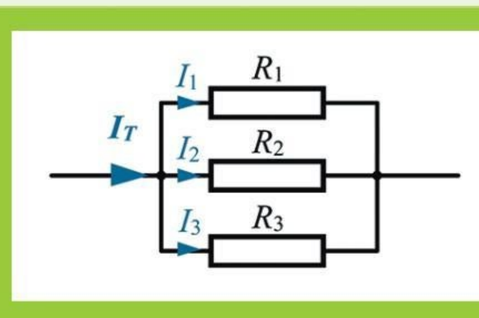
Comprueba el resultado aplicando la expresión:

$$R_T = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}}$$

Actividad propuesta 6.2

En la Tabla 6.2 aparecen los datos de cinco circuitos diferentes donde se conectan tres resistencias en paralelo. Averigua las magnitudes desconocidas.

Tabla 6.2.



Ejercicio	1.º	2.º	3.º	4.º	5.º
R_1 (Ω)	10	4	?	10	?
R_2 (Ω)	30	6	10	?	?

© Ediciones Paraninfo

Ejercicio	1.º	2.º	3.º	4.º	5.º
R_3 (Ω)	90	12	?	?	?
I_1 (A)	?	2	4	?	?
I_2 (A)	?	?	?	0,5	2
I_3 (A)	?	?	1	?	1
P_1 (W)	?	?	?	?	?
P_2 (W)	?	?	?	?	?
P_3 (W)	?	?	?	200	?
R_T (Ω)	?	?	?	?	25
U_T (V)	100	?	?	200	?
I_T (A)	?	?	10	?	4

La solución a esta Actividad propuesta la puedes encontrar dentro del MATERIAL WEB elaborado para este texto.

6.3. Circuitos mixtos

Al igual que es posible conectar receptores en serie o en paralelo, en ocasiones pueden aparecer circuitos con receptores acoplados en serie mezclados con receptores acoplados en paralelo. Estos circuitos son los denominados mixtos. En la Figura 6.15 se muestra un ejemplo de ellos. Aquí las resistencias R_2 y R_3 están claramente conectadas en paralelo entre sí y, a su vez, su resistencia equivalente se conecta en serie con R_1.

Para resolver este tipo de ejercicios hay que seguir los siguientes pasos:

a) Reducir a su circuito equivalente aquellas partes del circuito que estén claramente acopladas, bien en serie o en paralelo.

b) Dibujar sucesivamente los nuevos circuitos equivalentes obtenidos, indicando las magnitudes conocidas y desconocidas.

c) Calcular las magnitudes desconocidas del circuito desde los circuitos equivalentes más reducidos hasta el circuito original.

Actividad resuelta 6.9

Determina las tensiones, potencias e intensidades de cada una de las resistencias del circuito mixto de la Figura 6.15 si aplicamos entre los extremos AC del circuito una tensión de 24,8 V.

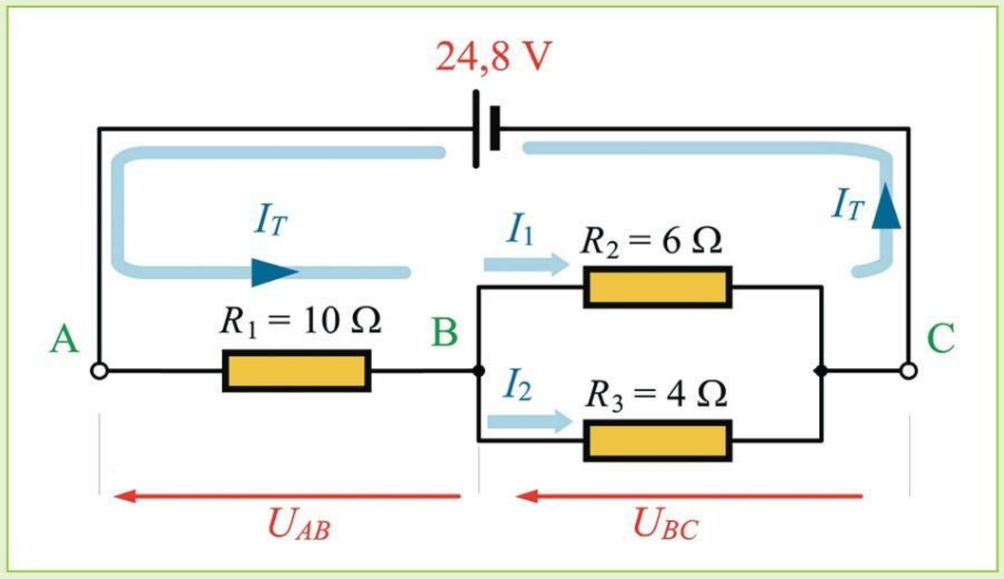


Figura 6.15. Receptores acoplados en montaje mixto.

Solución:

Como R_2 y R_3 están claramente conectadas en paralelo, determinamos su resistencia equivalente que llamamos R_{23}:

$$R_{23} = \frac{1}{\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}} = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3} = \frac{6 \cdot 4}{6 + 4} = 2{,}4\ \Omega$$

Ahora dibujamos el circuito equivalente al anterior, en el que se han sustituido R_2 y R_3 por R_{23} (Figura 6.16). Observa que R_1 y R_{23} están conectados en serie.

$$R_T = R_1 + R_{23} = 10 + 2{,}4 = 12{,}4\ \Omega$$

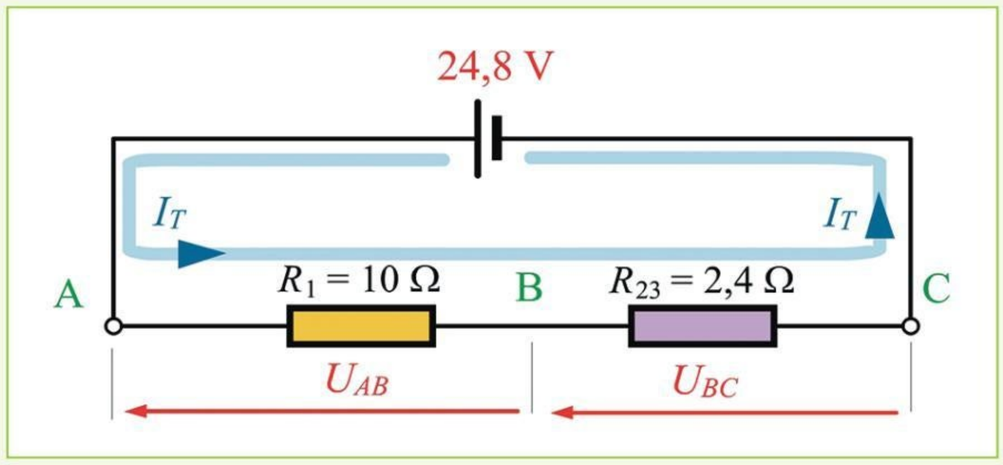


Figura 6.16.

Una vez reducidas todas las resistencias a su equivalente R_T, dibujamos el circuito final de la Figura 6.17 y calculamos con él la intensidad total del circuito.

$$I_T = \frac{U}{R_T} = \frac{24{,}8}{12{,}4} = 2\ \text{A}$$

Aplicando la ley de Ohm en el circuito equivalente de la Figura 6.16 obtenemos las tensiones U_{AB} y U_{BC}:

$$U_{AB} = R_1 \cdot I_T = 10 \cdot 2 = 20\ \text{V}$$

$$U_{BC} = R_{23} \cdot I_T = 2{,}4 \cdot 2 = 4{,}8\ \text{V}$$

Una vez obtenidas estas tensiones, podemos calcular las intensidades I_1 e I_2 aplicando la ley de Ohm en el circuito original de la Figura 6.15.

$$I_1 = \frac{U_{BC}}{R_2} = \frac{4{,}8}{6} = 0{,}8\ \text{A}, \qquad I_2 = \frac{U_{BC}}{R_3} = \frac{4{,}8}{4} = 1{,}2\ \text{A}$$

© Ediciones Paraninfo

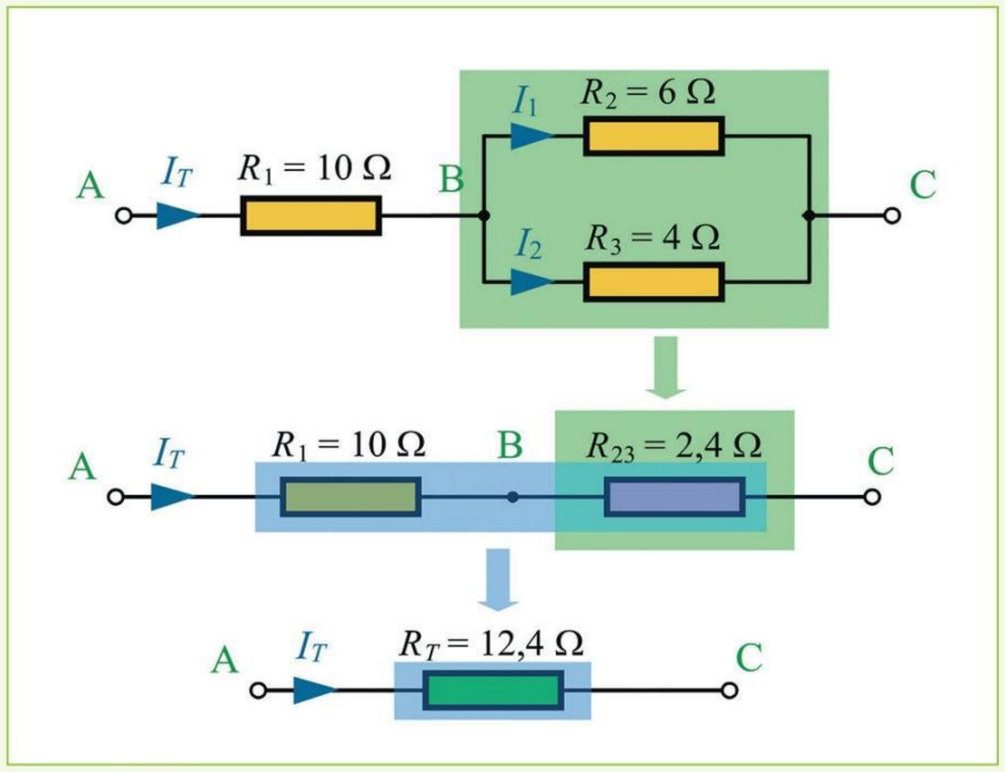


Figura 6.17.

Por último indicamos la tensión, intensidad y potencia ($P = U \cdot I$) que le corresponde a cada una de las resistencias:

R_1: (20 V); (2 A); $P_1 = 20 \cdot 2 = 40$ W

R_2: (4,8 V); (0,8 A); $P_2 = 4{,}8 \cdot 0{,}8 = 3{,}84$ W

R_3: (4,8 V); (1,2 A); $P_3 = 4{,}8 \cdot 1{,}2 = 5{,}76$ W

R_T: (24,8 V); (2 A); $P_T = 24{,}8 \cdot 2 = 49{,}6$ W

Actividad resuelta 6.10

Determina las tensiones, potencias e intensidades de cada una de las resistencias del circuito mixto de la Figura 6.18 si aplicamos entre los extremos del circuito una tensión de 100 V.

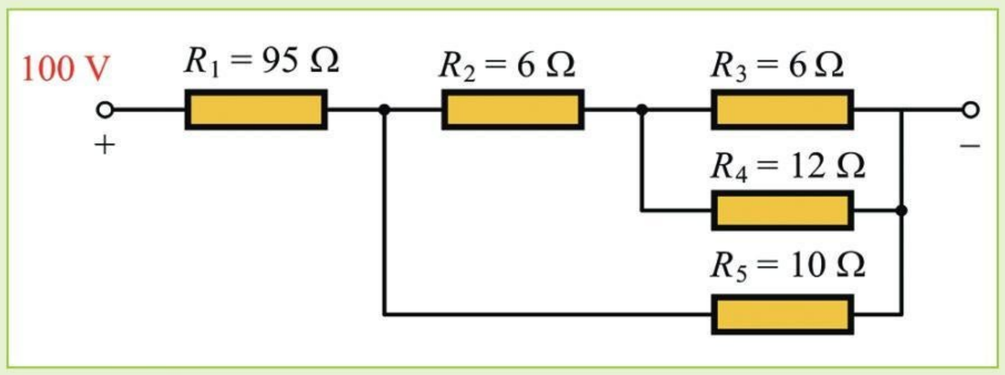


Figura 6.18.

Solución:

En la Figura 6.19 se expone cómo se reduce el circuito hasta llegar a la resistencia equivalente.

Hacemos los cálculos así:

$$R_{34} = \frac{R_3 \cdot R_4}{R_3 + R_4} = \frac{6 \cdot 12}{6 + 12} = 4\ \Omega$$

$$R_{234} = R_2 + R_{34} = 6 + 4 = 10\ \Omega$$

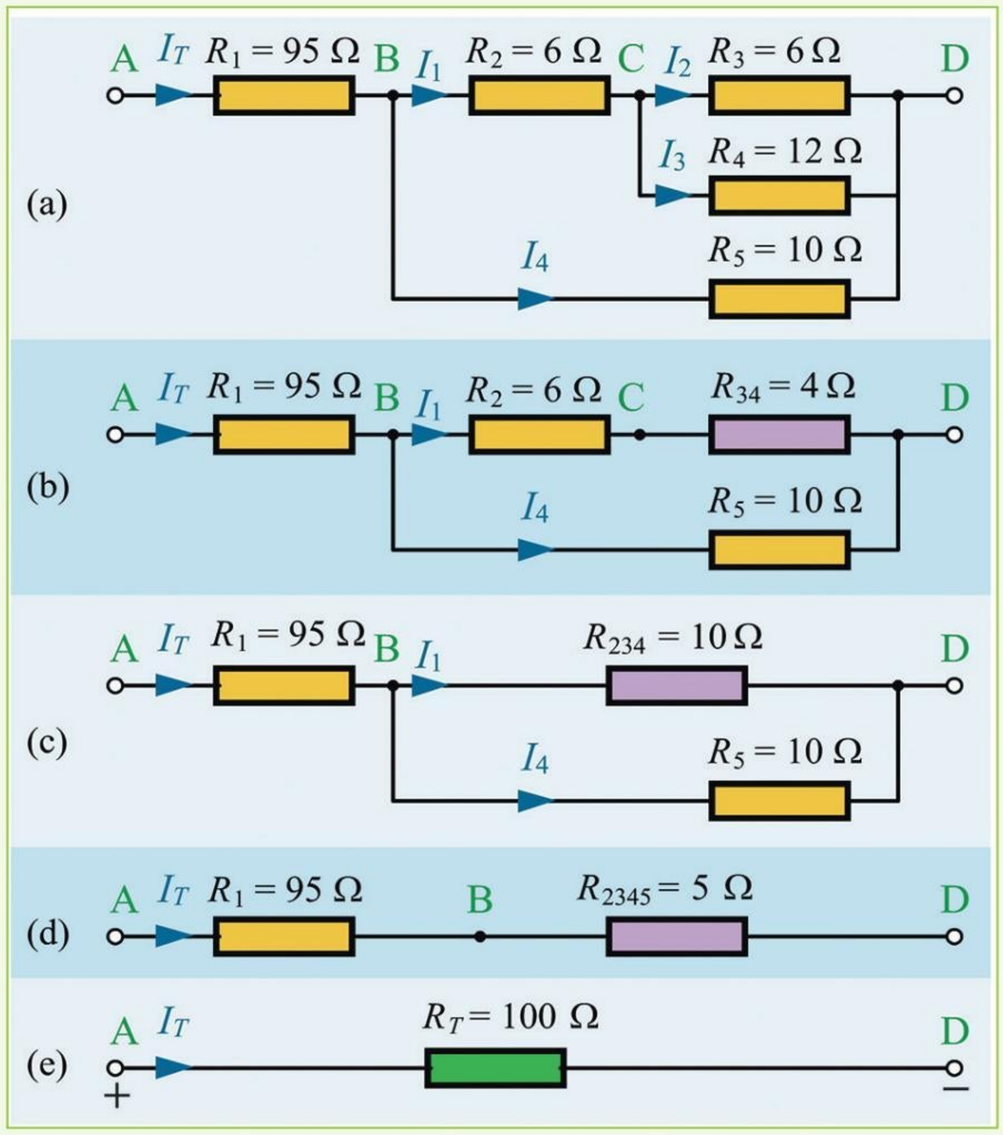


Figura 6.19.

$$R_{2345} = \frac{R_{234} \cdot R_5}{R_{234} + R_5} = \frac{10 \cdot 10}{10 + 10} = 5\ \Omega$$

$$R_T = R_1 + R_{2345} = 95 + 5 = 100\ \Omega$$

$$I_T = \frac{U}{R_T} = \frac{100}{100} = 1\ \text{A}$$

En el circuito de la Figura 6.19(d):

$$U_{AB} = R_1 \cdot I_T = 95 \cdot 1 = 95\ \text{V}$$

$$U_{BD} = R_{2345} \cdot I_T = 5 \cdot 1 = 5\ \text{V}$$

En el circuito de la Figura 6.19(c):

$$I_1 = \frac{U_{BD}}{R_{234}} = \frac{5}{10} = 0{,}5\ \text{A}$$

$$I_4 = \frac{U_{BD}}{R_5} = \frac{5}{10} = 0{,}5\ \text{A}$$

En el circuito de la Figura 6.19(b):

$$U_{BC} = R_2 \cdot I_1 = 6 \cdot 0{,}5 = 3\ \text{V}$$

$$U_{CD} = R_{34} \cdot I_1 = 4 \cdot 0{,}5 = 2\ \text{V}$$

En el circuito de la Figura 6.19(a):

$$I_2 = \frac{U_{CD}}{R_3} = \frac{2}{6} = 0{,}33\ \text{A}$$

$$I_3 = \frac{U_{CD}}{R_4} = \frac{2}{12} = 0{,}17\ \text{A}$$

© Ediciones Paraninfo

Por último indicamos la tensión, intensidad y potencia ($P = U \cdot I$) que le corresponde a cada una de las resistencias:

	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_T
I (A)	1	0,5	0,33	0,17	0,5	1
U (V)	95	3	2	2	5	100
P (W)	95	1,5	0,66	0,4	2,5	100

Con estos resultados se puede comprobar que la resolución del circuito es correcta si la suma de las potencias de cada una de las resistencias es igual a la total.

$$P_T = 95 + 1{,}5 + 0{,}66 + 0{,}4 + 2{,}5 = 100 \text{ W}$$

Actividad resuelta 6.11

Determina las magnitudes desconocidas (I, U, P) de cada una de las resistencias del circuito de la Figura 6.20, así como la tensión total aplicada al conjunto de las mismas, si todas las resistencias poseen el mismo valor (10 Ω) y la tensión medida en los extremos de R_5 es de 10 V.

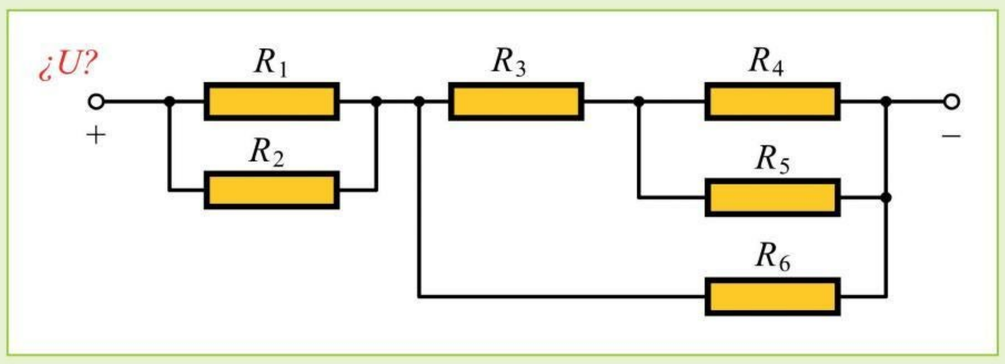


Figura 6.20.

Solución:

Lo primero que hacemos es marcar los diferentes puntos de conexión e identificar las diferentes intensidades de corriente por el circuito, tal como se muestra en la Figura 6.21.

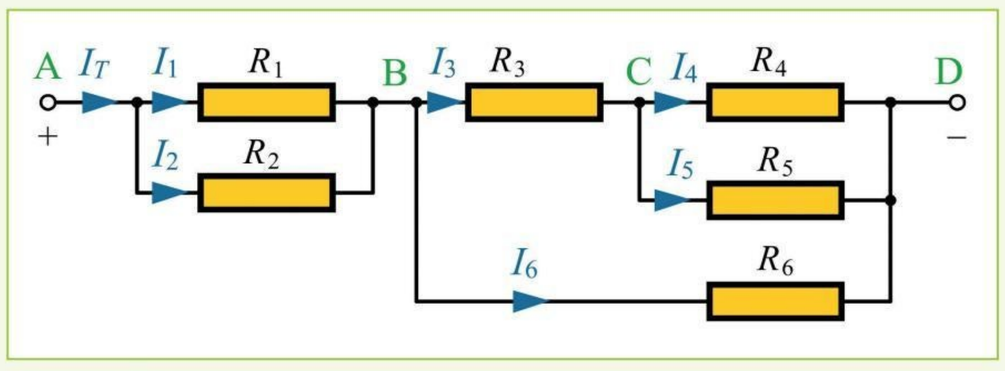


Figura 6.21.

La intensidad por R_5 será:

$$I_5 = \frac{U_{CD}}{R_5} = \frac{10}{10} = 1 \text{ A}$$

Dado que la tensión por R_4 es la misma que en R_5, también lo será su intensidad ($I_4 = 1$ A).

Ahora, observando las conexiones en el circuito de la Figura 6.21, podremos determinar que:

$$I_3 = I_4 + I_5 = 1 + 1 = 2 \text{ A}$$

$$U_{BC} = R_3 \cdot I_3 = 10 \cdot 2 = 20 \text{ V}$$

$$U_{BD} = U_{BC} + U_{CD} = 20 + 10 = 30 \text{ V}$$

$$I_6 = \frac{U_{BD}}{R_6} = \frac{30}{10} = 3 \text{ A}$$

$$I_T = I_3 + I_6 = 2 + 3 = 5 \text{ A}$$

Dado que la I_T también es igual a la suma de las intensidades por R_1 y R_2, y que estas poseen el mismo valor por tener la misma tensión, al estar acopladas en paralelo, su valor será de:

$$I_1 = I_2 = I_T/2 = 5/2 = 2{,}5 \text{ A}$$

$$U_{AB} = R_1 \cdot I_1 = 10 \cdot 2{,}5 = 25 \text{ V}$$

$$U_{AD} = U_{AB} + U_{BC} + U_{CD} = 25 + 20 + 10 = 55 \text{ V}$$

Por último indicamos la tensión, intensidad y potencia ($P = U \cdot I$) que le corresponde a cada una de las resistencias en el siguiente cuadro:

	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	R_T
I (A)	2,5	2,5	2	10	10	30	5
U (V)	25	25	20	1	1	3	55
P (W)	62,5	62,5	40	10	10	90	275

Con estos resultados se puede comprobar que la resolución del circuito es correcta si la suma de las potencias de cada una de las resistencias es igual a la total.

$$P_T = 62{,}5 + 62{,}5 + 40 + 10 + 10 + 90 = 275 \text{ W}$$

Actividad resuelta 6.12

Determina las magnitudes desconocidas (I, U, P) de cada una de las resistencias del circuito de la Figura 6.22 si la intensidad de corriente que fluye por de R_3 es de 1 A.

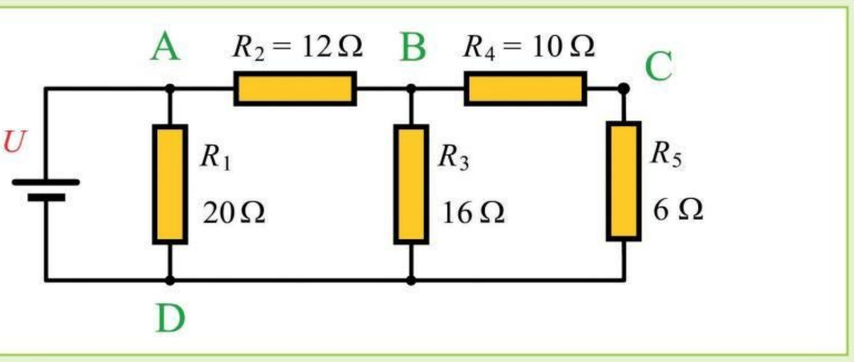


Figura 6.22

Solución:

Con el objeto de que el circuito sea más fácil de analizar, volvemos a dibujar el mismo con las resistencias situadas

© Ediciones Paraninfo

en horizontal y marcamos las diferentes intensidades de corriente (Figura 6.23).

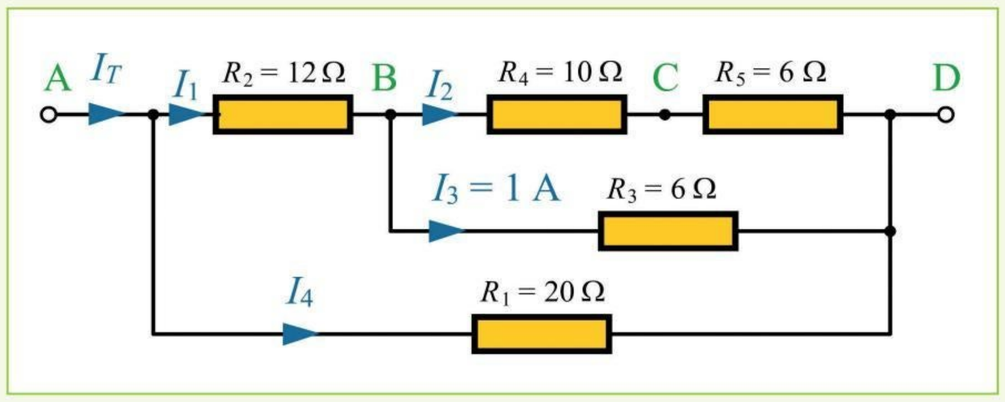


Figura 6.23.

Procedemos ahora a la resolución del circuito poniendo mucha atención a las conexiones del circuito de la Figura 6.23.

$$U_{BD} = R_3 \cdot I_3 = 6 \cdot 1 = 6 \text{ V}$$

$$R_{45} = R_4 + R_5 = 10 + 6 = 16\ \Omega$$

$$I_2 = \frac{U_{BD}}{R_{45}} = \frac{6}{16} = 0{,}375 \text{ A}$$

$$U_{BC} = R_4 \cdot I_2 = 10 \cdot 0{,}375 = 3{,}75 \text{ V}$$

$$U_{CD} = R_5 \cdot I_2 = 6 \cdot 0{,}375 = 2{,}25 \text{ V}$$

$$I_1 = I_2 + I_3 = 0{,}375 + 1 = 1{,}375 \text{ A}$$

$$U_{AB} = R_2 \cdot I_1 = 12 \cdot 1{,}375 = 16{,}5 \text{ V}$$

$$U_{AD} = U_{AB} + U_{BC} + U_{CD} = 16{,}5 + 3{,}75 + 2{,}25 = 22{,}5 \text{ V}$$

$$I_4 = \frac{U_{AD}}{R_1} = \frac{22{,}5}{16} = 1{,}406 \text{ A}$$

$$I_T = I_1 + I_4 = 1{,}375 + 1{,}406 = 2{,}781 \text{ A}$$

Por último indicamos la tensión, intensidad y potencia ($P = U \cdot I$) que le corresponde a cada una de las resistencias en el siguiente cuadro:

	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_T
I (A)	1,406	1,375	1	0,375	0,375	2,781
U (V)	22,5	16,5	6	3,75	2,25	22,5
P (W)	31,64	22,69	6	1,41	0,844	62,57

Con estos resultados se puede comprobar que la resolución del circuito es correcta si la suma de las potencias de cada una de las resistencias es igual a la total.

$$P_T = 3{,}64 + 22{,}69 + 6 + 1{,}41 + 0{,}844 = 62{,}58 \text{ W}$$

Actividad propuesta 6.3

Determina las magnitudes desconocidas (I, U, P) de cada una de las resistencias de los circuitos de las Figuras 6.24, 6.25, 6.26 y 6.27.

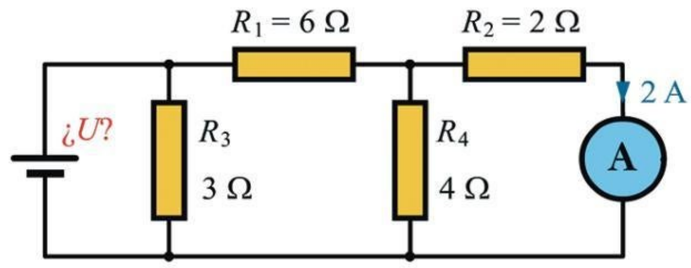


Figura 6.24.

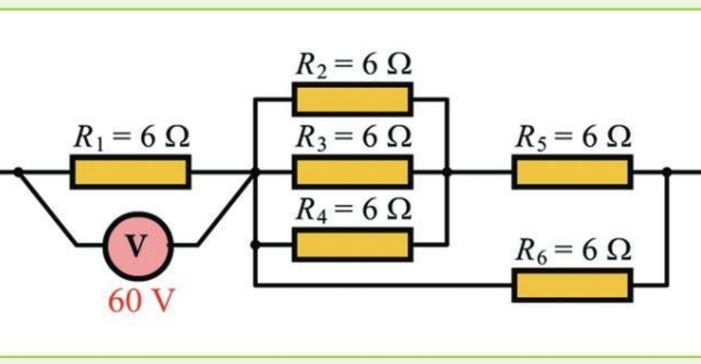


Figura 6.25.

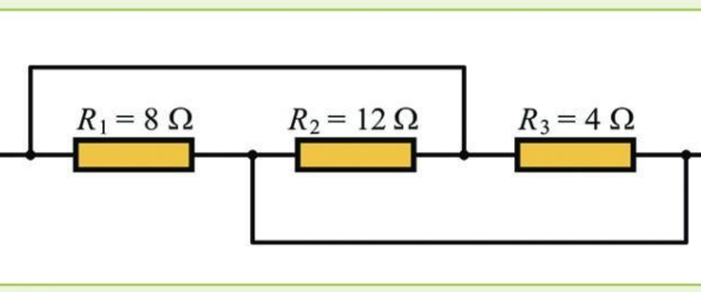


Figura 6.26.

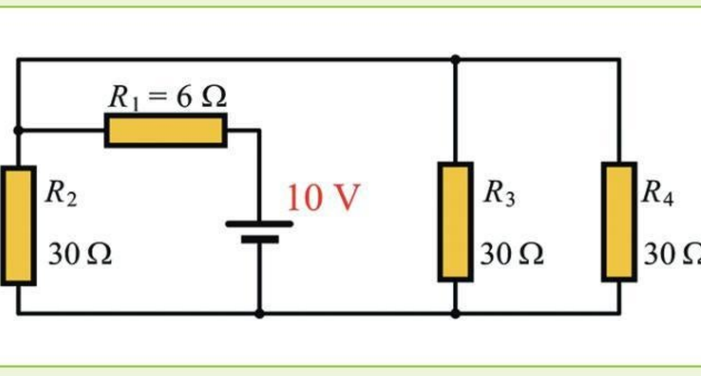


Figura 6.27.

La solución a esta Actividad propuesta la puedes encontrar dentro del MATERIAL WEB elaborado para este texto.

© Ediciones Paraninfo

Comprobación práctica en el laboratorio

6.1. Medida de magnitudes eléctricas en un circuito en serie. Monta en el entrenador didáctico el circuito de la Figura 6.28. Con el polímetro, mide la intensidad de la corriente por el circuito, así como la tensión que aparece en cada una de las resistencias y la que proporciona la fuente de alimentación. Comprueba que la suma de las tensiones de cada una de las resistencias da como resultado la tensión total aplicada por la fuente.

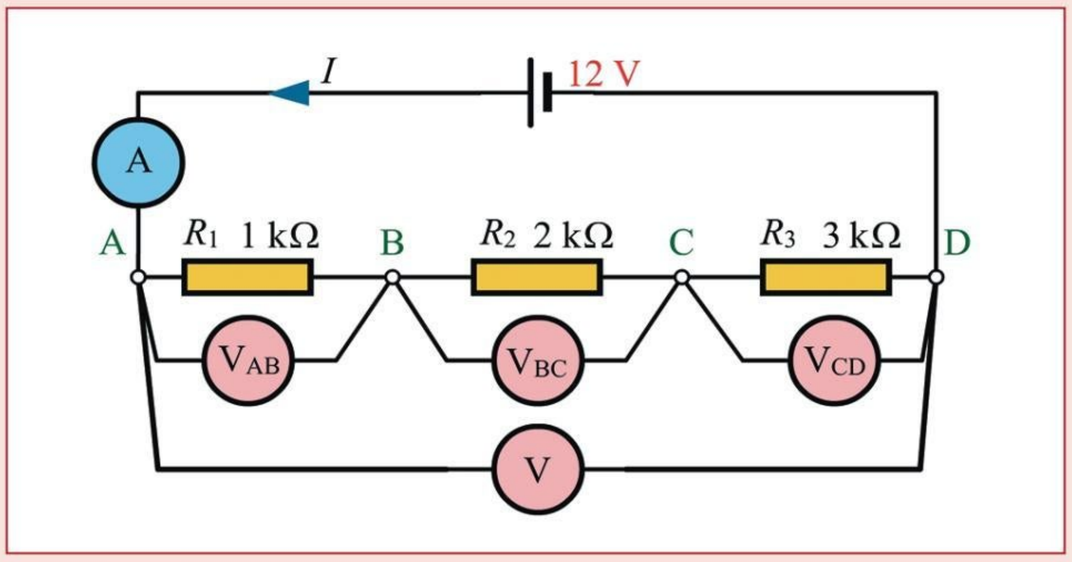


Figura 6.28.

6.2. Medida de magnitudes eléctricas en un circuito paralelo: Siguiendo el mismo proceso que en la actividad anterior, monta el circuito de la Figura 6.29 y mide la tensión y la corriente de cada una de las resistencias.

Comprueba que la corriente que suministra la fuente se corresponde con la suma de las corrientes de cada resistencia.

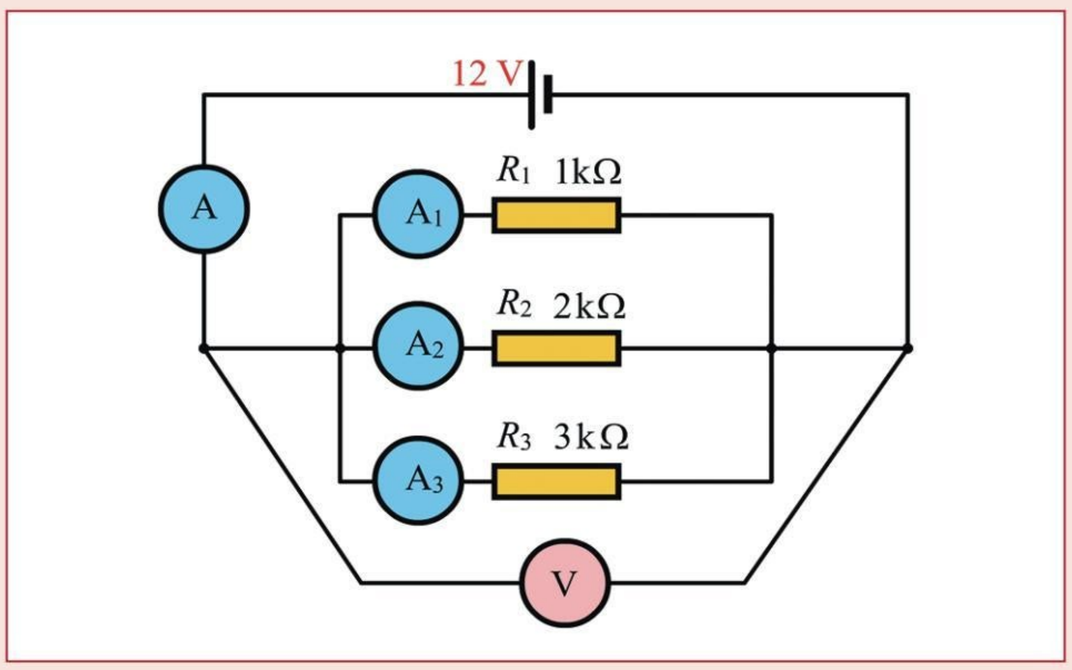


Figura 6.29.

6.3. Medida de magnitudes en un circuito mixto. Consigue una placa de montaje rápido (Figura 6.30) y monta el circuito mixto de la Figura 6.31. Calcula de forma teórica las diferentes tensiones que aparecen en cada una de las resistencias, para luego comprobarlo de forma práctica midiéndolas con un voltímetro en el circuito montado.

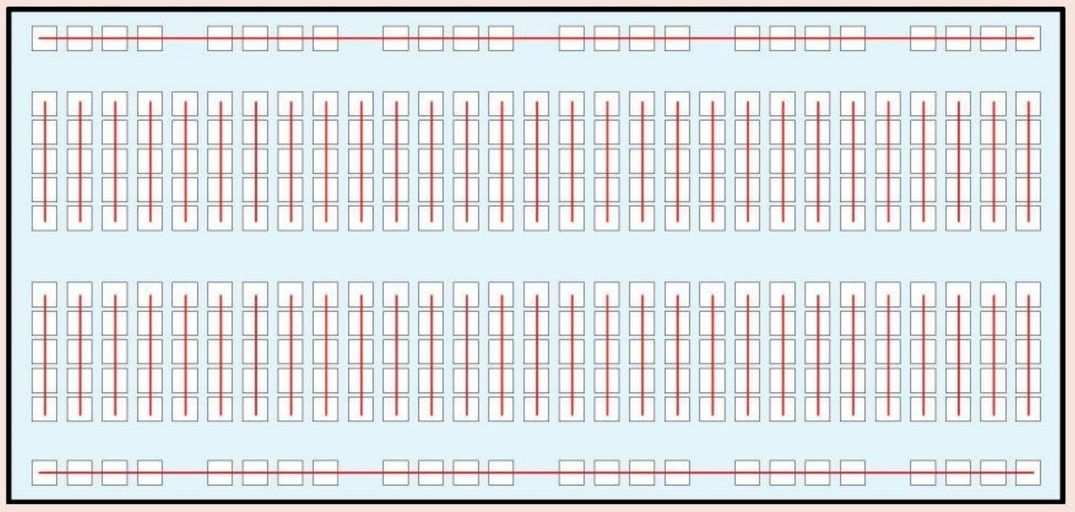


Figura 6.30. Conexiones internas de placa *protoboard.*

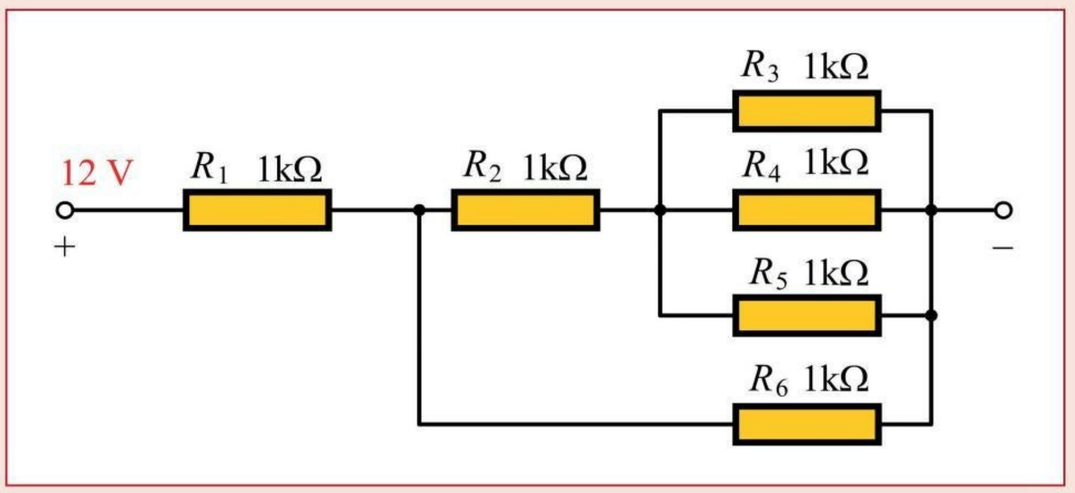


Figura 6.31.

© Ediciones Paraninfo

Actividades de comprobación

6.1. Se conectan en serie tres resistencias de 200 Ω, 140 Ω, y 120 Ω a una red de 230 V. Determina la intensidad, tensiones y potencias de cada una, así como la potencia total y la resistencia total.

6.2. Se conectan tres resistencias en serie de 10 Ω, 5 Ω y 6 Ω a una fuente de alimentación. La caída de tensión en la resistencia de 5 Ω es de 5 V. ¿Cuál es la tensión de la fuente de alimentación?

6.3. La bobina de un electroimán está compuesta por 150 metros de hilo de cobre esmaltado de 1 mm de diámetro. Determina el valor óhmico de la resistencia que habrá que conectar en serie para que la intensidad de corriente sea de 350 mA cuando se aplique una tensión continua de 12 V.

6.4. Se conectan en serie a una red de 230 V dos calefactores eléctricos con las siguientes características: número 1, 500 W/230 V; número 2, 750 W/230 V. Determina la resistencia total y de cada uno, la corriente por el circuito, así como la tensión y potencia de funcionamiento de cada uno de ellos.

6.5. Calcula las características que debe tener la resistencia que hay que conectar en serie a un receptor resistivo de características 9 V/10 W para poder conectarlo a una batería de 24 V sin que sufra daños.

6.6. Se conectan tres lámparas en paralelo de resistencias 6, 4 y 12 Ω a una batería de automóvil de 12 V. Calcula:

a) La resistencia y potencia total.

b) Corrientes parciales y corriente total.

6.7. Una instalación consta de cuatro lámparas, de potencias 25, 40, 60 y 100 W, respectivamente, conectadas en paralelo y alimentadas a 230 V. Determina la resistencia total y la intensidad total del circuito.

6.8. Dos resistencias en paralelo dan como resultado 3 ohmios. Determina una sabiendo que la otra vale 12 ohmios.

Nota: Esta actividad se puede resolver aplicando la expresión particular para el caso de solo dos resistencias conectadas en paralelo:

$$R_T = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

6.9. Se conectan 20 resistencias de 1 kΩ, cada una en paralelo a una fuente de alimentación de 500 voltios. Averigua:

a) Resistencia equivalente.

b) Intensidad por cada resistencia e intensidad total.

c) Potencia de cada resistencia y potencia total.

Nota: Esta actividad se puede resolver aplicando la expresión particular para el caso de un número *n* de resistencias iguales de valor *R* conectadas en paralelo:

$$R_T = \frac{R}{n}$$

6.10. Para poder graduar la potencia de trabajo de un horno eléctrico se han conectado tres resistencias con un conmutador de tres posiciones, tal como se indica en la Figura 6.32. La tensión de alimentación es de 230 V. Averigua el valor óhmico de cada una de las resistencias para que las potencias en cada uno de los puntos de dicho conmutador sean las siguientes: punto (1), 1.000 W; punto (2), 2.000 W, y punto (3), 3.000 W.

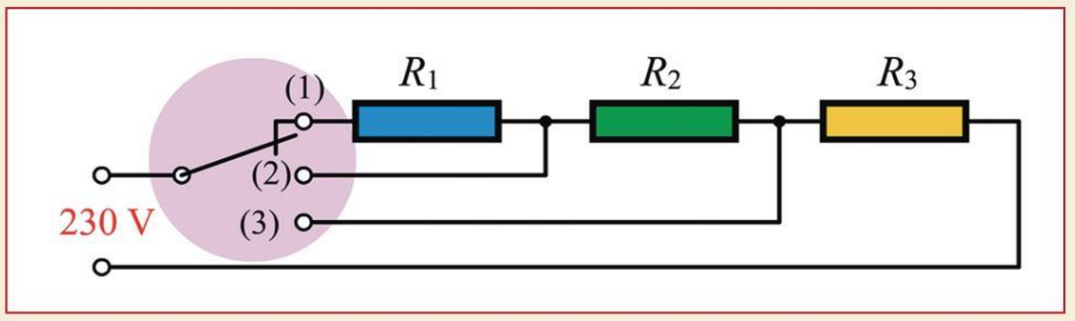


Figura 6.32.

6.11. En un circuito serie:

a) La resistencia equivalente es igual a la suma de las resistencias conectadas en serie.

b) La intensidad es igual para todos los receptores.

c) La tensión es igual para todos los receptores.

6.12. En un circuito paralelo:

a) La resistencia equivalente siempre es inferior a la de cualquier resistencia conectada en paralelo.

b) La intensidad es igual para todos los receptores.

c) La tensión es igual para todos los receptores.

6.13. Calcula la resistencia equivalente al circuito de la Figura 6.33, así como la corriente y potencia que cedería una fuente de alimentación de 200 V conectada entre los extremos del mismo.

© Ediciones Paraninfo

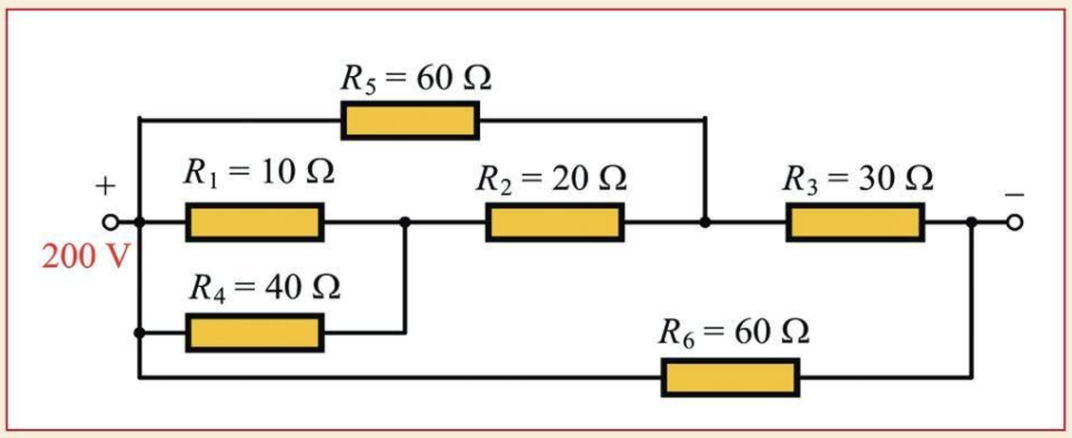


Figura 6.33.

6.14. Calcula la tensión, intensidad y potencia de cada una de las resistencias, incluida la total, que aparecen en el circuito de la Figura 6.34.

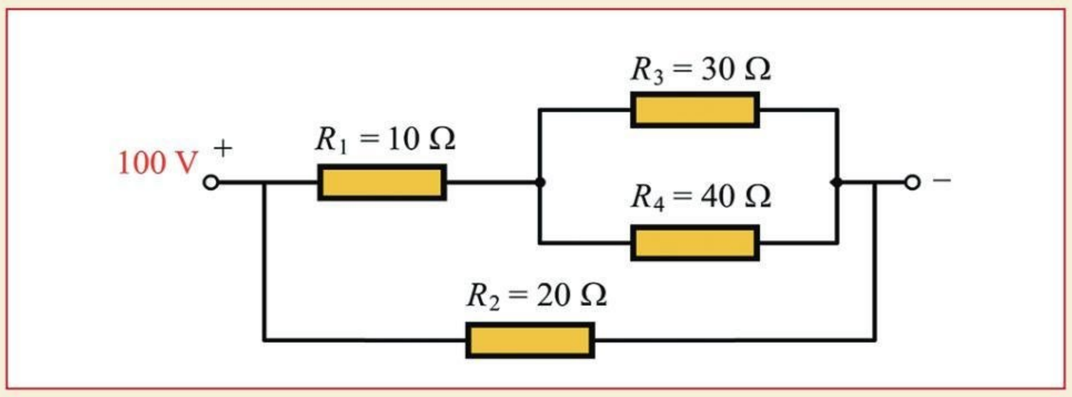


Figura 6.34.

6.15. Calcula la tensión del voltímetro de la Figura 6.35.

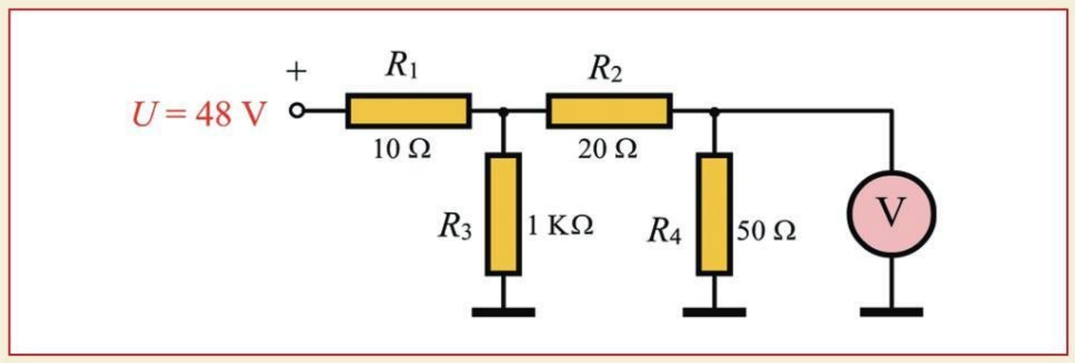


Figura 6.35.

6.16. Calcula la tensión e intensidad de cada una de las resistencias, incluida la total, que aparecen en el circuito de la Figura 6.36 si se sabe que la corriente por R_2 = = 100 mA.

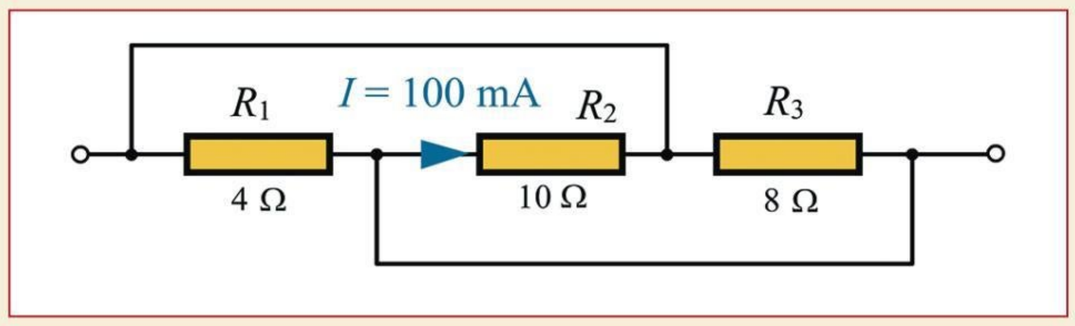


Figura 6.36.

Actividades de evaluación resueltas

A continuación se dan los enunciados de una serie de actividades de evaluación. Estas actividades las podrás encontrar resueltas accediendo al MATERIAL WEB creado para este texto.

6.1. Para decorar un árbol de Navidad se ha comprado una caja de velas eléctricas de colores con las siguientes características nominales para cada vela: 20 V/12 W.

a) ¿Cuántas velas eléctricas hay que montar, como mínimo, en serie, formando un circuito que pueda conectarse a una red de 220 V?

b) ¿Qué intensidad recorrerá este circuito?

c) ¿Cuál es la resistencia de cada vela eléctrica, y la equivalente al conjunto serie de las mismas?

6.2. En el circuito de la Figura 6.37(a):

a) Calcula la diferencia de potencial entre los bornes de la resistencia de 100 Ω.

b) ¿Qué tensión mediría un voltímetro de resistencia interna 100 Ω conectado en paralelo con la resistencia de 100 Ω, como se indica en la Figura 6.37(b)?

c) Determina la diferencia de potencial entre esos mismos puntos si el voltímetro tiene una resistencia interna de 500 Ω.

d) Compara los resultados y comenta las diferencias. Indica las condiciones para que el voltímetro se considere un aparato de medida ideal.

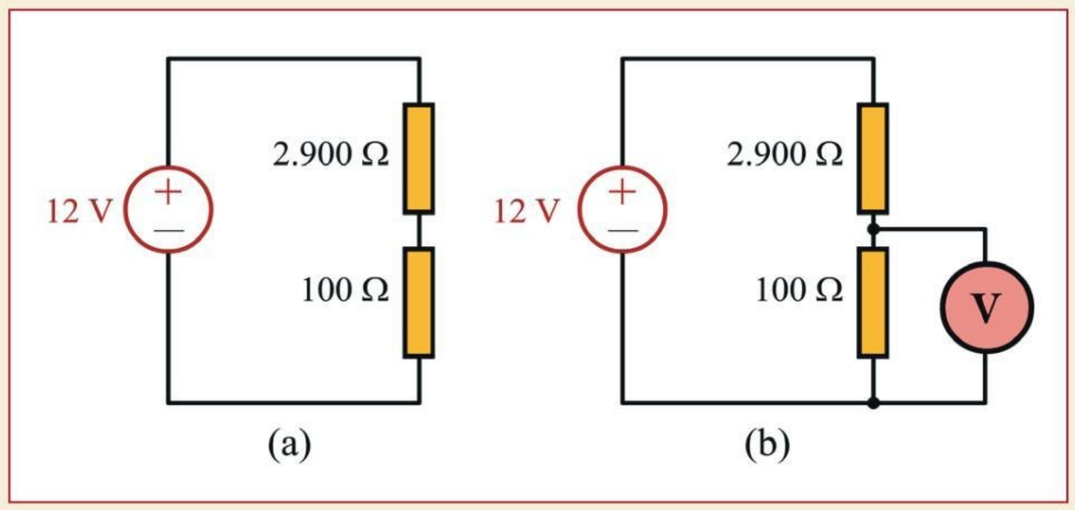


Figura 6.37.

© Ediciones Paraninfo

6.3. Las indicaciones de los aparatos de medida ideal del circuito de corriente continua mostrado en la Figura 6.38 son: 3 A, 6 V y 54 W respectivamente. Calcula:

a) El valor de la resistencia equivalente de R_2 y R_3 en paralelo.

b) El valor de R_3 si $R_2 = 3\ \Omega$.

c) La tensión en la resistencia R_1 y el valor de dicha resistencia.

d) El valor E de la fuente de tensión.

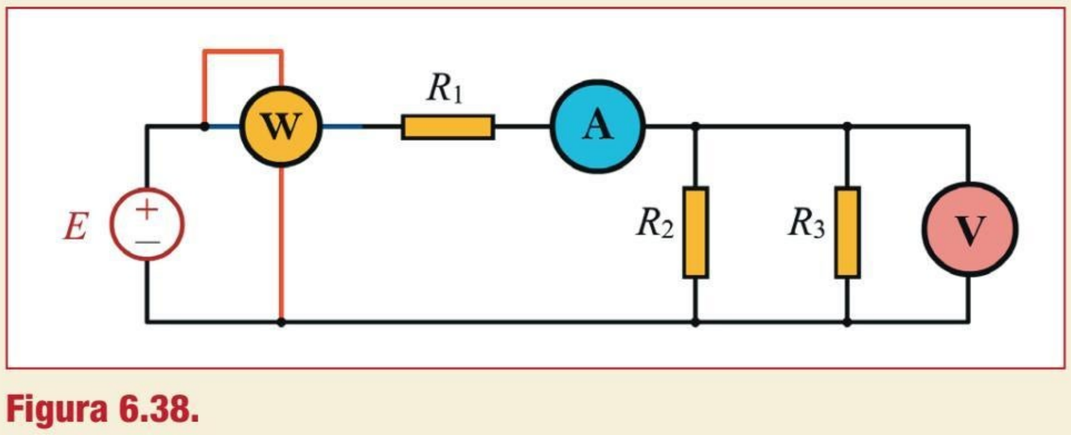


Figura 6.38.

6.4. En el circuito de la Figura 6.39, el amperímetro, que se supone ideal, nos da una lectura de 3,009 A. Determina:

a) La caída de tensión o *ddp* en la resistencia R_4.

b) La tensión de la fuente V_1.

c) La corriente suministrada por el generador.

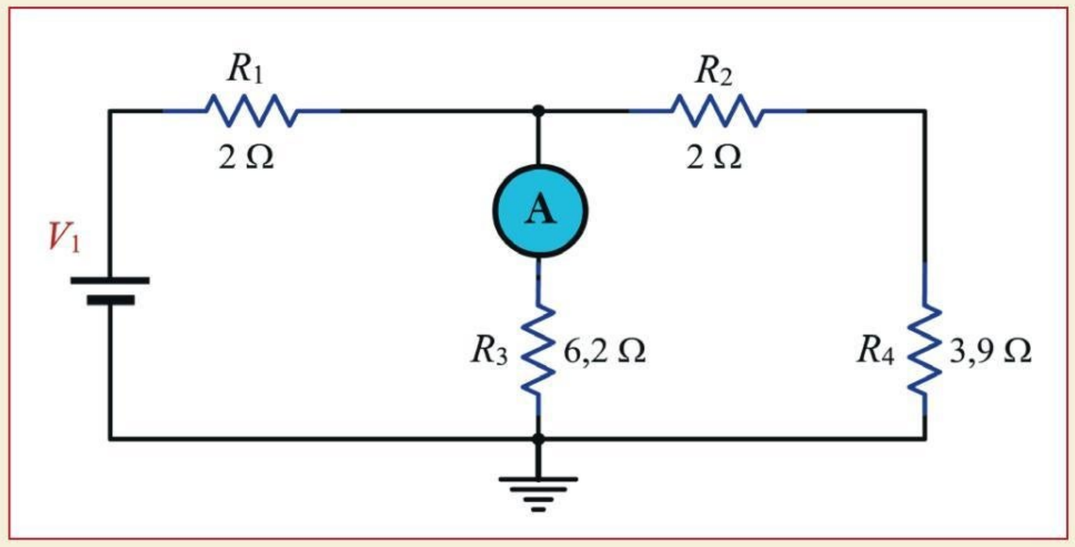


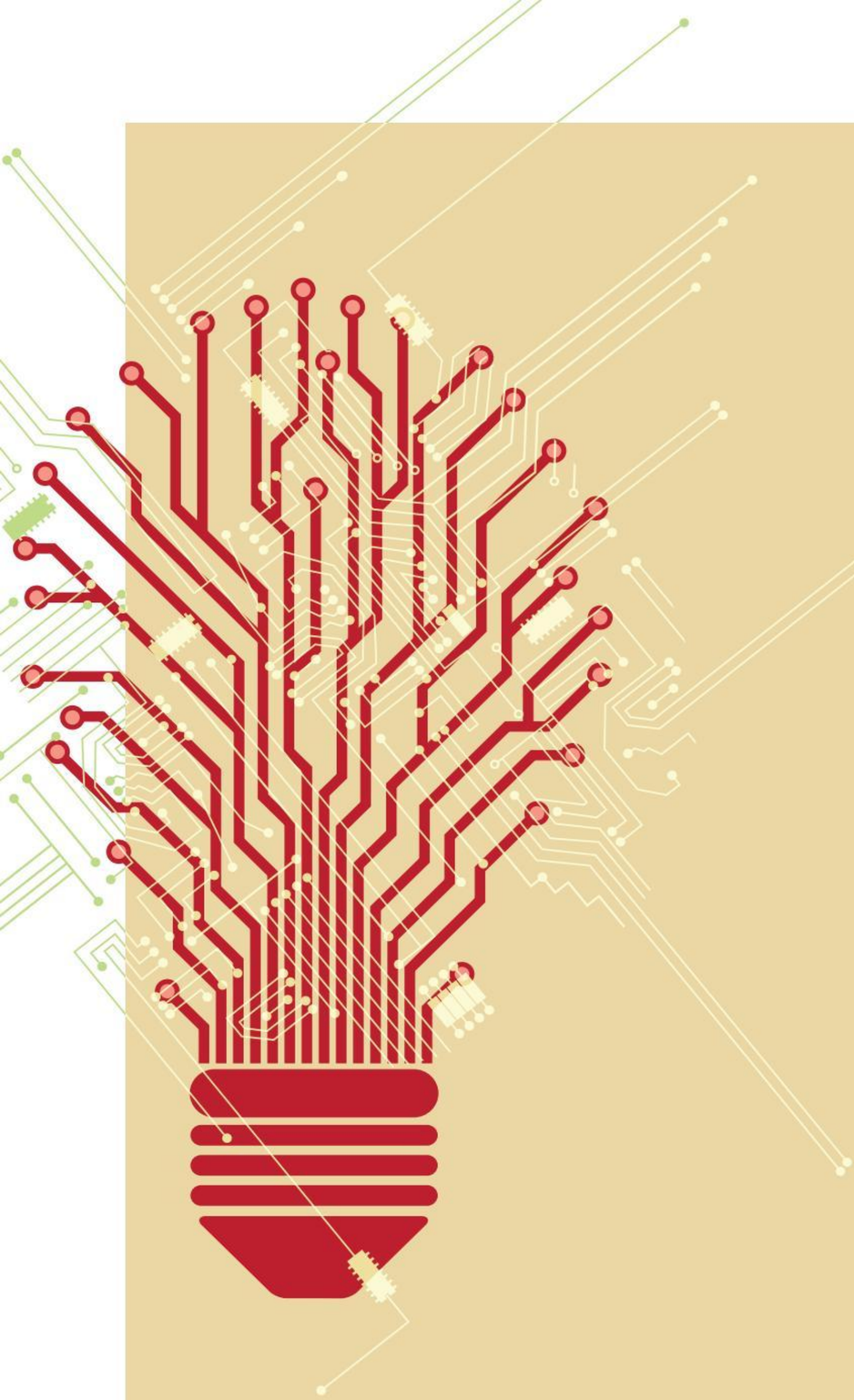
Figura 6.39.

Actividades de ampliación

Con el fin de conseguir una mayor profundización en la materia, se han incluido los enunciados de una serie de ***«actividades de evaluación propuestas de ampliación (6)»*** para esta unidad que podrás encontrar dentro del MATERIAL WEB elaborado para este texto. Selecciona alguna de estas actividades y encuentra su solución.

© Ediciones Paraninfo

7 Resolución de circuitos con varias mallas



Contenidos

- **7.1.** Leyes de Kirchhoff
- **7.2.** Ecuaciones de las mallas o de Maxwell
- **7.3.** Resolución de circuitos mediante transformaciones de triángulo a estrella
- **7.4.** Resolución de circuitos mediante transformaciones de estrella a triángulo
- **7.5.** Teorema de la superposición
- **7.6.** Teorema de Thévenin

Hasta ahora, hemos estudiado métodos de resolución de circuitos eléctricos en los que únicamente existía una red de resistencias. En multitud de aplicaciones nos podemos encontrar con redes complejas, donde se interconectan resistencias con generadores. En estos casos, para llegar a la solución deseada es necesario emplear métodos de resolución específicos, tales como las leyes de Kirchhoff, las transformaciones de un circuito de triángulo a estrella y viceversa, el teorema de la superposición y el teorema de Thévenin.

Objetivos

- Realizar los cálculos precisos para resolver un circuito eléctrico con varias cargas o varios generadores conectados entre sí.
- Emplear el método más idóneo para la resolución de un circuito de C.C.
- Aplicar las leyes de Kirchhoff para la resolución de circuitos con varias mallas en C.C.
- Utilizar las transformaciones de triángulo a estrella y viceversa para la obtención de la resistencia equivalente de un circuito complejo.
- Resolver circuitos aplicando los teoremas de superposición y Thévenin.

7.1. Leyes de Kirchhoff

Estas leyes se utilizan para resolver circuitos eléctricos complejos, en los cuales existen interconectados varios generadores y receptores.

En el siguiente ejemplo se muestra un circuito de este tipo.

En el circuito de la Figura 7.1 se han conectado en paralelo dos baterías de acumuladores que suministran energía a una lámpara de 10 Ω. La batería n.º 1 produce una f. e. m. $E_1 = 12$ V con una resistencia interna $r_1 = 0{,}2$ Ω. En la batería n.º 2, $E_2 = 11$ V, $r_2 = 0{,}1$ Ω. Calcula la tensión que aparece en bornes de la lámpara, así como la intensidad y potencia de esta. ¿Qué corriente cede cada una de las baterías? Este problema se puede resolver aplicando adecuadamente las leyes de Kirchhoff.

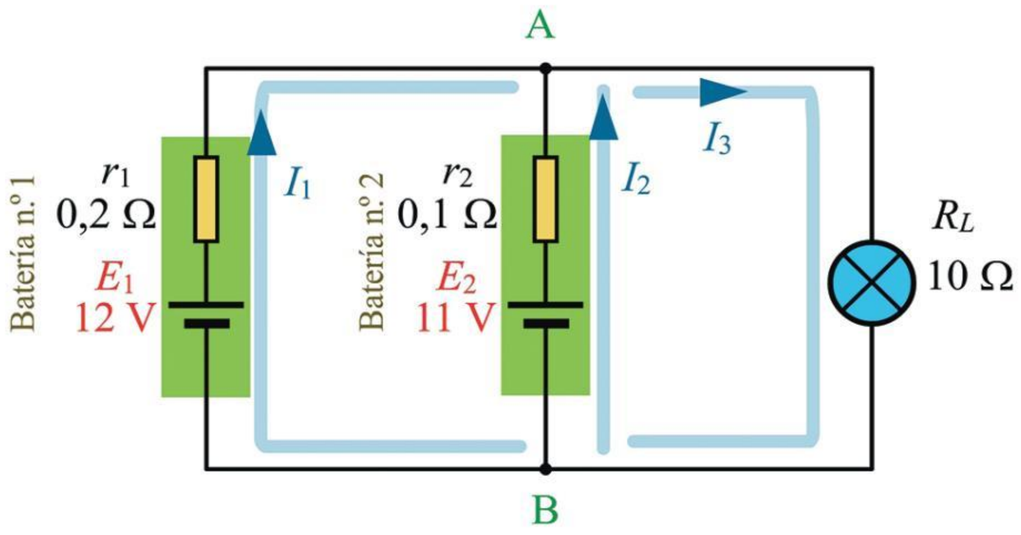


Figura 7.1.

1.ª ley de Kirchhoff

En cierto modo, esta ley ya la hemos estado aplicando para la resolución de los circuitos en paralelo. Dice así:

> En todo circuito eléctrico, la suma de las corrientes que se dirigen hacia un nudo es igual a la suma de las intensidades que se alejan de él.

Un **nudo** es cualquier punto de un circuito donde se conectan más de dos conductores. En el ejemplo mostrado en la Figura 7.1 existen el nudo A y el nudo B.

En el nudo A se cumplirá que (Figura 7.2):

$$I_1 + I_2 = I_3$$

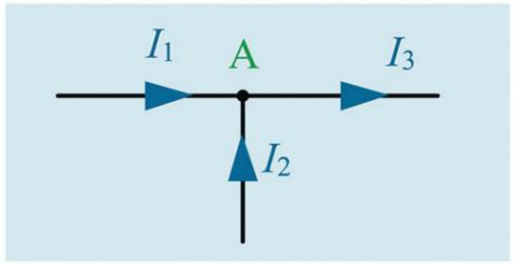


Figura 7.2. Nudo.

2.ª ley de Kirchhoff

Esta otra ley también es conocida por todos nosotros, ya que la hemos aplicado en la resolución de circuitos en serie.

En un circuito cerrado, la suma algebraica de las fuerzas electromotrices de los generadores es igual a la suma algebraica de las caídas de tensión en los receptores. Dado que tanto las f. e. m. como las caídas de tensión son al fin y al cabo diferencias de potencial, también se podría enunciar esta ley así:

> A lo largo de todo camino cerrado o malla, correspondiente a un circuito eléctrico, la suma algebraica de todas las diferencias de potencial o tensiones es igual a cero.

La única dificultad que encontramos para aplicar de esta última manera la 2.ª ley de Kirchhoff es determinar qué diferencias de potencial son de un determinado signo respecto a las otras, y así conseguir igualarlas a cero.

Una **malla** es todo camino cerrado de un circuito eléctrico. En nuestro ejemplo se pueden apreciar claramente la malla M_1 y la malla M_2. Las hemos representado en el circuito mediante una flecha curvada que nos indica el recorrido de las mismas (Figura 7.4). La malla M_1 se cierra por la batería de 12 V junto con su resistencia interna de 0,2 Ω, continúa por la resistencia interna de 0,1 Ω de la segunda batería, para acabar cerrando el circuito por la batería de 11 V. La malla M_2 lo hace por la batería de 11 V y su correspondiente resistencia interna de 0,1 Ω y se cierra por la resistencia de 10 Ω de la lámpara.

Antes de aplicar esta segunda ley, conviene establecer una regla de signos que nos indique las polaridades correctas de cada una de las diferencias de potencias que aparecen en cada malla.

Marcamos con una flecha la f. e. m. del generador (la punta de la flecha siempre nos indica el potencial positivo). La intensidad que parte del generador la indicamos con una flecha (sentido convencional de la corriente) del mismo sentido que la f. e. m. (Figura 7.3).

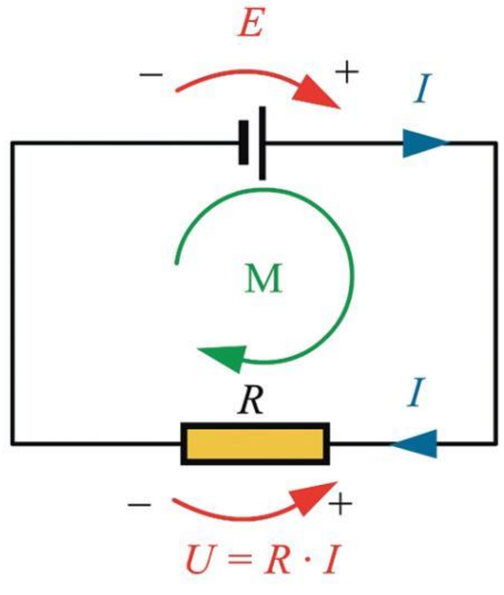


Figura 7.3. Polaridad de las diferencias de potencial en una malla.

© Ediciones Paraninfo

Marcamos con otra flecha la caída de tensión en el receptor ($U = RI$); para que el terminal positivo de esta caída de tensión quede situado en la punta de la flecha, su sentido será siempre contrario al de la intensidad que recorre.

Si ahora aplicamos la 2.ª ley de Kirchhoff a la malla formada, según el sentido marcado en la Figura 7.3, tendremos que: la fuerza electromotriz E se manifiesta en el mismo sentido que la malla M, luego será positiva; la caída de tensión RI se manifiesta en sentido contrario al de la malla, luego será negativa. De esta forma tendremos la siguiente ecuación:

$$E - RI = 0$$

ecuación que nos indica que, efectivamente, $E = RI$.

¿Cómo se aplican las leyes de Kirchhoff para la resolución de circuitos?

a) Se fija provisionalmente el sentido de las intensidades de corriente por cada una de las ramas del circuito (una vez resuelto el sistema de ecuaciones planteado, conoceremos el verdadero sentido de las mismas), partiendo del principio de que los generadores proporcionan corriente por su terminal positivo (sentido de corriente convencional).

b) La aplicación de la segunda ley requiere fijar previamente y de forma arbitraria un sentido para recorrer cada una de las mallas. Las f.e.m. y las caídas de tensión se consideran positivas si la flecha que indica su sentido coincide con el marcado por nosotros en la malla, y negativa en el caso contrario.

c) Se aplicará la 1.ª ley a todos los nudos del circuito excepto a uno (esto se hace para no escribir ecuaciones repetidas).

d) Se aplicará la 2.ª ley a tantas mallas o circuitos cerrados como sea necesario para disponer de un sistema de tantas ecuaciones como incógnitas.

Actividad resuelta 7.1

Resuelve ahora el ejemplo presentado al inicio en la Figura 7.1.

Solución:

En un principio, se ha supuesto que las intensidades I_1 e I_2 parten de los generadores hacia la lámpara (según el sentido convencional), donde se juntan y forman I_3. Los términos 0,2 I_1 y 0,1 I_2 corresponden a las caídas de tensión de los respectivos generadores ($u = r_i I$). El término 10 I_3 corresponde a la tensión en bornes de la lámpara ($U_L = R \cdot I$) (Figura 7.4).

Nudo A (1) $I_1 + I_2 = I_3$

Malla M_1 (2) $12 - 0{,}2\ I_1 + 0{,}1\ I_2 - 11 = 0$

Malla M_2 (3) $11 - 0{,}1\ I_2 - 10\ I_3 = 0$

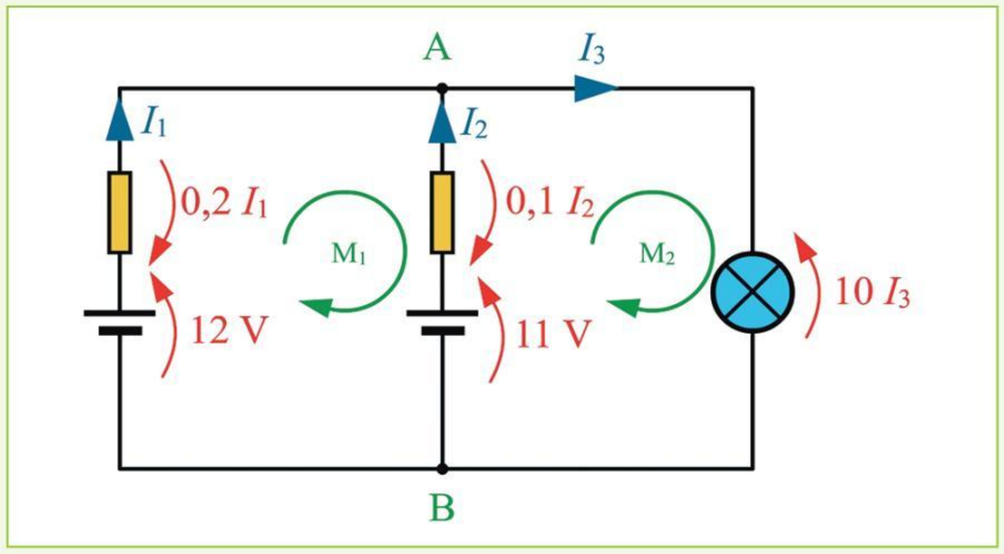


Figura 7.4.

Al recorrer la malla M_1, la caída de tensión 0,2 I_1 y los 11 V del generador n.º 2 quedan en sentido contrario a los 12 V del generador n.º 1 y a la caída de tensión 0,1 I_2 (Figura 7.5).

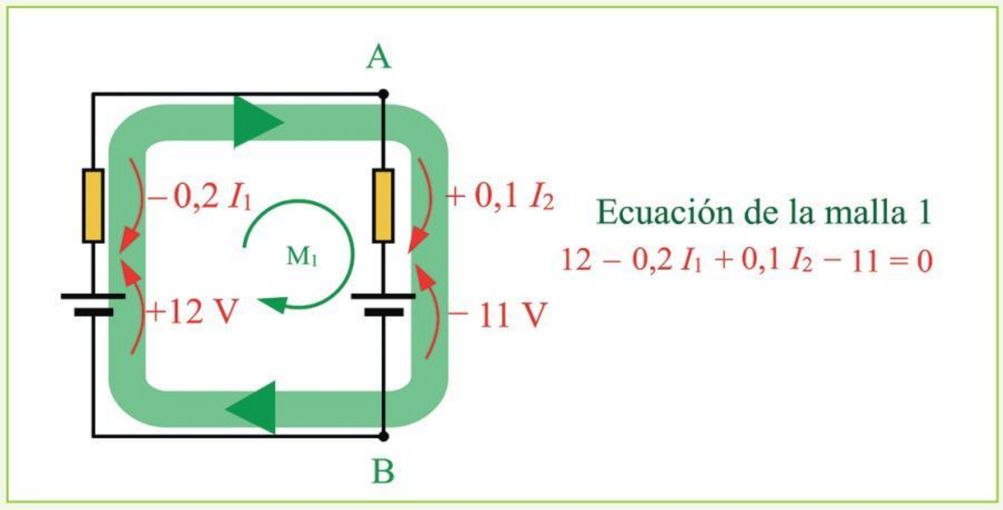


Figura 7.5.

Al recorrer la malla M_2, la caída de tensión 0,1 I_2 y la tensión en bornes de la lámpara 10 I_3 quedan en sentido contrario a los 11 V del generador n.º 2 (Figura 7.6).

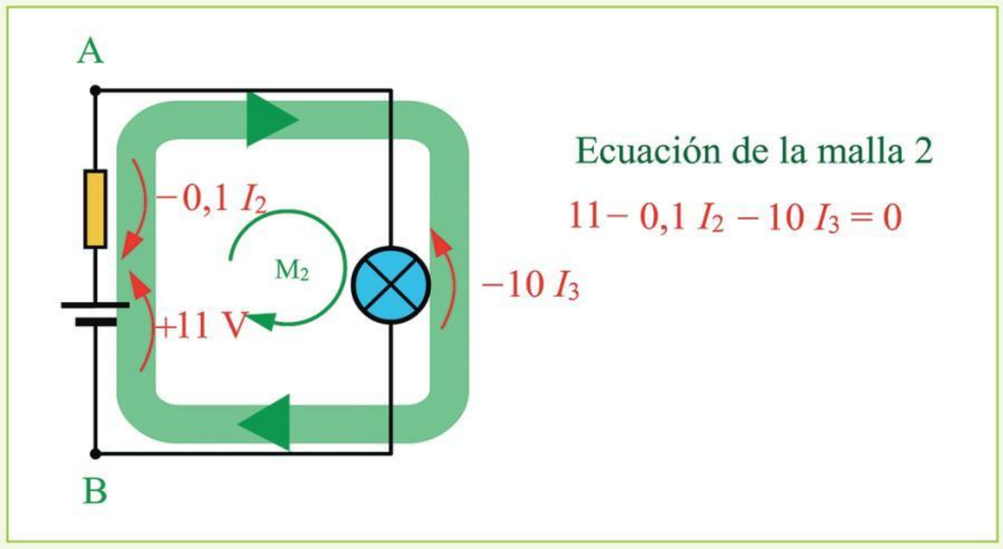


Figura 7.6.

Ahora solo nos queda resolver el sistema de tres ecuaciones con tres incógnitas (I_1, I_2 e I_3). Para ello, nos valemos de cualquiera de los métodos conocidos: reducción, sustitución e igualación. En nuestro caso sustituiremos los términos de la ecuación (1) en la ecuación (3). De esta forma eliminamos una ecuación y una incógnita:

(3) $11 - 0{,}1\ I_2 - 10\ (I_1 + I_2) = 0$, simplificando:

(3) $11 - 10\ I_1 - 10{,}1\ I_2 = 0$, y con la ecuación n.º 2:

(2) $1 - 0{,}2\ I_1 + 0{,}1\ I_2 = 0$

© Ediciones Paraninfo

Al multiplicar la ecuación (2) por 101 y sumar este resultado a la ecuación (3) se elimina I_2:

$$\begin{array}{l} (3)\ 11 - 10\ I_1 - 10{,}1\ I_2 = 0 \\ (2)\ 101 - 20{,}2\ I_1 + 10{,}1\ I_2 = 0 \\ \hline 112 - 30{,}2\ I_1 = 0 \end{array}$$

de donde: $$I_1 = \frac{112}{30{,}2} = 3{,}71 \text{ A}$$

Se sustituye este resultado en la ecuación (2), y se tiene:

$$1 - 0{,}2(3{,}71) + 0{,}1\ I_2 = 0$$

$$I_2 = \frac{0{,}2(3{,}71) - 1}{0{,}1} = -2{,}58 \text{ A}$$

y en la ecuación (1) obtenemos:

$$I_3 = 3{,}71 - 2{,}58 = 1{,}13 \text{ A}$$

Que la corriente I_2 haya salido negativa nos indica que la batería de acumuladores n.º 2 no está aportando energía a la lámpara. Por el contrario, está tomando 2,58 A de la batería n.º 1. En este caso, esta corriente sirve para cargar los acumuladores de la n.º 2.

La batería n.º 1 aporta 1,13 A a la lámpara y 2,58 A a la batería n.º 2 que se comporta como si fuese un receptor (recuerda que cuando la corriente queda en sentido contrario al de la tensión se trata de un receptor).

La tensión en bornes de la lámpara y su potencia es:

$$U_{AB} = R_L I_3 = 10 \cdot 1{,}13 = 11{,}3 \text{ V}$$

$$P_1 = U_{AB} I_3 = 11{,}3 \cdot 1{,}13 = 12{,}8 \text{ W}$$

Nota: Los sistemas con tres ecuaciones se pueden resolver también mediante determinantes y calculando las incógnitas por el sistema de Cramer. En la actualidad existen muchas calculadoras científicas que también permiten resolver estos sistemas de ecuaciones de forma rápida y sencilla. Además, con la ayuda de una hoja de Microsoft Excel en combinación con el sistema de resolución por determinantes (función MDETERM) podremos realizar estas operaciones en muy poco tiempo.

En relación con esta úlima nota, en el MATERIAL WEB que se ha elaborado para este texto se han incluido los siguientes documentos:

a) *Cómo resolver un sistema de ecuaciones mediante determinantes por el método de Cramer.*

b) *Cómo resolver el sistema de ecuaciones de la Actividad resuelta 7.1 con la ayuda de una hoja de Microsoft Excel y determinantes.*

Actividad resuelta 7.2

Se conectan en serie tres baterías de acumuladores, tal como se muestra en el circuito de la Figura 7.7, para alimentar un horno de 5 Ω de resistencia. Determina la tensión en bornes del horno, así como su tensión y potencia.

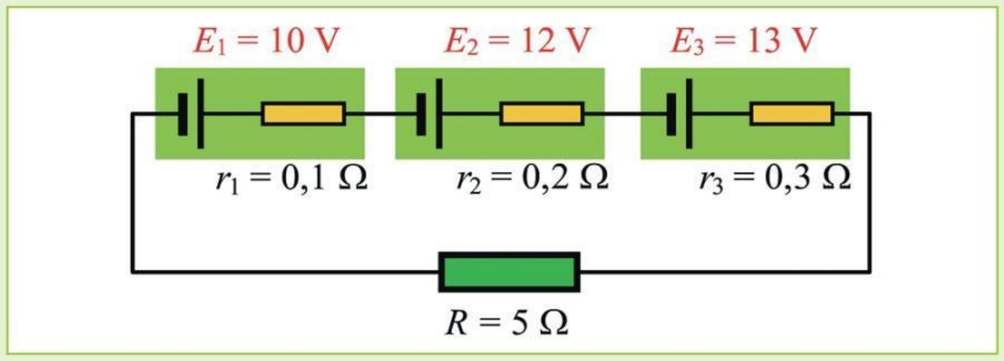


Figura 7.7.

Solución:

Primero marcamos el sentido de la corriente eléctrica y el de las diferentes tensiones del circuito (Figura 7.8). Como no hay más que una malla, la ecuación se compone aplicando la 2.ª ley de Kirchhoff:

$$10 - 0{,}1\ I + 12 - 0{,}2\ I + 13 - 0{,}3\ I - 5\ I = 0$$

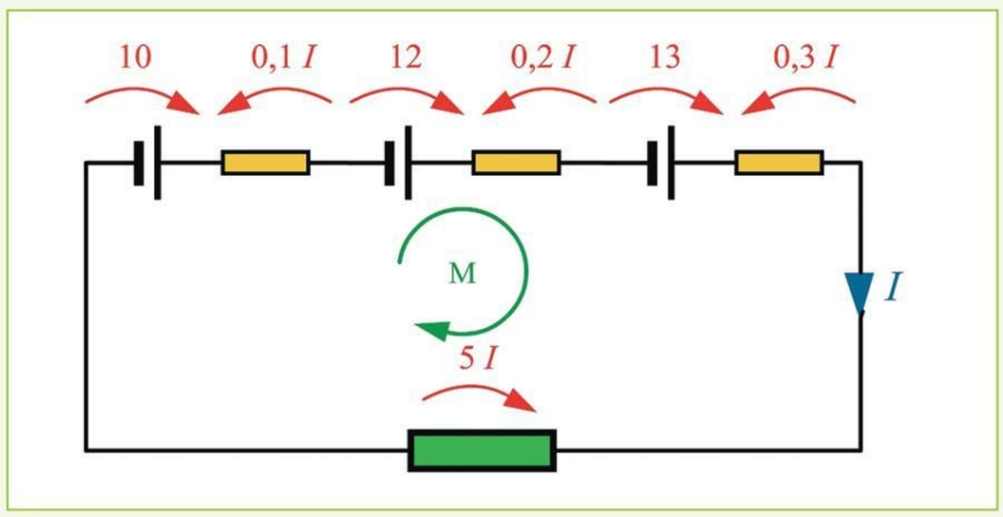


Figura 7.8.

Agrupando términos:

$$(10 + 12 + 13) - I(0{,}1 + 0{,}2 + 0{,}3 + 5) = 0$$

y despejando, tenemos que:

$$I = \frac{35}{5{,}6} = 6{,}25 \text{ A}$$

Tensión en bornes del horno: $U = RI = 5 \cdot 6{,}25 = 31{,}25$ V

Potencia del horno: $P = UI = 31{,}25 \cdot 6{,}25 = 195$ W

Actividad resuelta 7.3

Determina las corrientes por cada una de las ramas del circuito de la Figura 7.9.

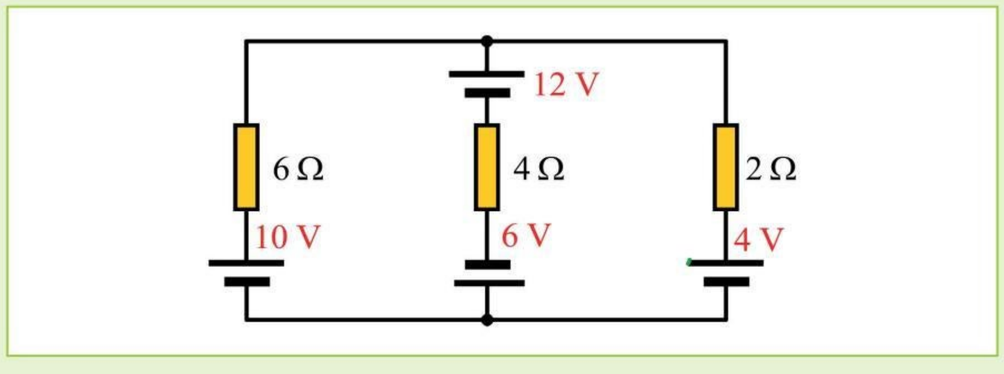


Figura 7.9

© Ediciones Paraninfo

Solución:

Primero marcamos el sentido de la corriente eléctrica y el de las diferentes tensiones del circuito (Figura. 7.10).

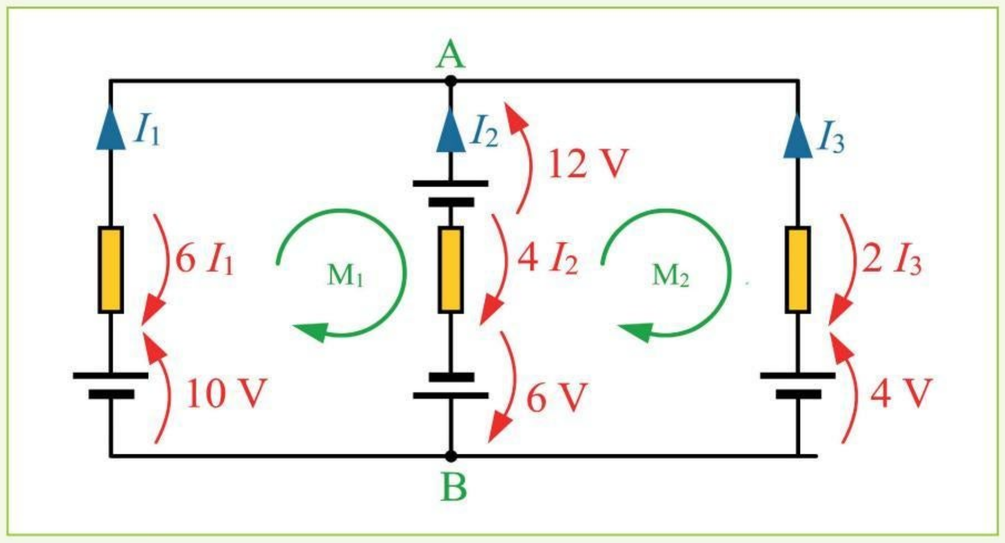


Figura 7.10.

Al aplicar la primera y segunda ley de Kirchhoff al circuito obtenemos las siguientes ecuaciones:

Nudo A: $I_1 + I_2 + I_3 = 0$

Malla 1: $10 - 6I_1 - 12 + 4I_2 + 6 = 0$

Malla 2: $-6 - 4I_2 + 12 + 2I_3 - 4 = 0$

Ordenamos y simplificamos el sistema de ecuaciones:

(1): $I_1 + I_2 + I_3 = 0$

(2): $-6I_1 + 4I_2 + 0I_3 = -4$

(3): $0I_1 - 4I_2 + 2I_3 = -2$

Aplicando la regla de Cramer, o por cualquier otro método adecuado para la resolución de sistemas de ecuaciones, se llega al siguiente resultado:

$$I_1 = 0{,}727 \text{ A}$$
$$I_2 = 0{,}091 \text{ A}$$
$$I_3 = -0{,}818 \text{ A}$$

En el MATERIAL WEB que se ha elaborado para este texto podrás encontrar la hoja de Microsof Excel con la que se ha resuelto este sistema de ecuaciones.

Actividad propuesta 7.1

Determina las corrientes por cada una de las ramas de los circuitos de las Figuras 7.11, 7.12 y 7.13.

a)

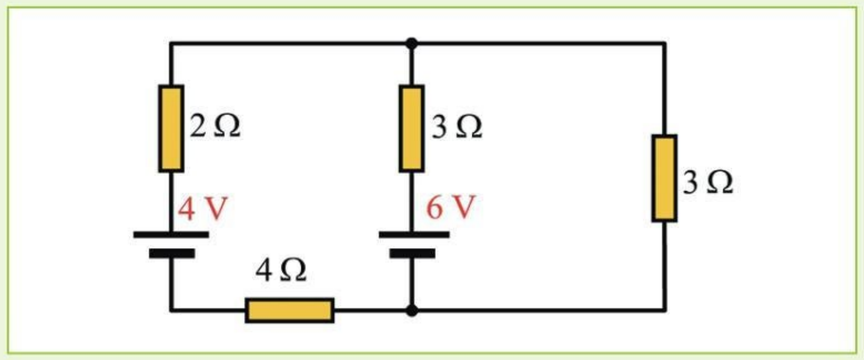


Figura 7.11.

b)

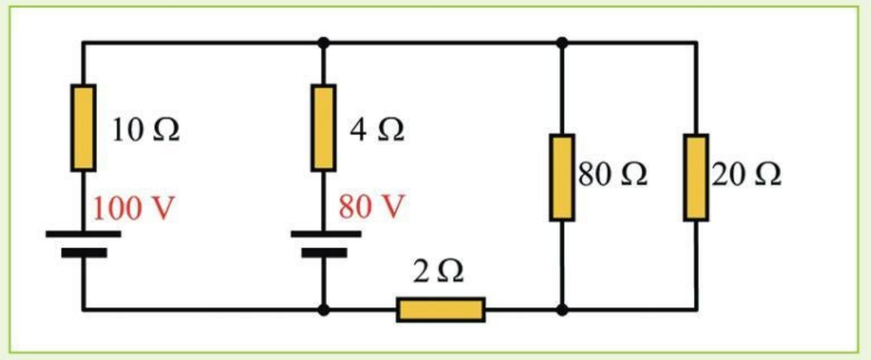


Figura 7.12.

c)

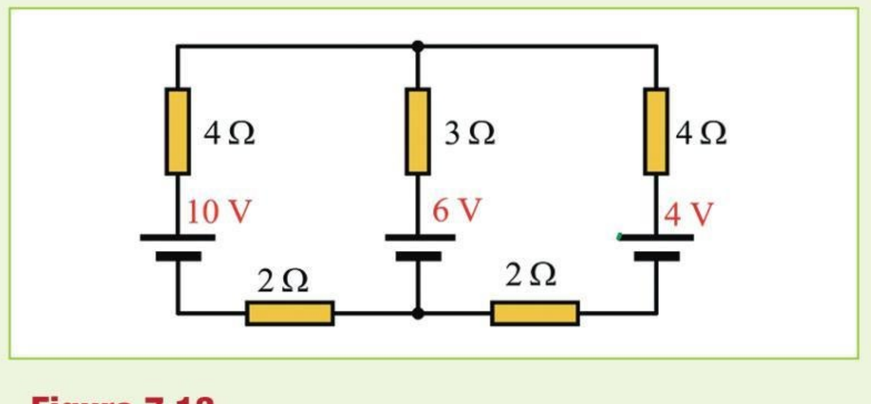


Figura 7.13.

La solución a esta Actividad propuesta la puedes encontrar dentro del MATERIAL WEB elaborado para este texto.

7.2. Ecuaciones de las mallas o de Maxwell

Con la idea de simplificar el número de ecuaciones que se plantean en la resolución de un circuito, Maxwell desarrolló el siguiente sistema que parte de la segunda ley de Kirchhoff.

Se supone que las diferentes mallas del circuito son recorridas por lo que se conoce como corrientes de mallas. El número de ecuaciones necesarias para resolver el circuito será igual al número de incógnitas planteadas, que en este caso coincidirá con las corrientes de malla. Para entender esto mejor vamos a resolver la siguiente actividad.

Actividad resuelta 7.4

Averigua las corrientes I_1, I_2 e I_3 que fluyen por cada una de las ramas del circuito de la Figura 7.14.

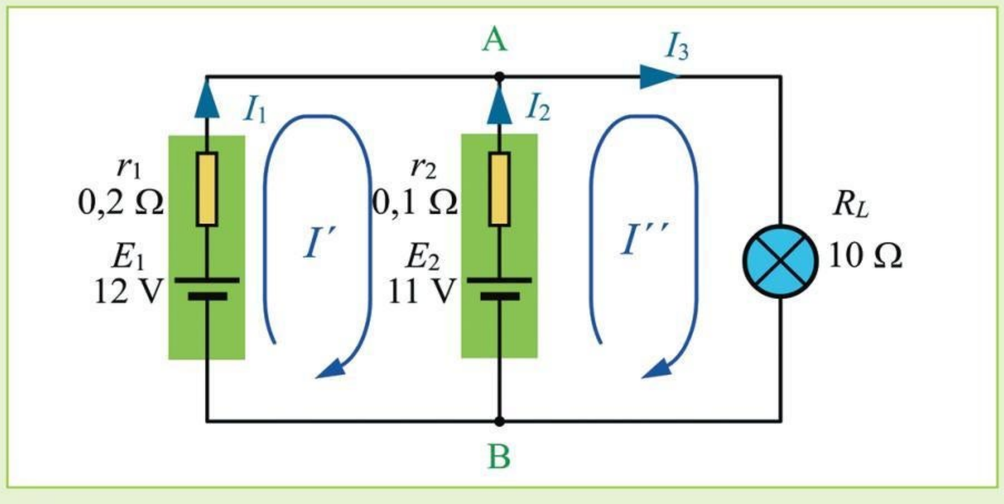


Figura 7.14.

© Ediciones Paraninfo

Solución:

Observa cómo ahora aparecen en las mallas 1 y 2 las corrientes de malla I' e I'', respectivamente. La corriente I' fluye a través de E_1, r_1, r_2 y E_2. Por otro lado, la corriente I'' lo hace por r_2, E_2 y R_L.

Para averiguar el valor de las corrientes de malla planteamos la segunda ley de Kirchhoff en ambas mallas, aplicando los mismos criterios de signos que en otras ocasiones (Figura 7.15).

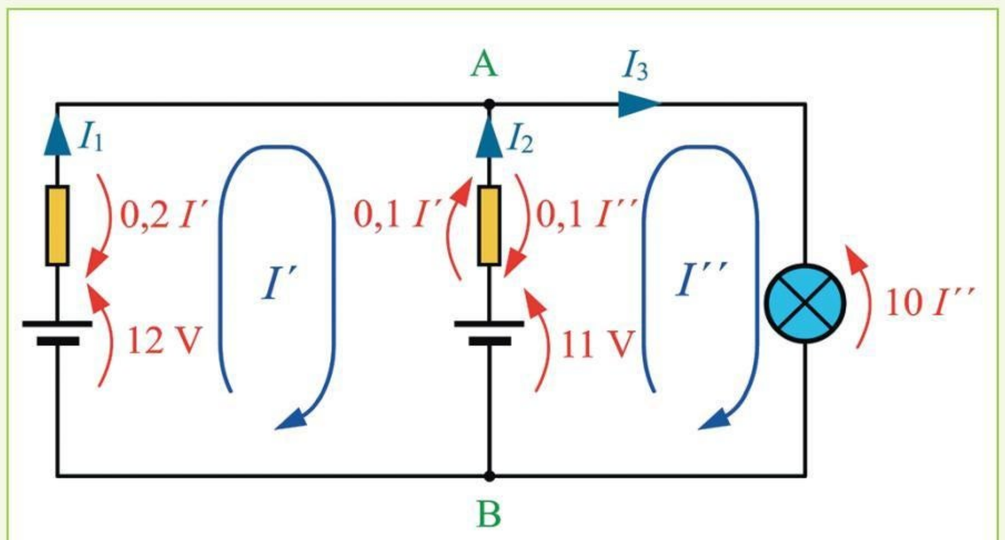


Figura 7.15.

(1) Ecuación para la corriente de malla I':

$$12 - 0{,}2\ I' - 0{,}1\ I' + 0{,}1\ I'' - 11 = 0$$

(2) Ecuación para la corriente de malla I'':

$$11 - 0{,}1\ I'' + 0{,}1\ I' - 10\ I'' = 0$$

Con estas dos ecuaciones ya podemos averiguar los valores de I' e I'' (observa que aplicando las ecuaciones de Maxwell para resolver este circuito estamos necesitando una ecuación menos que si hubiésemos aplicado las dos leyes de Kirchhoff).

Simplificando y ordenando tenemos que:

(1) $1 - 0{,}3\ I' + 0{,}1\ I'' = 0$

(2) $11 + 0{,}1\ I' - 10{,}1\ I'' = 0$

Al multiplicar la ecuación (2) por 3 y sumar este resultado a la ecuación (1) se elimina I':

$$(1)\ 1 - 0{,}3\ I' + 0{,}1\ I'' = 0$$
$$(2)\ 33 + 0{,}3\ I' - 30{,}3\ I'' = 0$$
$$34 - 30{,}2\ I'' = 0$$

de donde: $$I'' = \frac{34}{30{,}2} = 1{,}13 \text{ A}$$

Sustituimos este resultado en la ecuación (1):

$$1 - 0{,}3\ I' + 0{,}1\ (1{,}13) = 0$$
$$1 - 0{,}3\ I' + 0{,}113 = 0$$
$$I' = \frac{1 + 0{,}113}{0{,}3} = 3{,}71 \text{ A}$$

Una vez que ya conocemos las corrientes de malla, ya podemos calcular las corrientes de rama I_1, I_2 e I_3.

Para la corriente de rama I_1 observamos en el circuito de la Figura 7.14 que esta corriente es igual a la de malla I':

$$I_1 = I' = 3{,}71 \text{ A}$$

Lo mismo ocurre para la corriente de rama I_3 que es igual a la de malla I'':

$$I_3 = I'' = 1{,}13 \text{ A}$$

Si observas atentamente el circuito de la Figura 7.14 podrás apreciar que la corriente I_2 es la diferencia de las corrientes de ambas mallas que comparte ($I'' - I'$) (la que va en el mismo sentido menos la que va en sentido contrario):

$$I_2 = I'' - I' = 1{,}13 - 3{,}71 = -2{,}58 \text{ A}$$

En la Figura 7.16 se explica de forma gráfica cómo se han realizado estas últimas operaciones.

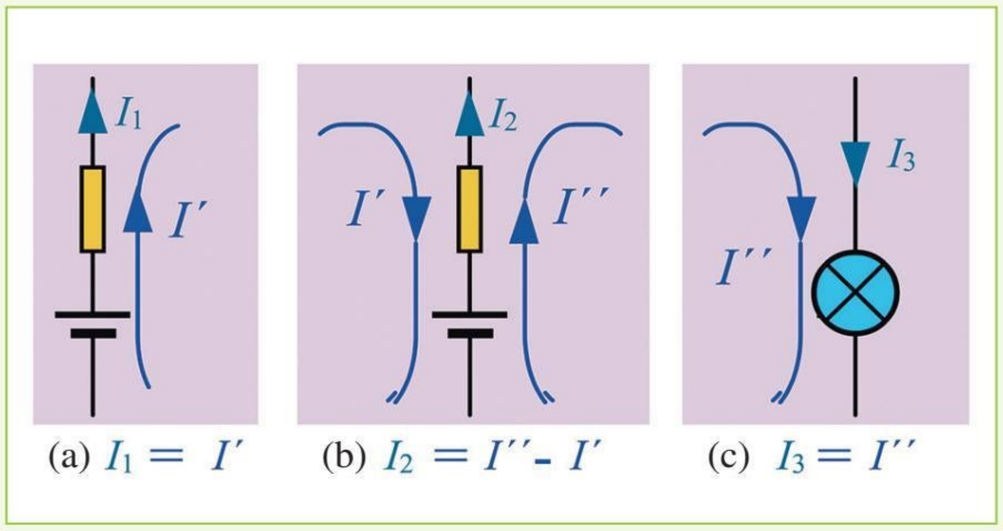


Figura 7.16.

Podrás comprobar que hemos obtenido el mismo resultado al resolver este circuito mediante la aplicación de las dos leyes de Kirchhoff y la aplicación de las ecuaciones de Maxwell.

Actividad resuelta 7.5

Se conectan en paralelo tres generadores de 24 V de resistencia interna 0,1 Ω, 0,2 Ω y 0,3 Ω, respectivamente. Determina la corriente que suministra cada generador a una carga de 10 Ω, así como la tensión y la potencia a la que trabaja la misma.

Solución:

El circuito que corresponde al planteamiento de este ejemplo es el de la Figura 7.17 y las ecuaciones correspondientes son las que se indican a continuación:

(1) $24 - 0{,}1\ I' - 0{,}2\ I' + 0{,}2\ I'' - 24 = 0$

(2) $24 - 0{,}2\ I'' + 0{,}2\ I' - 0{,}3\ I'' + 0{,}3\ I''' - 24 = 0$

(3) $24 - 0{,}3\ I''' + 0{,}3\ I'' - 10\ I''' = 0$

© Ediciones Paraninfo

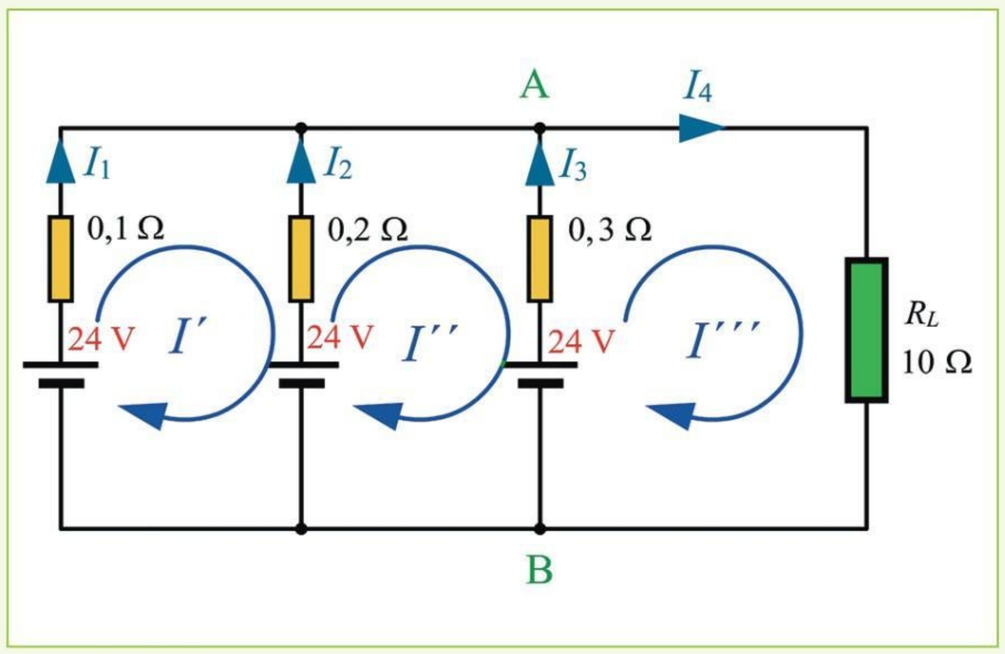


Figura 7.17.

Ordenamos y simplificamos el sistema de ecuaciones:

(1) $-0{,}3\ I' + 0{,}2\ I'' + 0\ I''' = 0$

(2) $0{,}2\ I' - 0{,}5\ I'' + 0{,}3\ I''' = 0$

(3) $0\ I' + 0{,}3\ I'' - 10{,}3\ I''' = -24$

Aplicando la regla de Cramer, o por cualquier otro método adecuado para la resolución de sistemas de ecuaciones, se llega al siguiente resultado para las corrientes de malla:

$$I' = 1{,}302 \text{ A};$$

$$I'' = 1{,}953 \text{ A};$$

$$I''' = 2{,}387 \text{ A};$$

Al observar la Figura 7.17 podremos establecer la relación existente entre las corrientes de rama y las de malla, concluyendo que:

$$I_1 = I' = 1{,}302 \text{ A};$$

$$I_2 = I'' - I' = 1{,}953 - 1{,}302 = 0{,}651 \text{ A}$$

$$I_3 = I''' - I'' = 2{,}387 - 1{,}953 = 0{,}434 \text{ A}$$

$$I_4 = I''' = 2{,}387 \text{ A}$$

Siguiendo los mismos pasos que en las actividades anteriores obtenemos la tensión y potencia en la resistencia de carga.

$$(U_{AB} = 23{,}87 \text{ V}; P = 56{,}98 \text{ W})$$

En el MATERIAL WEB que se ha elaborado para este texto podrás encontrar la hoja de Microsoft Excel con la que se ha resuelto el sistema de ecuaciones.

Actividad resuelta 7.6

Determina las corrientes por cada una de las ramas del circuito de la Figura 7.18.

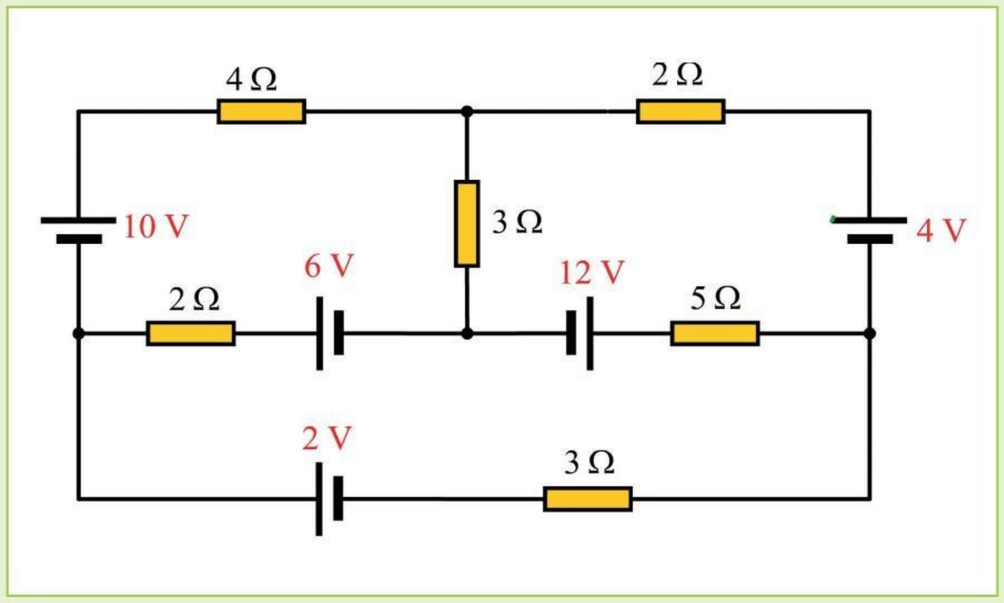


Figura 7.18.

Solución:

Lo primero que hacemos es establecer las intensidades de corriente por cada rama (I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, e I_6) y su sentido hipotético. Además, establecemos las corrientes por las tres mallas del circuito (I', I'' e I'''), y marcamos las caídas de tensión que aparecen en todas las cargas, así como el de las f.e.m. de los generadores con su polaridad correspondiente (Figura 7.19).

Recuerda que lo convenido para establecer el sentido de las tensiones (flechas rojas), es que las de los generadores llevan la punta de la flecha en el positivo, mientras que las caídas de tensión en las resistencias se marcan en sentido contrario al de la corriente de malla que las recorre.

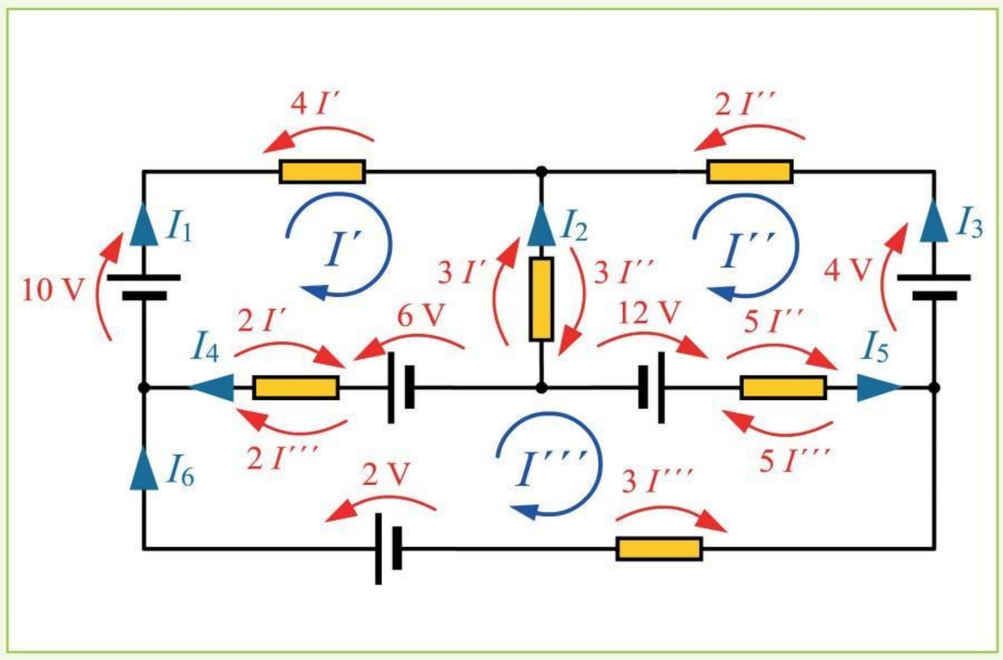


Figura 7.19.

Las ecuaciones de Maxwell que obtenemos en las tres mallas son:

Malla I' : $10 - 4I' - 3I' + 3I'' + 6 - 2I' + 2I''' = 0$

Malla I'' : $-3I'' + 3I' - 2I'' - 4 - 5I'' + 5I''' - 12 = 0$

Malla I''': $2 + 2I''' + 2I' - 6 + 12 + 5I'' - 5I''' - 3I''' = 0$

Ordenamos y simplificamos el sistema de ecuaciones:

(1) $-9I' + 3I'' + 2I''' = -16$

(2) $3I' - 10I'' + 5I''' = 16$

(3) $2I' + 5I'' - 10I''' = -8$

© Ediciones Paraninfo

Aplicando la regla de Cramer, o por cualquier otro método adecuado para la resolución de sistemas de ecuaciones, se llega al siguiente resultado para las corrientes de malla:

$$I' = 1{,}732 \text{ A};$$

$$I'' = -0{,}676 \text{ A};$$

$$I''' = 0{,}808 \text{ A};$$

Al observar la Figura 7.19 podremos establecer la relación existente entre las corrientes de rama y las de malla, concluyendo que:

$I_1 = I' = 1{,}732$ A

$I_2 = I'' - I' = -0{,}676 - 1{,}732 = -2{,}408$ A

$I_3 = I'' = -0{,}676$ A

$I_4 = I' - I''' = 1{,}732 - 0{,}808 = 0{,}924$ A

$I_5 = I''' - I'' = 0{,}808 + 0{,}676 = 1{,}484$ A

$I_6 = I''' = 0{,}808$ A

Actividad propuesta 7.2

Determina las corrientes por cada una de las ramas del circuito de las Figura 7.20.

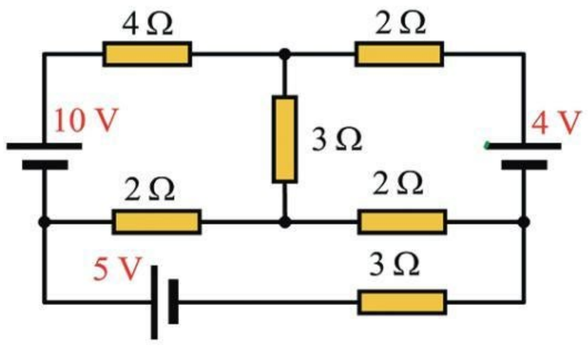


Figura 7.20.

La solución a esta Actividad propuesta la puedes encontrar dentro del MATERIAL WEB elaborado para este texto.

7.3. Resolución de circuitos mediante transformaciones de triángulo a estrella

En el circuito de la Figura 7.21 se pide encontrar la resistencia equivalente. Como podrás comprobar, no existe ninguna resistencia que esté conectada en serie ni en paralelo con otra. Una forma de resolver este ejercicio sería aplicar las leyes de Kirchhoff. Sin embargo, resulta más sencillo aplicar el método de transformar resistencias conectadas en triángulo a estrella.

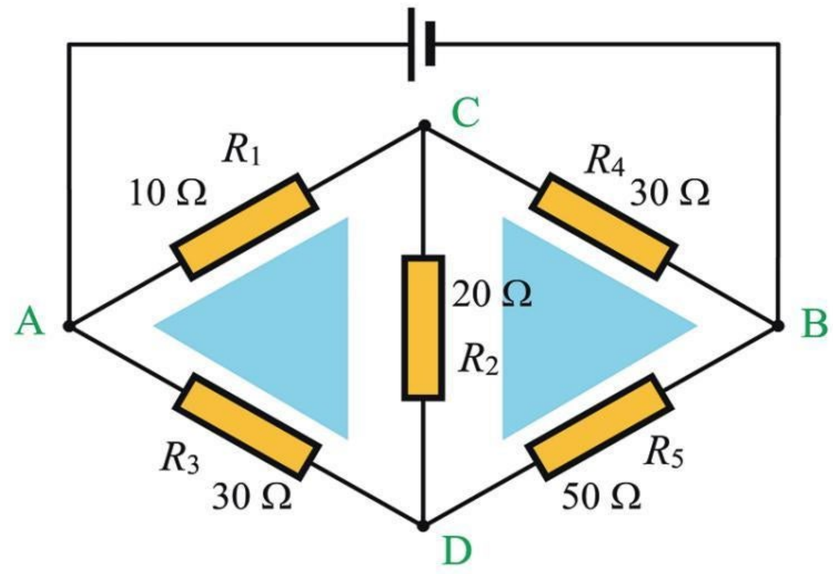


Figura 7.21.

Observa cómo las resistencias R_1, R_2 y R_3 forman un triángulo (Figura 7.22).

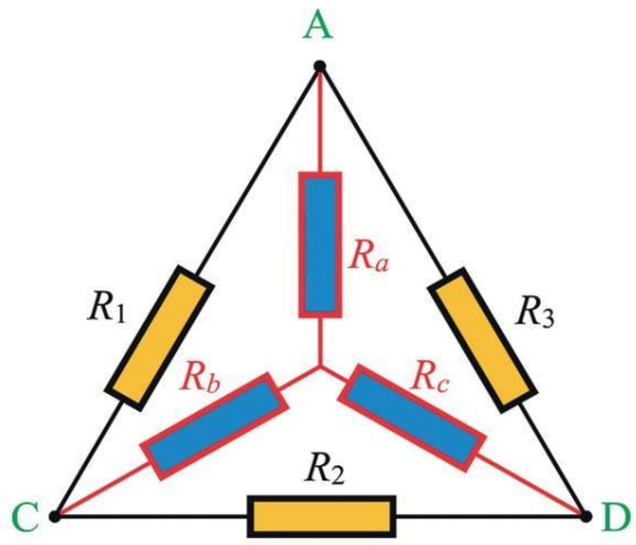


Figura 7.22. Transformación de triángulo a estrella.

Aplicando las leyes de Kirchhoff se pueden obtener las resistencias equivalentes de un circuito equivalente en forma de estrella. Las ecuaciones que corresponden a estas relaciones son:

$$R_a = \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_2 + R_3}$$

$$R_b = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2 + R_3}$$

$$R_c = \frac{R_2 R_3}{R_1 + R_2 + R_3}$$

El valor óhmico de las resistencias equivalentes en estrella es igual al producto de las dos resistencias adyacentes del triángulo, dividido entre la suma de las tres resistencias del triángulo.

© Ediciones Paraninfo

Actividad resuelta 7.7

Calcula la resistencia equivalente del circuito de la Figura 7.21.

Solución:

$$R_a = \frac{10 \cdot 30}{10 + 20 + 30} = 5\ \Omega$$

$$R_b = \frac{10 \cdot 20}{10 + 20 + 30} = 3{,}33\ \Omega$$

$$R_c = \frac{20 \cdot 30}{10 + 20 + 30} = 10\ \Omega$$

Sustituyendo el circuito triángulo por el estrella nos queda el circuito equivalente de la Figura 7.23.

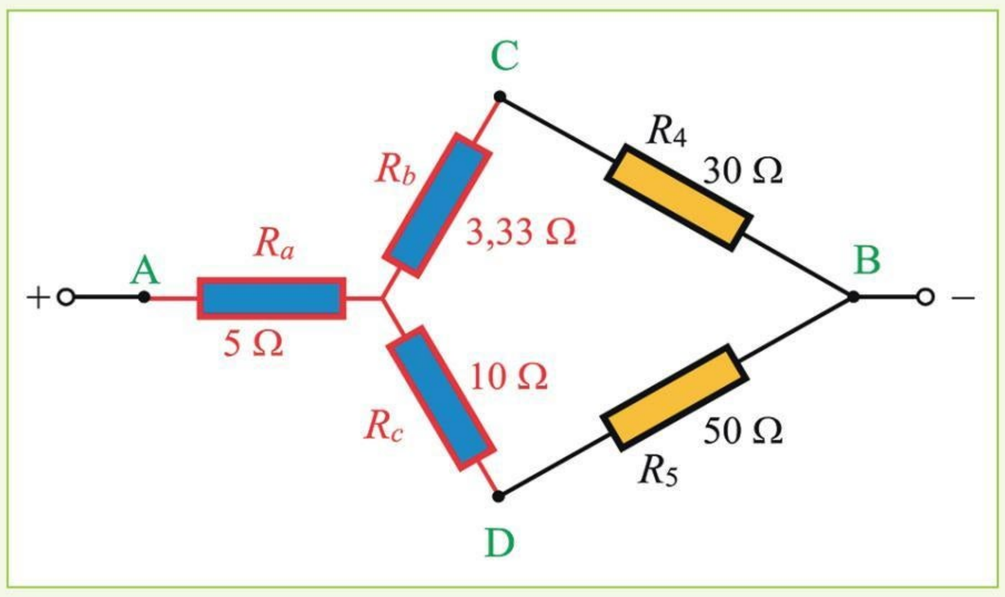


Figura 7.23.

Para determinar la resistencia total de este, vamos reduciendo las resistencias, tal como ya hicimos en los circuitos mixtos [véanse las Figuras 7.24(a), 7.24(b) y 7.24(c)].

$$R_{4b} = 3{,}33 + 30 = 33{,}33\ \Omega$$

$$R_{5c} = 10 + 50 = 60\ \Omega$$

$$R_p = \frac{33{,}33 \cdot 60}{33{,}33 + 60} = 21{,}43\ \Omega$$

La resistencia equivalente será: $R_T = 5 + 21{,}43 = 26{,}43\ \Omega$.

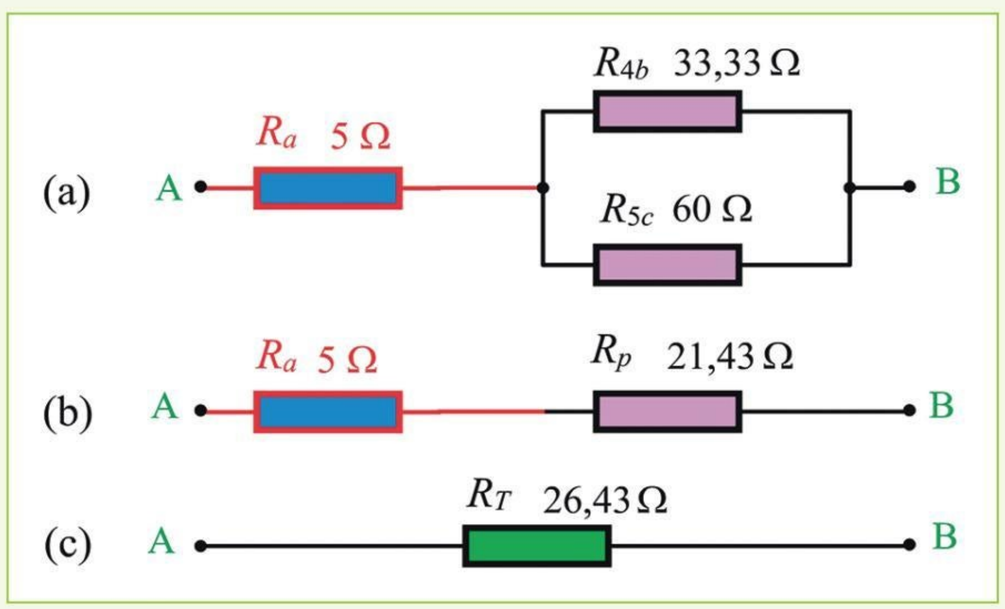


Figura 7.24.

7.4. Resolución de circuitos mediante transformaciones de estrella a triángulo

Existen ciertos circuitos donde es más interesante transformar una conexión de tres resistencias en estrella a triángulo. En estos casos las ecuaciones que se corresponden con esta transformación son las que se exponen a continuación (Figura 7.25).

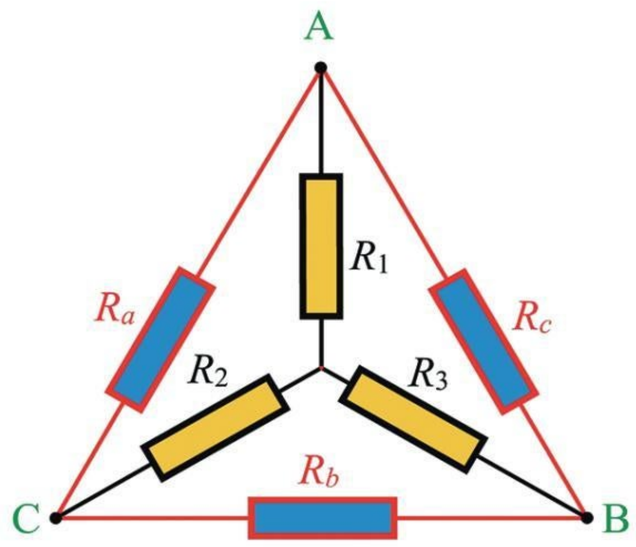


Figura 7.25. Transformación de estrella a triángulo.

$$R_a = \frac{R_1R_2 + R_2R_3 + R_3R_1}{R_3}$$

$$R_b = \frac{R_1R_2 + R_2R_3 + R_3R_1}{R_1}$$

$$R_c = \frac{R_1R_2 + R_2R_3 + R_3R_1}{R_2}$$

El valor de las resistencias del triángulo es igual a la suma de las resistencias de la estrella multiplicadas de dos en dos y divididas entre la resistencia que se encuentra en el lado opuesto de la estrella.

Actividad resuelta 7.8

Determina la resistencia equivalente del circuito de la Figura 7.26.

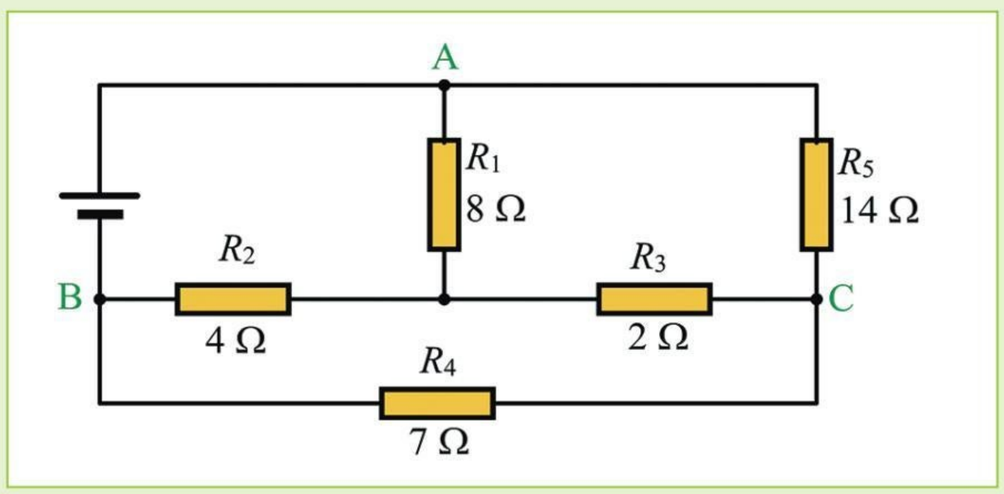


Figura 7.26.

© Ediciones Paraninfo

Solución:

Se observa claramente que existe una estrella formada por las resistencias R_1, R_2 y R_3, que si transformamos a triángulo obtenemos un circuito equivalente más sencillo, como el que se muestra en la Figura 7.27.

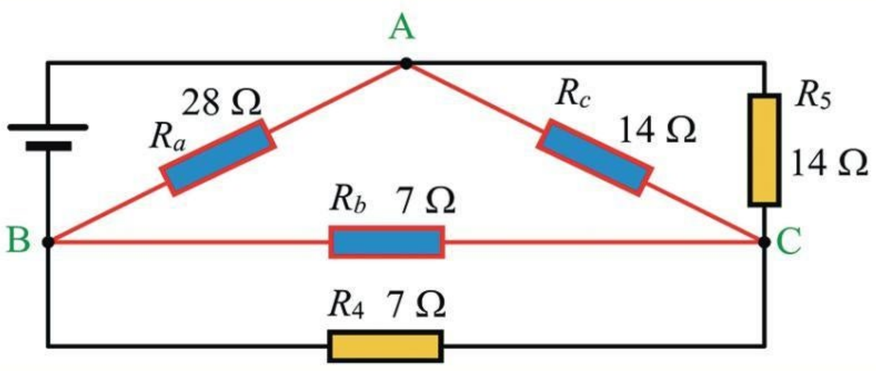


Figura 7.27.

Las resistencias equivalentes del triángulo se obtienen aplicando las relaciones indicadas:

$$R_a = \frac{8 \cdot 4 + 4 \cdot 2 + 2 \cdot 8}{2} = 28\ \Omega$$

$$R_b = \frac{8 \cdot 4 + 4 \cdot 2 + 2 \cdot 8}{8} = 7\ \Omega$$

$$R_c = \frac{8 \cdot 4 + 4 \cdot 2 + 2 \cdot 8}{4} = 14\ \Omega$$

Si ordenamos un poco el circuito equivalente de la Figura 7.27, se obtiene el circuito de la Figura 7.28, que ya puedes resolver como un sencillo circuito mixto.

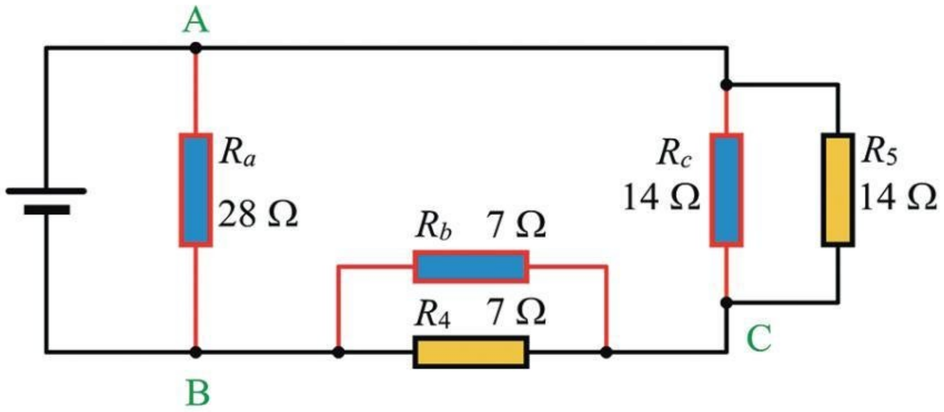


Figura 7.28.

En las Figuras 7.29(a), 7.29(b) y 7.29(c), se dibujan los circuitos equivalentes hasta encontrar la resistencia total.

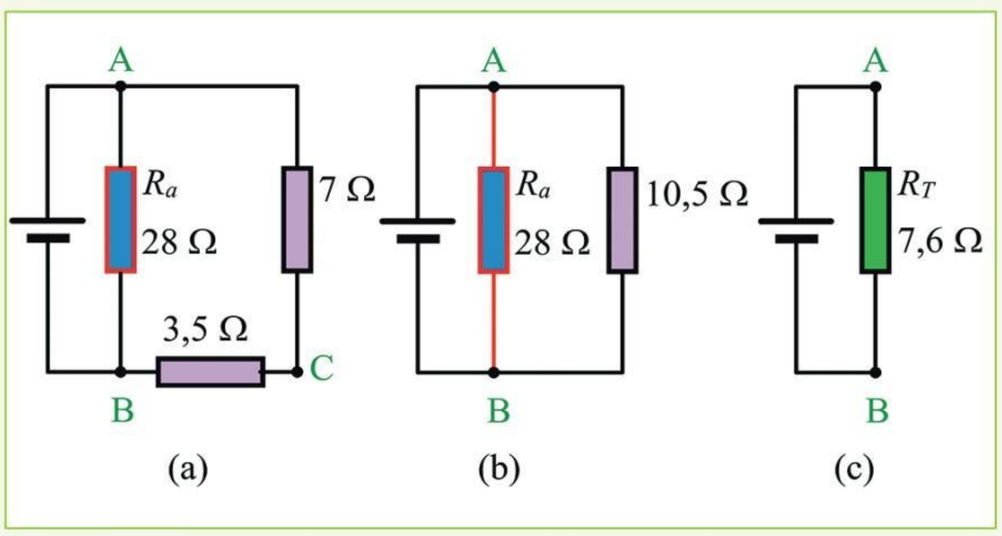


Figura 7.29.

7.5. Teorema de la superposición

Mediante este teorema se pueden resolver circuitos similares a los que se resuelven mediante las leyes de Kirchhoff.

El teorema de la superposición nos indica que en un circuito formado por varias fuentes de tensión o de corriente, la tensión o la corriente que se presenta en cualquier componente de dicho circuito es la suma de los efectos producidos por cada una de las fuentes trabajando independientemente.

Para poder aplicar este teorema las magnitudes eléctricas deben ser lineales (la corriente debe ser proporcional a la tensión), así como tener en cuenta la polaridad de aquellas.

NOTA

Se entiende por fuente ideal de tensión la que produce una tensión de salida estable y que no varía con la resistencia de carga (la resistencia interna de una fuente ideal de tensión es cero). Por otro lado, una fuente ideal de corriente proporciona al circuito una corriente estable que no se modifica para diferentes valores de la resistencia de carga (la resistencia interna de una fuente ideal de corriente es muy elevada).

El proceso de resolución de circuitos mediante el teorema de superposición suele ser el siguiente:

1.º Se selecciona una de las fuentes del circuito para que actúe por separado del resto.

2.º Para eliminar el resto de las fuentes se procede de tal forma que si es una fuente de tensión se sustituye cortocircuitándola; pero si es una fuente de corriente se sustituye por un circuito abierto.

3.º Se calculan las intensidades de corriente de cada uno de los circuitos equivalentes generados y que se corresponden con cada fuente por separado.

4.º Se superponen los efectos producidos de forma aislada por cada fuente, con lo que se obtienen el resultado deseado.

Actividad resuelta 7.9

Determina las corrientes proporcionadas por cada uno de los generadores del circuito de la Figura 7.30, así como la corriente que fluye por la carga de 10 Ω.

© Ediciones Paraninfo

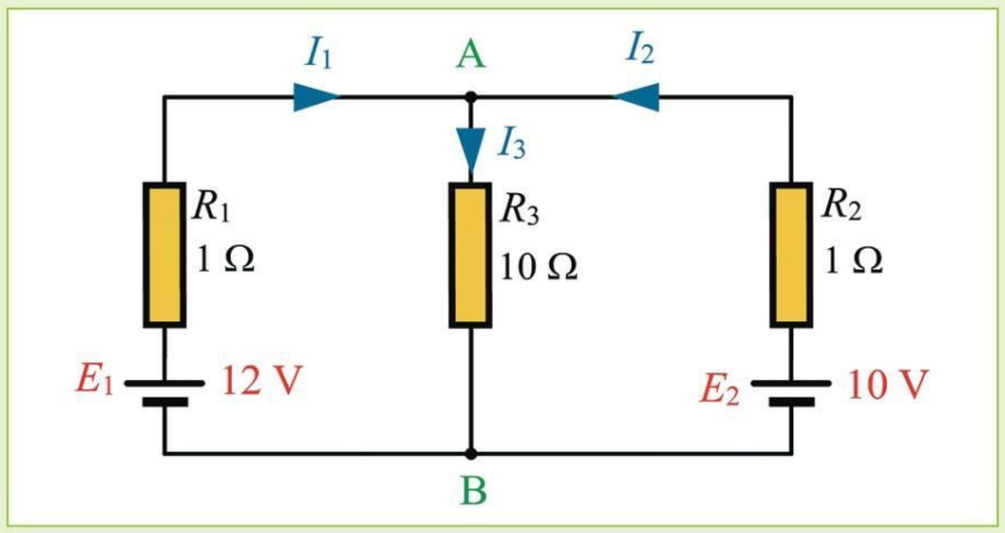


Figura 7.30.

Solución:

Primero aislamos del circuito la fuente de tensión E_1. Para hacerlo cortocircuitamos la fuente E_2, tal como se muestra en la Figura 7.31. Las corrientes que aparecen por este circuito equivalente, correspondientes a la fuente E_1, las identificamos con el subíndice E_1 [$I_1(E_1)$, $I_2(E_1)$, $I_3(E_1)$].

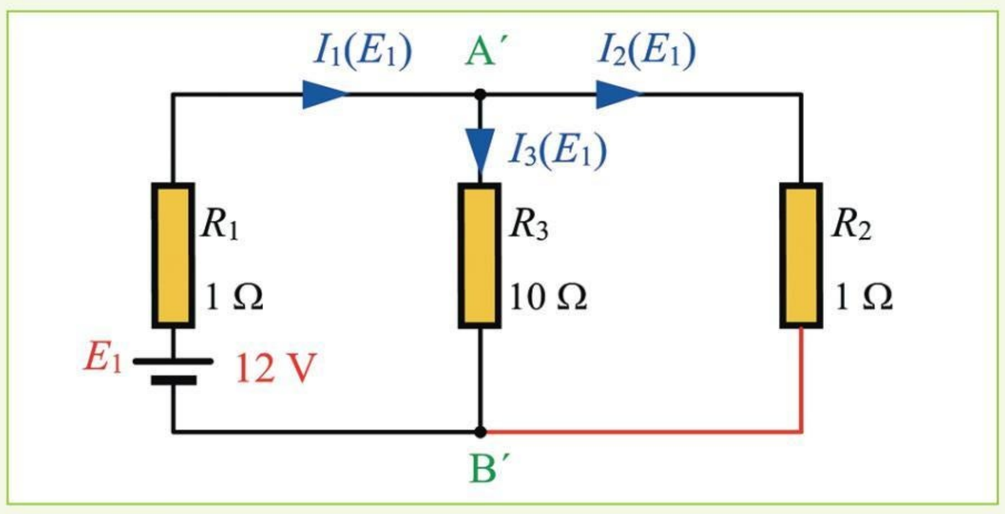


Figura 7.31.

Seguidamente, se reducen las resistencias conectadas en serie y paralelo, como si se tratase de un circuito mixto, hasta encontrar un circuito equivalente, como el de la Figura 7.32, con una sola resistencia $R(E_1)$ y una fuente de tensión E_1.

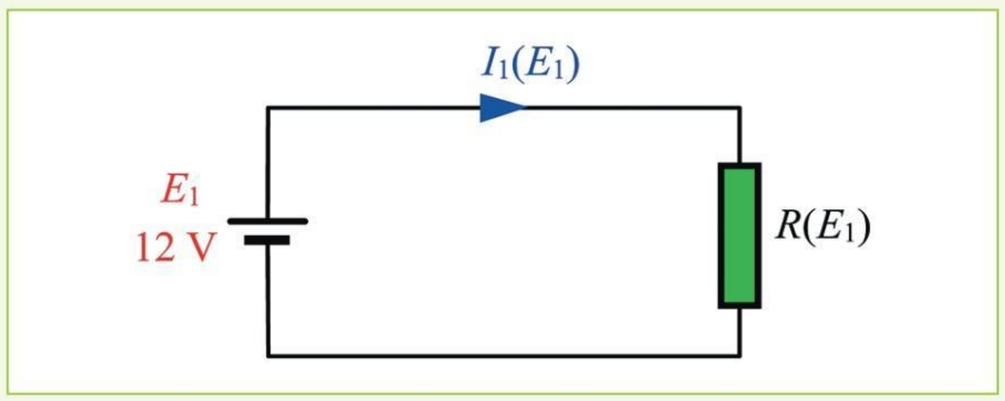


Figura 7.32.

$$R(E_1) = R_1 + \frac{R_3 R_2}{R_3 + R_2} = \ldots = 1{,}91\ \Omega$$

$$I_1(E_1) = \frac{E_1}{R(E_1)} = \ldots = 6{,}28\ \text{A}$$

Para calcular las corrientes por las resistencias R_2 y R_3 será necesario conocer previamente la tensión $U_{A'B'}$ a la que están sometidas estas:

$$U_{A'B'} = \frac{R_3 R_2}{R_3 + R_2} I_1(E_1) = \ldots = 5{,}71\ \text{V}$$

$$I_2(E_1) = \frac{U_{A'B'}}{R_2} = \ldots = 5{,}71\ \text{A}$$

$$I_3(E_1) = \frac{U_{A'B'}}{R_3} = \ldots = 0{,}57\ \text{A}$$

Ahora repetimos el mismo proceso para aislar la fuente E_2. En la Figura 7.33(a) cortocircuitamos la fuente E_1, y en la Figura 7.33(b) encontramos su correspondiente circuito equivalente.

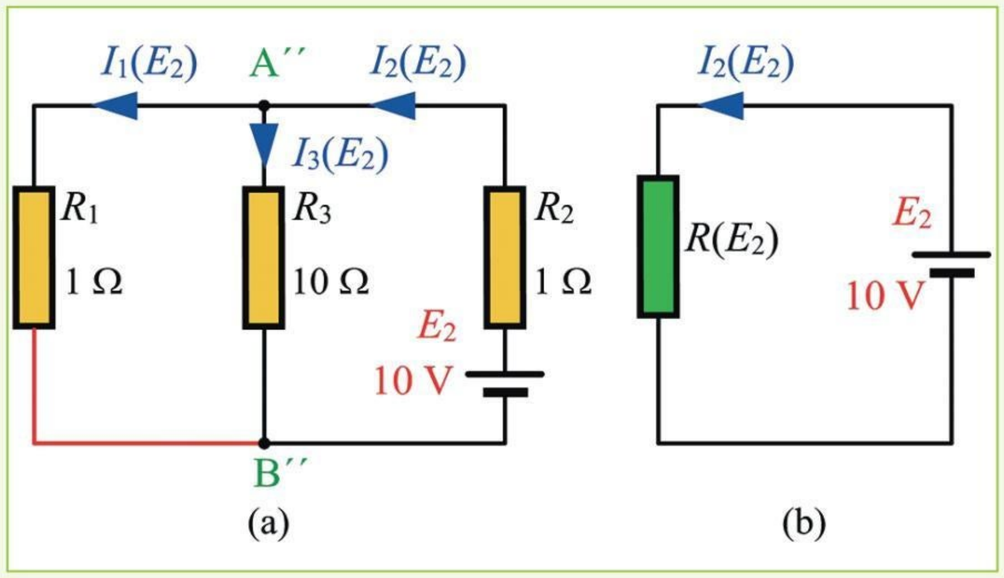


Figura 7.33.

Los procesos para determinar las corrientes del circuito con la fuente E_2 son similares a los empleados anteriormente:

$$R(E_2) = R_2 + \frac{R_3 R_1}{R_3 + R_1} = \ldots = 1{,}91\ \Omega$$

$$I_2(E_2) = \frac{E_2}{R(E_2)} = \ldots = 5{,}24\ \text{A}$$

$$U_{A''B''} = \frac{R_3 R_1}{R_3 + R_1} I_2(E_2) = \ldots = 4{,}76\ \text{V}$$

$$I_1(E_2) = \frac{U_{A''B''}}{R_1} = \ldots = 4{,}76\ \text{A}$$

$$I_3(E_2) = \frac{U_{A''B''}}{R_3} = \ldots = 0{,}48\ \text{A}$$

Por último, superponemos los efectos producidos aisladamente por cada una de ellas, para lo que sumamos las corrientes obtenidas con cada una de las fuentes, teniendo en cuenta los sentidos de las corrientes obtenidas en cada uno de los circuitos correspondientes (véanse las Figuras 7.31 a 7.33).

$$I_1 = I_1(E_1) - I_1(E_2) = 6{,}28 - 4{,}76 = 1{,}52\ \text{A}$$

$$I_2 = I_2(E_2) - I_2(E_1) = 5{,}24 - 5{,}71 = -0{,}47\ \text{A}$$

$$I_3 = I_3(E_1) + I_3(E_2) = 0{,}57 + 0{,}48 = 1{,}05\ \text{A}$$

El signo negativo de la corriente I_2 nos indica que el generador, en vez de aportar corriente a la carga, la absorbe.

© Ediciones Paraninfo

7.6. Teorema de Thévenin

Mediante este teorema es posible reducir una red compleja con varias cargas interconectadas entre sí y encontrar un circuito equivalente sencillo, en el que solamente aparezca una fuente de tensión ideal con una resistencia en serie.

Supongamos que tenemos que calcular la corriente para diferentes valores óhmicos de la carga R_L conectada entre los extremos A y B de un circuito como el de la Figura 7.34.

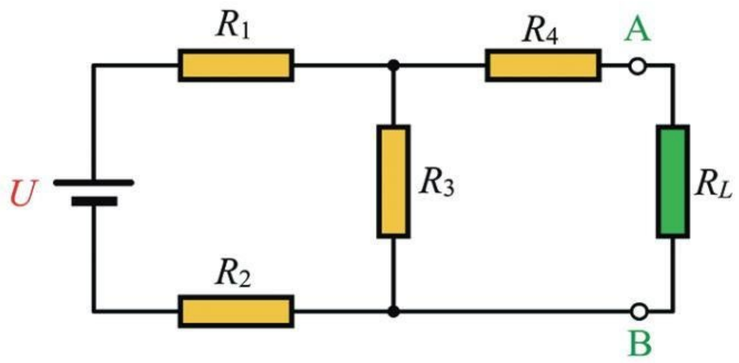


Figura 7.34.

Con los métodos conocidos hasta ahora, habría que reducir el circuito hasta encontrar uno equivalente con una sola resistencia para cada uno de los valores de la carga R_L. Mediante el teorema de Thévenin basta con encontrar una sola vez un circuito que contenga una fuente de tensión ideal U_{Th} en serie con una resistencia R_{Th}, y con los terminales abiertos en la conexión con la carga R_L (puntos A y B de la Figura 7.35).

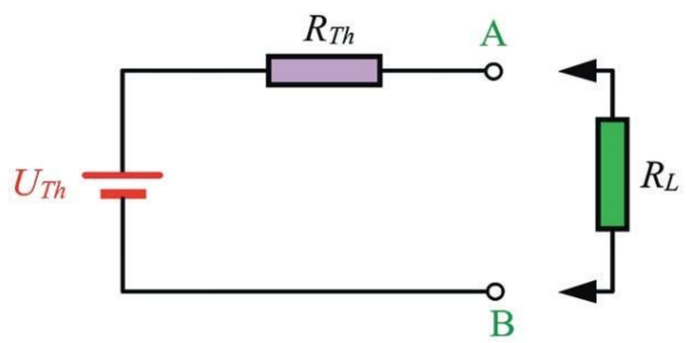


Figura 7.35. Circuito equivalente de Thévenin.

Una vez encontrado el circuito equivalente de Thévenin, bien fácil nos será calcular la corriente para cualquier valor de la carga R_L.

A la tensión que aparece cuando se desconecta la resistencia de carga se la conoce por el nombre de **tensión de Thévenin (U_{Th}).** La resistencia que queda conectada en serie con la fuente de tensión del circuito equivalente es la **resistencia de Thévenin (R_{Th}),** y es la que corresponde a los terminales A y B de la carga cuando se han cortocircuitado todas las fuentes de tensión del circuito.

Actividad resuelta 7.10

En el circuito de la Figura 7.36 se nos muestra el circuito equivalente de una fuente de alimentación; se trata de determinar la corriente y la tensión para los siguientes valores de la resistencia de carga R_L:

a) $R_L = 10\ \Omega$, b) $R_L = 20\ \Omega$

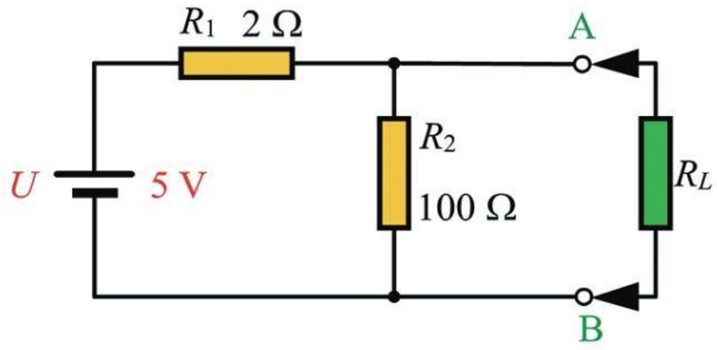


Figura 7.36.

Solución:

Lo primero que haremos será encontrar el circuito equivalente de Thévenin entre los extremos de la carga R_L. Para ello, primero cortocircuitamos la fuente de tensión de 5 V, según se muestra en el circuito de la Figura 7.37. Con este circuito es fácil calcular la resistencia de Thévenin, que se corresponderá con la que aparece entre los terminales A y B.

Como las resistencias R_1 y R_2 están conectadas en paralelo:

$$R_{Th} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = 1{,}96\ \Omega$$

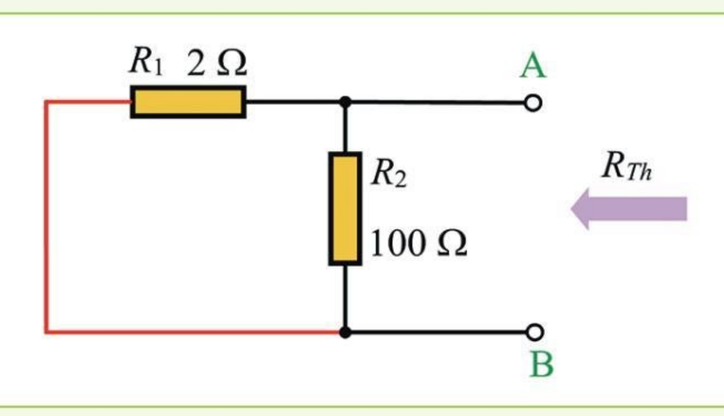


Figura 7.37.

Para encontrar la tensión de Thévenin tendremos que recurrir al circuito equivalente de la Figura 7.38, donde la tensión U_{Th} a circuito abierto se corresponderá con la que aparece en los terminales A y B.

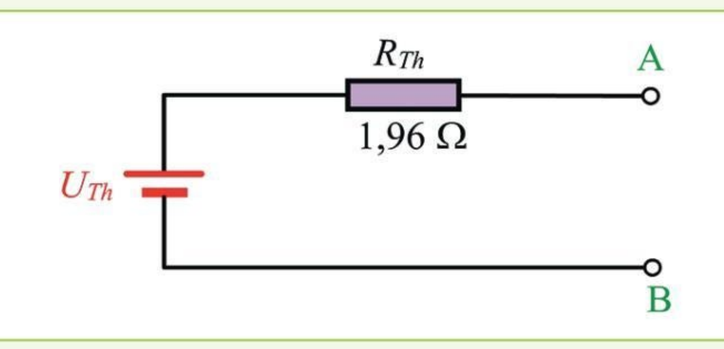


Figura 7.38.

Volviendo al circuito original de la Figura 7.36, si eliminamos la resistencia de carga obtenemos el circuito de la Figura 7.39. Aquí se puede comprobar que la tensión de Thévenin buscada es la que aparece en la resistencia R_2.

© Ediciones Paraninfo

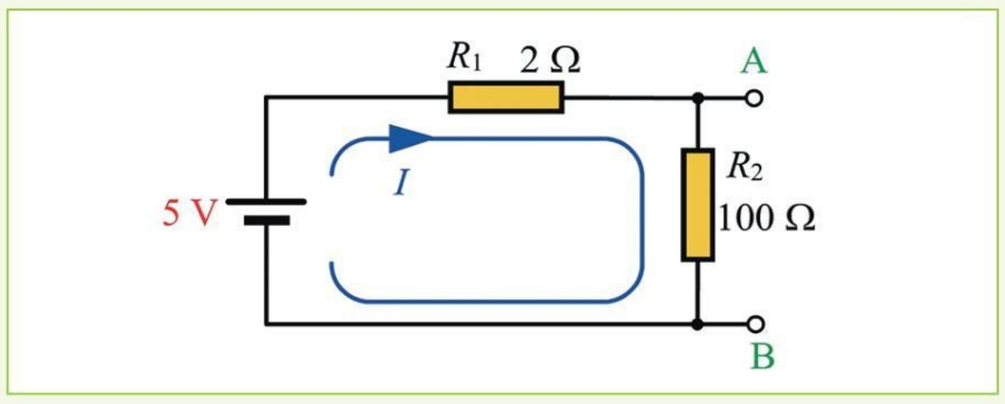


Figura 7.39.

Primero calculamos la corriente por R_2:

$$I = \frac{U}{R_1 + R_2} = \frac{5}{2 + 100} = 0{,}049 \text{ A}$$

$$U_{Th} = U_{AB} = R_2 I = 100 \cdot 0{,}049 = 4{,}9 \text{ V}$$

Una vez obtenido el circuito equivalente de Thévenin (Figura 7.38) ya podemos calcular la corriente y tensión para las diferentes cargas conectadas entre los terminales A y B.

Al aplicar la carga de 10 Ω entre los puntos A y B, tal como se muestra en la Figura 7.40, la corriente y la tensión que aparecerá en la carga es:

$$I_{L1} = \frac{U_{Th}}{R_{Th} + R_{L1}} = \frac{4{,}9}{1{,}96 + 10} = 0{,}41 \text{ A}$$

$$U_{L1} = I_{L1} R_{L1} = 0{,}41 \cdot 10 = 4{,}1 \text{ V}$$

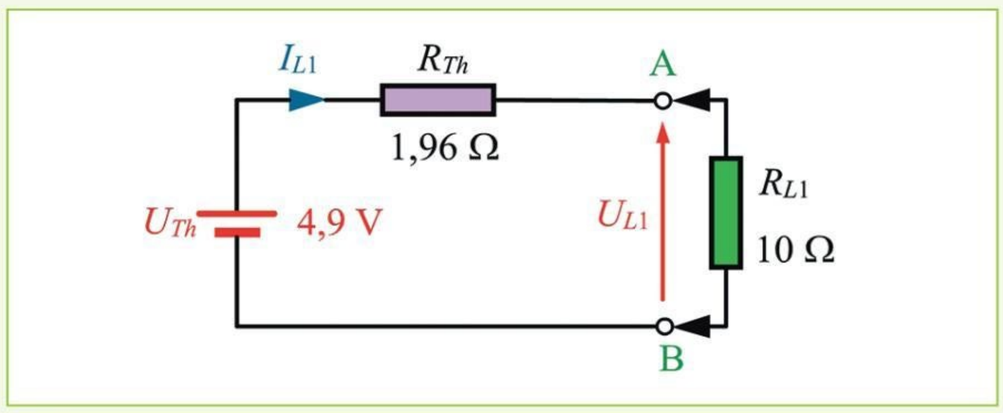


Figura 7.40.

Al conectar la carga de 20 Ω tendremos que (Figura 7.41):

$$I_{L2} = \frac{U_{Th}}{R_{Th} + R_{L2}} = \ldots = 0{,}22 \text{ A}$$

$$U_{L2} = I_{L2} R_{L2} = \ldots = 4{,}46 \text{ V}$$

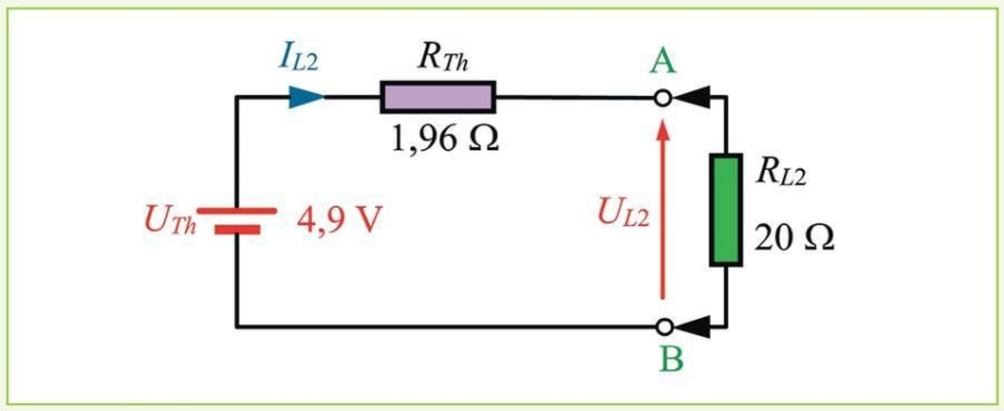


Figura 7.41.

© Ediciones Paraninfo

Comprobación práctica en el laboratorio

7.1. Análisis de circuitos de C.C. Monta en una placa de montaje rápido (tipo placa *protoboard* como la de la Figura 7.42) un circuito donde aparezcan dos pilas y varias resistencias interconectadas, similar a los que hemos tomado como ejemplo para el estudio de las leyes de Kirchhoff. Calcula de forma teórica las diferentes tensiones y corrientes del circuito, para luego comprobarlo mediante un voltímetro y un amperímetro de una forma práctica en el circuito montado.

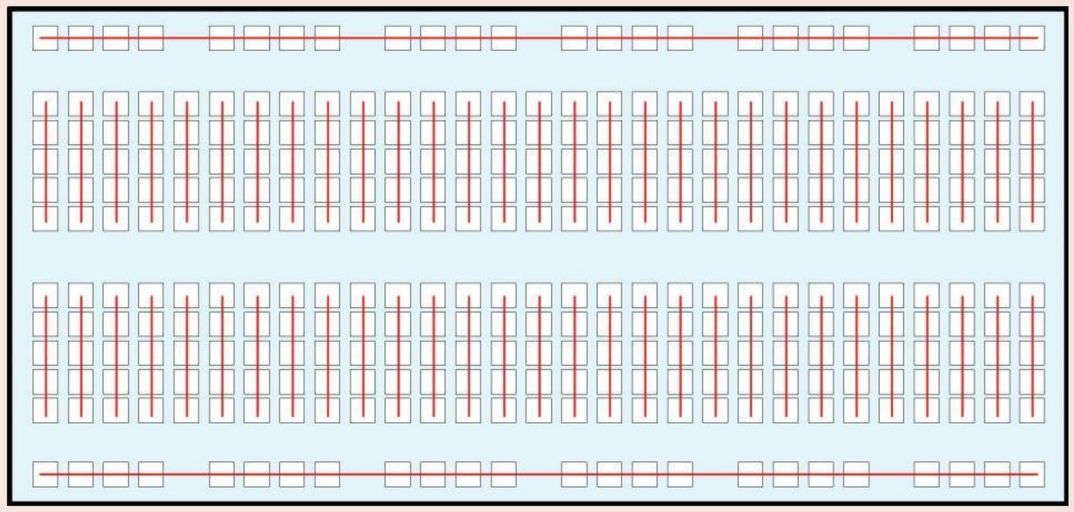


Figura 7.42. Esquema de conexionado interno de una placa *protoboard* de montaje rápido.

Como en otras ocasiones, al finalizar esta actividad deberás elaborar un informe-memoria sobre la actividad desarrollada, indicando los resultados obtenidos y estructurándolos en los apartados necesarios para una adecuada documentación de las mismas (descripción del proceso seguido, medios utilizados, esquemas y planos utilizados, cálculos, medidas, etc.).

© Ediciones Paraninfo

Actividades de comprobación

7.1. Determina las corrientes que fluyen por el circuito de la Figura 7.43.

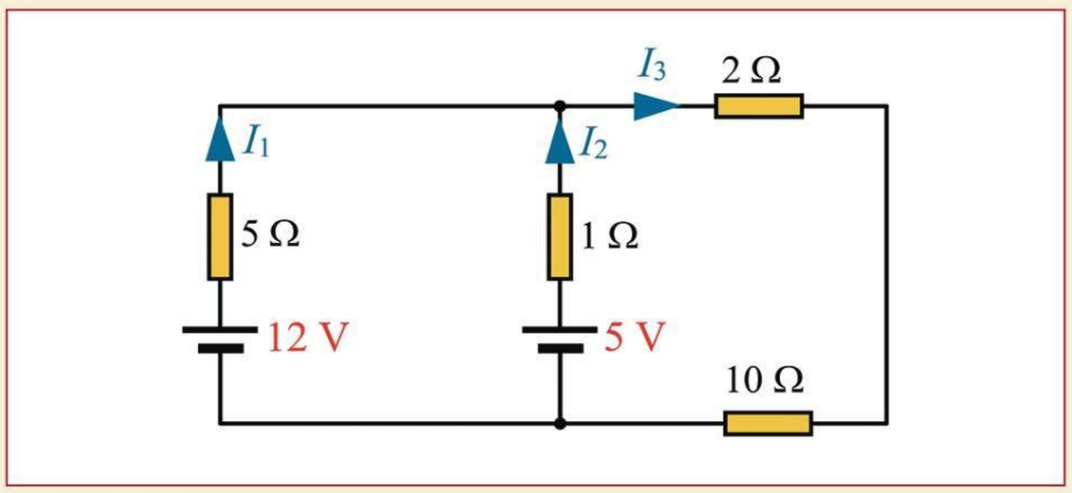


Figura 7.43.

7.2. Averigua la tensión que aparece en la carga de 8 ohmios del circuito de la Figura 7.44.

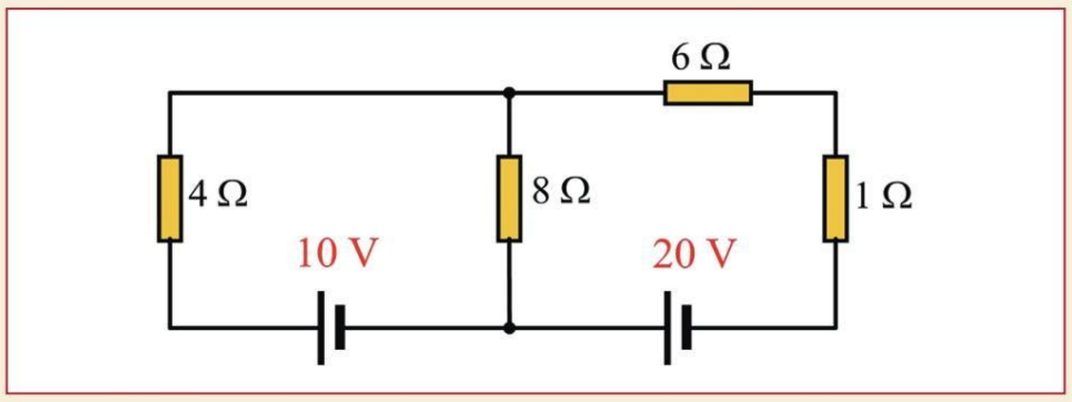


Figura 7.44.

7.3. Halla la resistencia equivalente del circuito de la Figura 7.45.

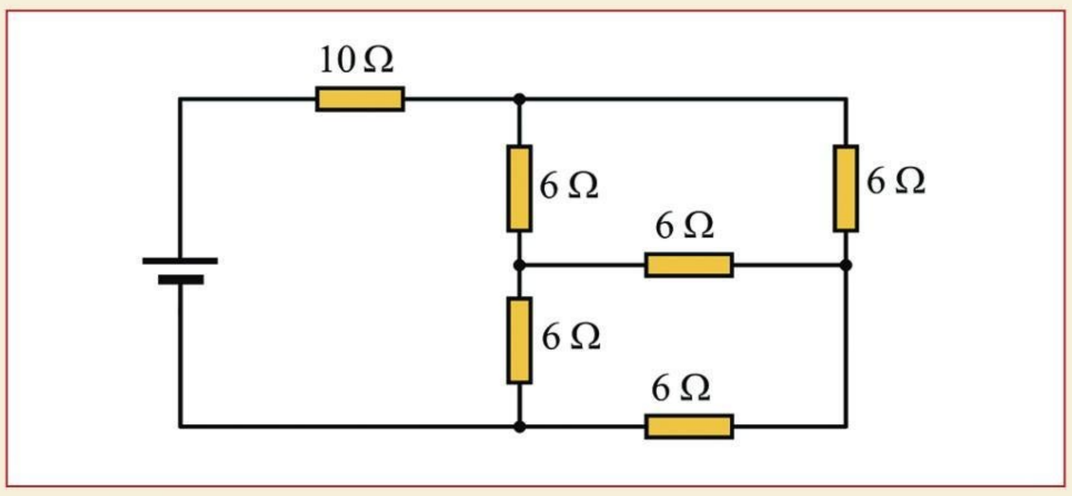


Figura 7.45.

7.4. Determina la resistencia equivalente entre los terminales A y B de la Figura 7.46.

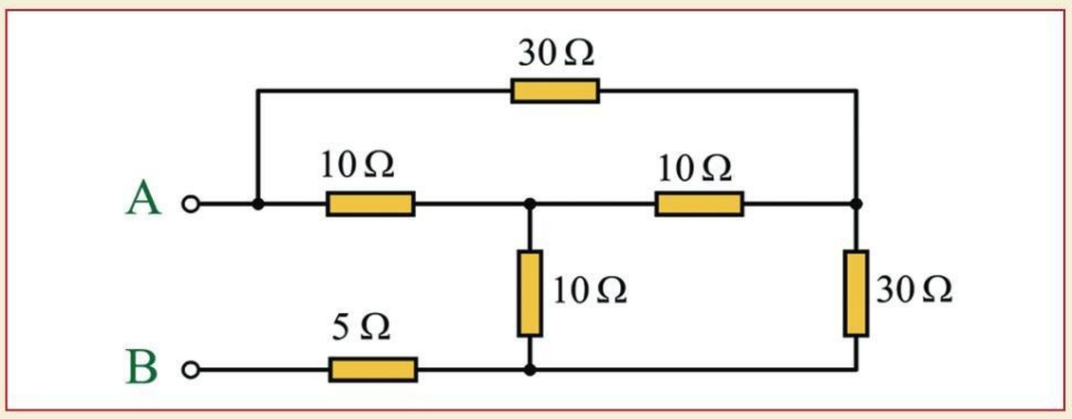


Figura 7.46.

7.5. Determina la intensidad de corriente y la tensión a la que quedará sometida cada una de las resistencias de carga: $R_{L1} = 100\ \Omega$, $R_{L2} = 500\ \Omega$, $R_{L3} = 10\ \Omega$ y $R_{L5} = 3\ k\Omega$, cuando se conecten independientemente a los extremos de alimentación A y B del circuito de la Figura 7.47.

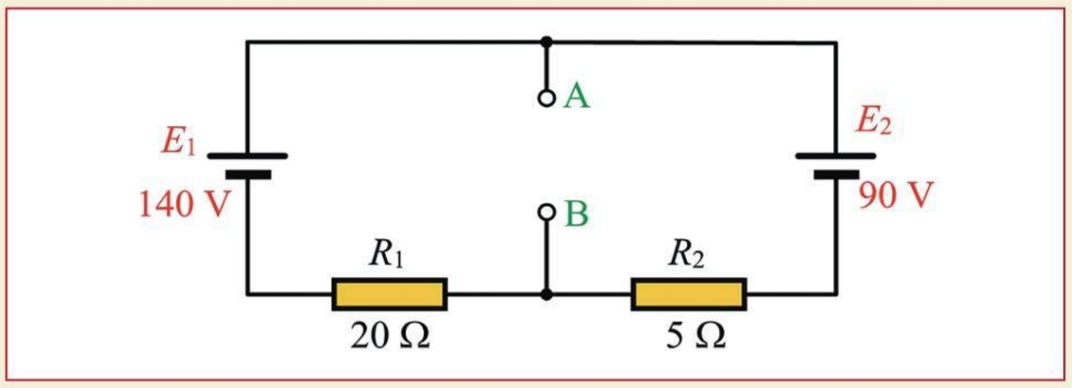


Figura 7.47.

7.6. Calcula las corrientes de rama del circuito de la Figura 7.48.

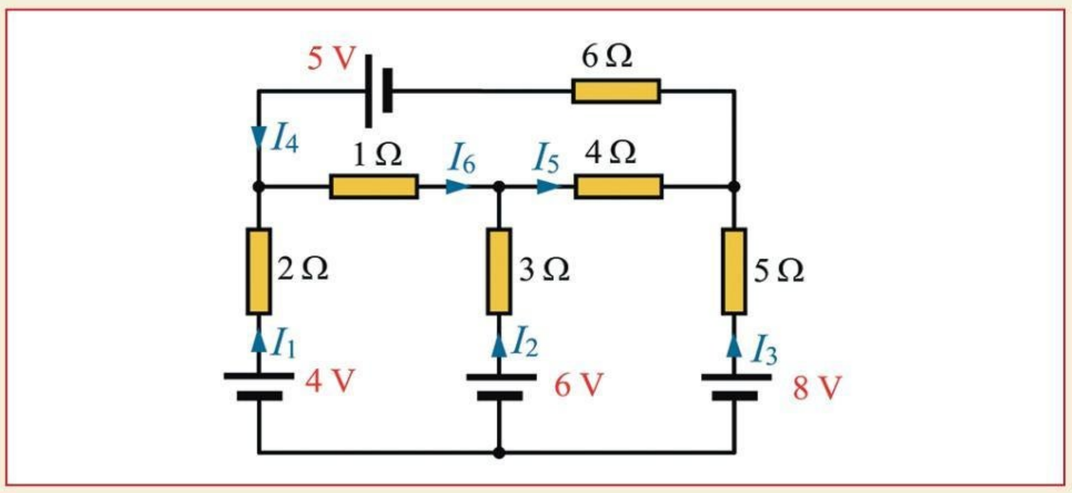


Figura 7.48.

© Ediciones Paraninfo

Actividades de evaluación resueltas

A continuación se dan los enunciados de una serie de actividades de evaluación. Estas actividades las podrás encontrar resueltas accediendo al MATERIAL WEB creado para este texto.

7.1. En el circuito de corriente continua de la Figura 7.49, halla:

a) Potencia absorbida o cedida por la fuente de tensión E_3.

b) Tensión entre el nudo P y el nudo 0.

c) Potencia disipada en R_1.

d) Tensión y energía almacenada en el condensador.

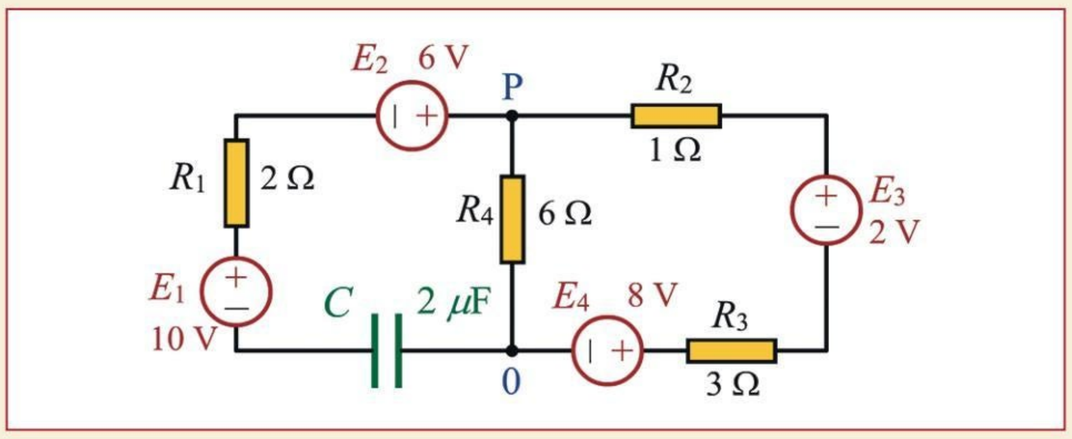


Figura 7.49.

7.2. En el circuito eléctrico de la Figura 7.50, calcula:

a) La resistencia equivalente entre los terminales A y B.

b) Si la tensión en bornes de la resistencia de 2 ohmios es de 40 V, ¿cuál es la tensión en bornes de cada una de las resistencias de 1 ohmio?

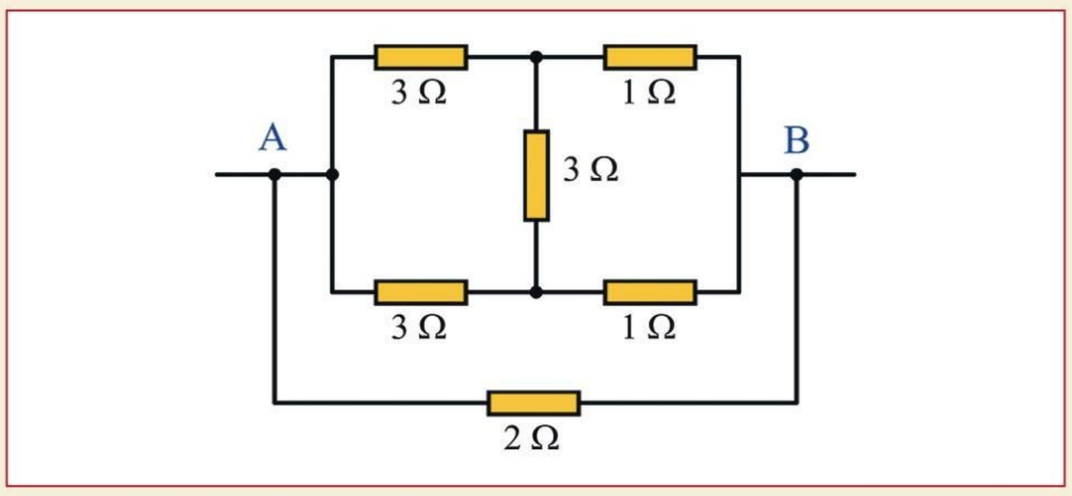


Figura 7.50.

7.3. En el circuito de la Figura 7.51, calcula:

a) Las intensidades indicadas.

b) La potencia generada por cada una de las fuentes de tensión.

c) La potencia consumida por cada una de las resistencias.

d) Lectura de un voltímetro conectado entre los puntos A y B del circuito.

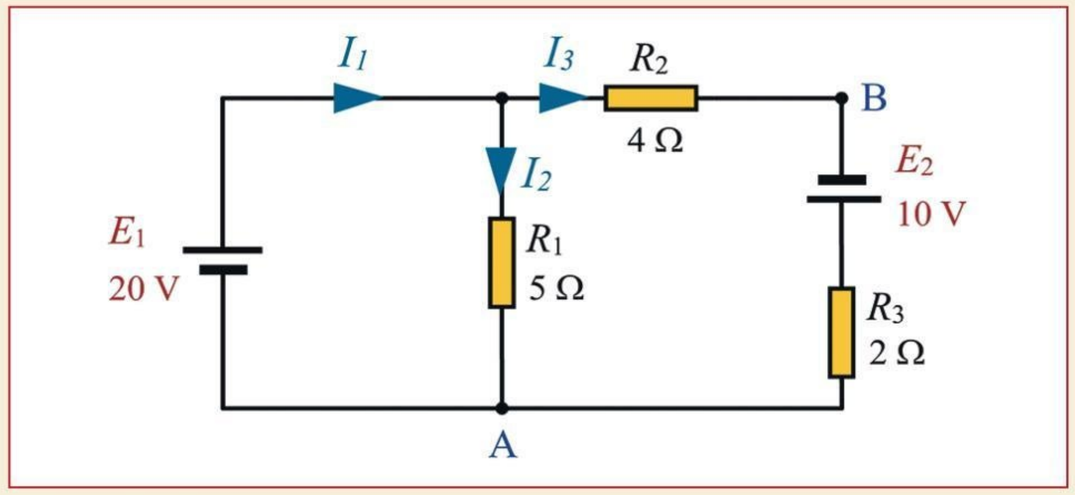


Figura 7.51.

7.4. Calcula la intensidad de las corrientes que circulan por las resistencias R_3, R_4 y R_5 del circuito de corriente continua de la Figura 7.52.

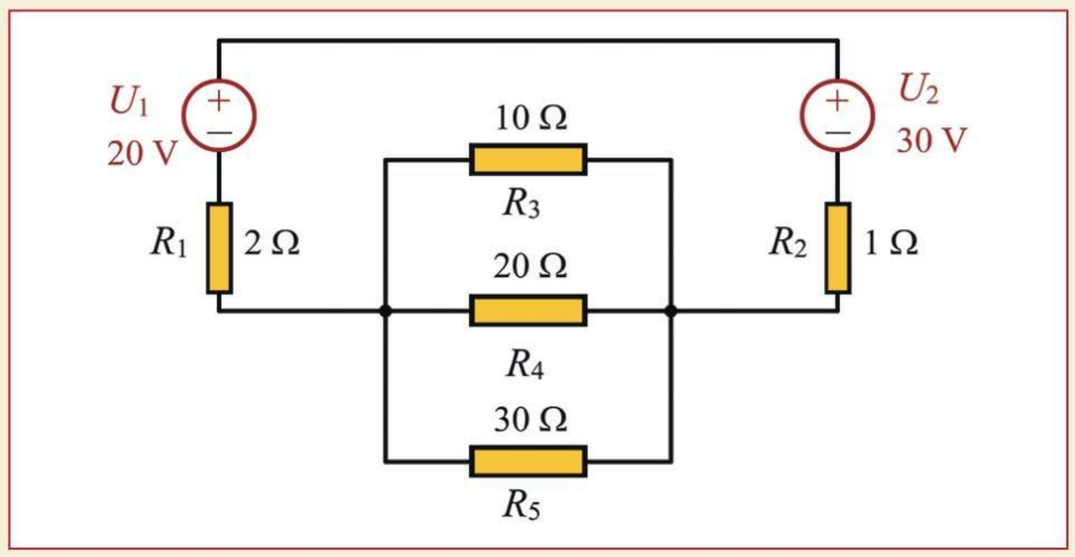


Figura 7.52.

7.5. En el circuito de corriente continua de la Figura 7.53, halla:

a) Intensidad de corriente que circula por los elementos del circuito.

b) Potencia disipada en las resistencias R_3 y R_6.

c) Potencia cedida o absorbida por la fuente de tensión U_{s2}.

d) Energía almacenada en el condensador C_2.

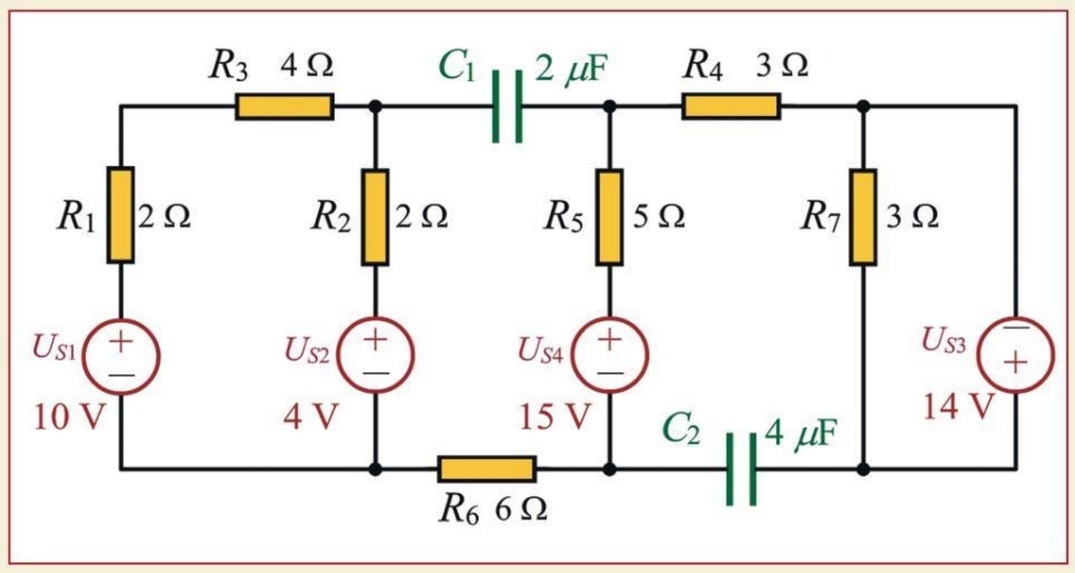


Figura 7.53.

© Ediciones Paraninfo

7.6. En el circuito de corriente continua de la Figura 7.54, halla:

a) Potenciales en los puntos A y B del circuito, respecto de 0.

b) Energía almacenada en el condensador C_1.

c) Potencia entregada o absorbida por la fuente de tensión U_{s2}.

d) Potencia disipada en R_5.

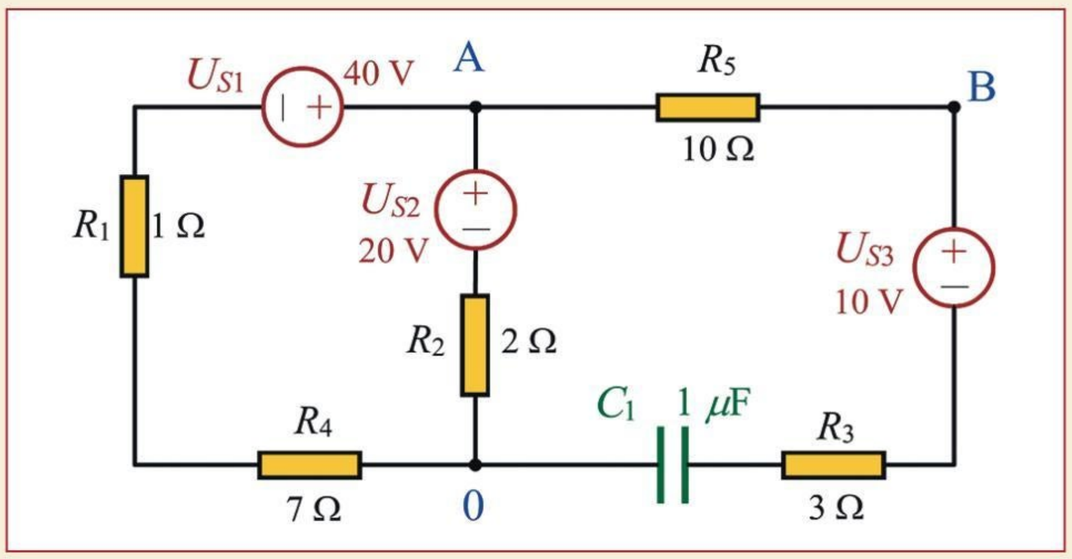


Figura 7.54.

7.7. En el circuito de la Figura 7.55, y considerando ambos generadores ideales, determina:

a) La corriente suministrada por ambos generadores.

b) La tensión o *ddp* en R_3.

c) La potencia suministrada por V_1.

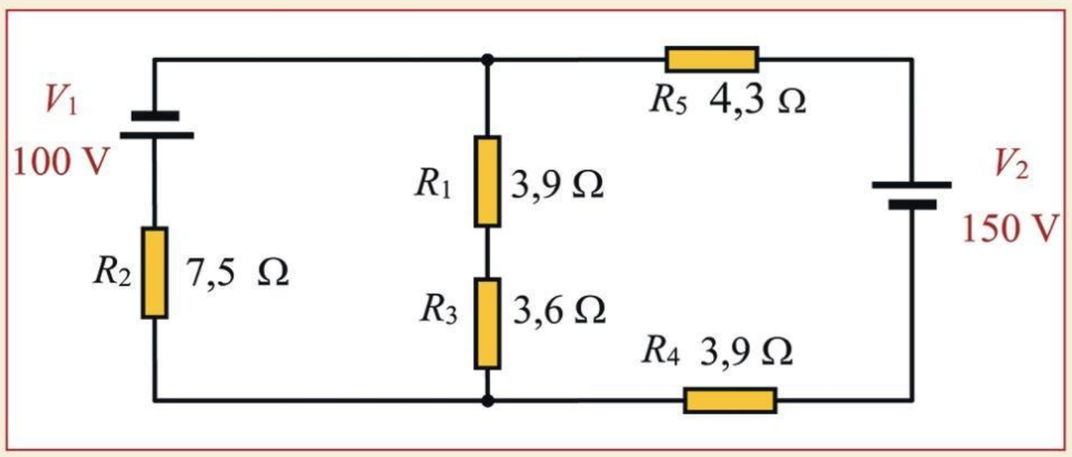


Figura 7.55.

7.8. En el circuito de la Figura 7.56, calcula:

a) Tensión entre los nudos A y B.

b) Intensidad que circula por cada resistencia.

c) Potencias en las resistencias y los generadores (indica su tipo: generadas o absorbidas).

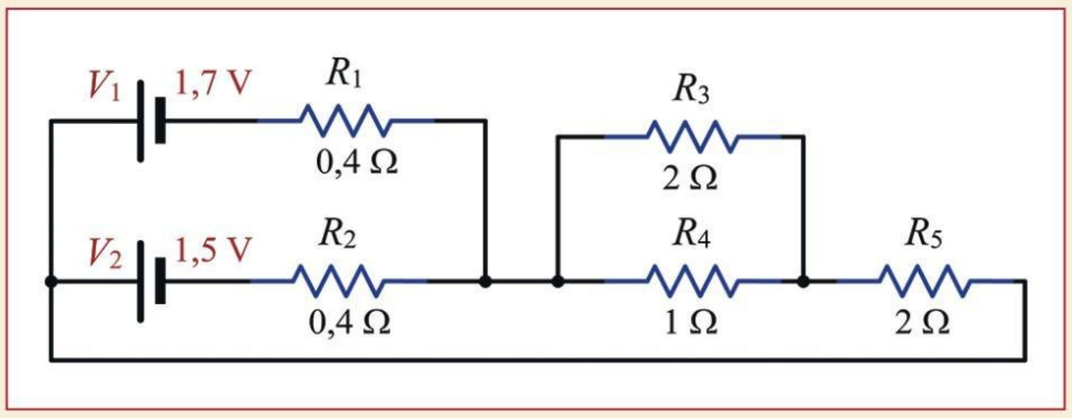


Figura 7.56.

7.9. En la red de corriente continua de la Figura 7.57, la potencia disipada por una de las resistencias de 20 Ω es de 45 W. Determina:

a) La resistencia equivalente, vista desde los bornes de la fuente ideal de tensión.

b) La f. e. m. E de la fuente.

c) El rendimiento de la fuente real de tensión, constituida por E y 7,5 Ω.

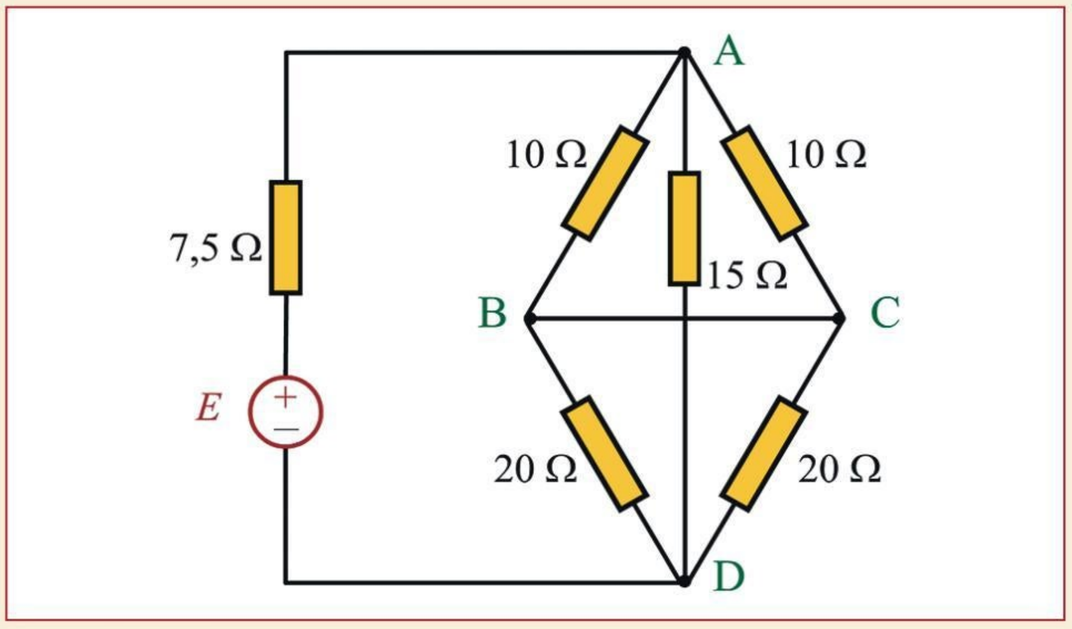


Figura 7.57.

7.10. En el circuito de la Figura 7.58, calcula:

a) Intensidad por cada resistencia.

b) Tensión en cada resistencia.

c) Potencias en las resistencias y los generadores (indica su tipo: generadas o absorbidas).

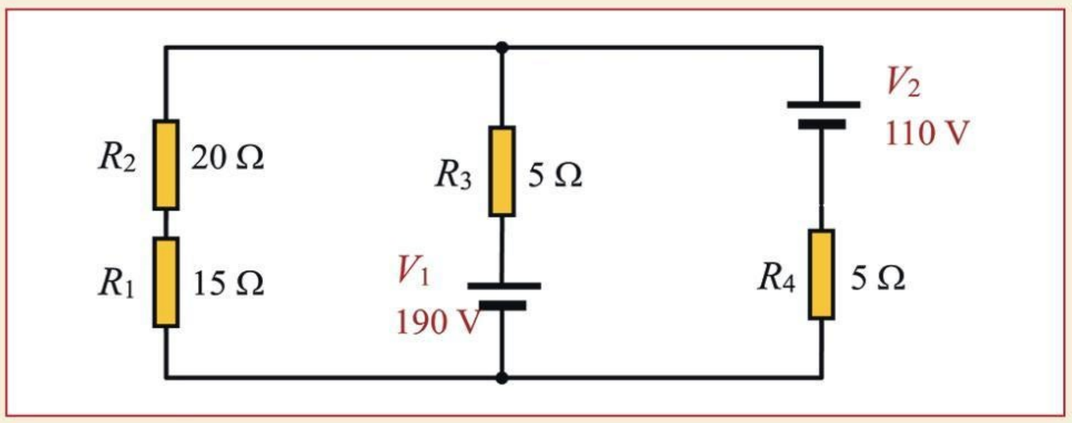


Figura 7.58.

7.11. En el circuito de la Figura 7.59, calcula:

a) Intensidad de la corriente en cada rama.

b) La tensión en la resistencia de 2 Ω.

c) La potencia disipada en la resistencia de 5 Ω.

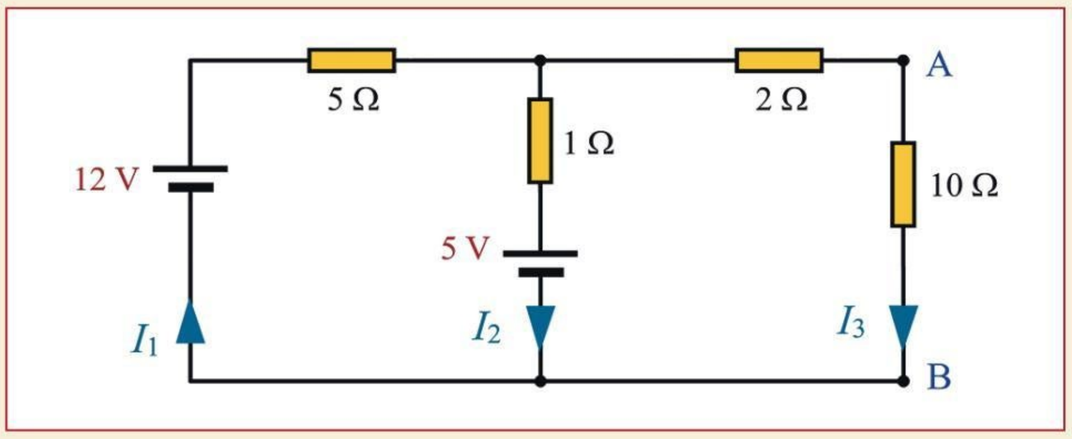


Figura 7.59.

© Ediciones Paraninfo

7.12. En el circuito de la Figura 7.60, determina la potencia cedida por cada una de las fuentes de tensión y absorbida por cada una de las resistencias:

a) Con el interruptor S cerrado.

b) Con el interruptor S abierto.

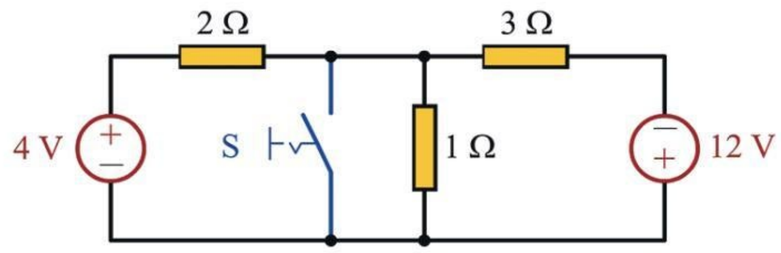


Figura 7.60.

7.13. En el circuito de corriente continua de la Figura 7.61 se pide:

a) Indicación del amperímetro e intensidades por cada una de las resistencias.

b) Potencia cedida o absorbida en cada uno de los elementos del circuito.

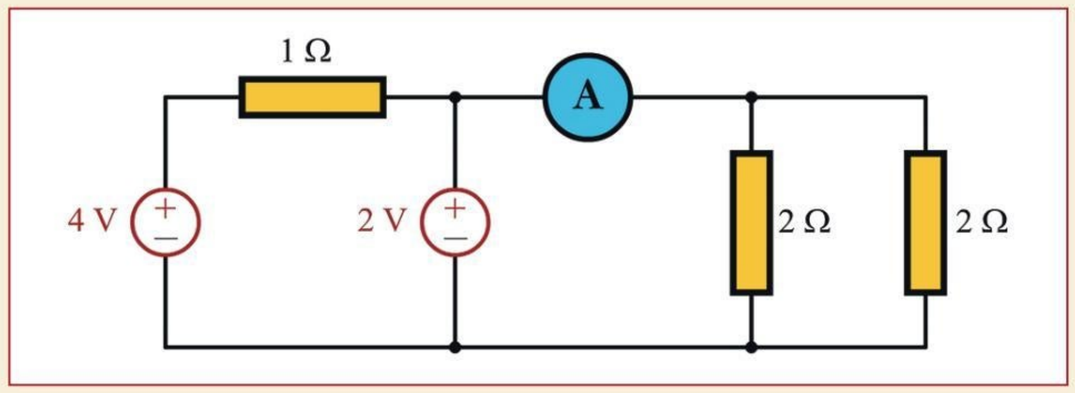
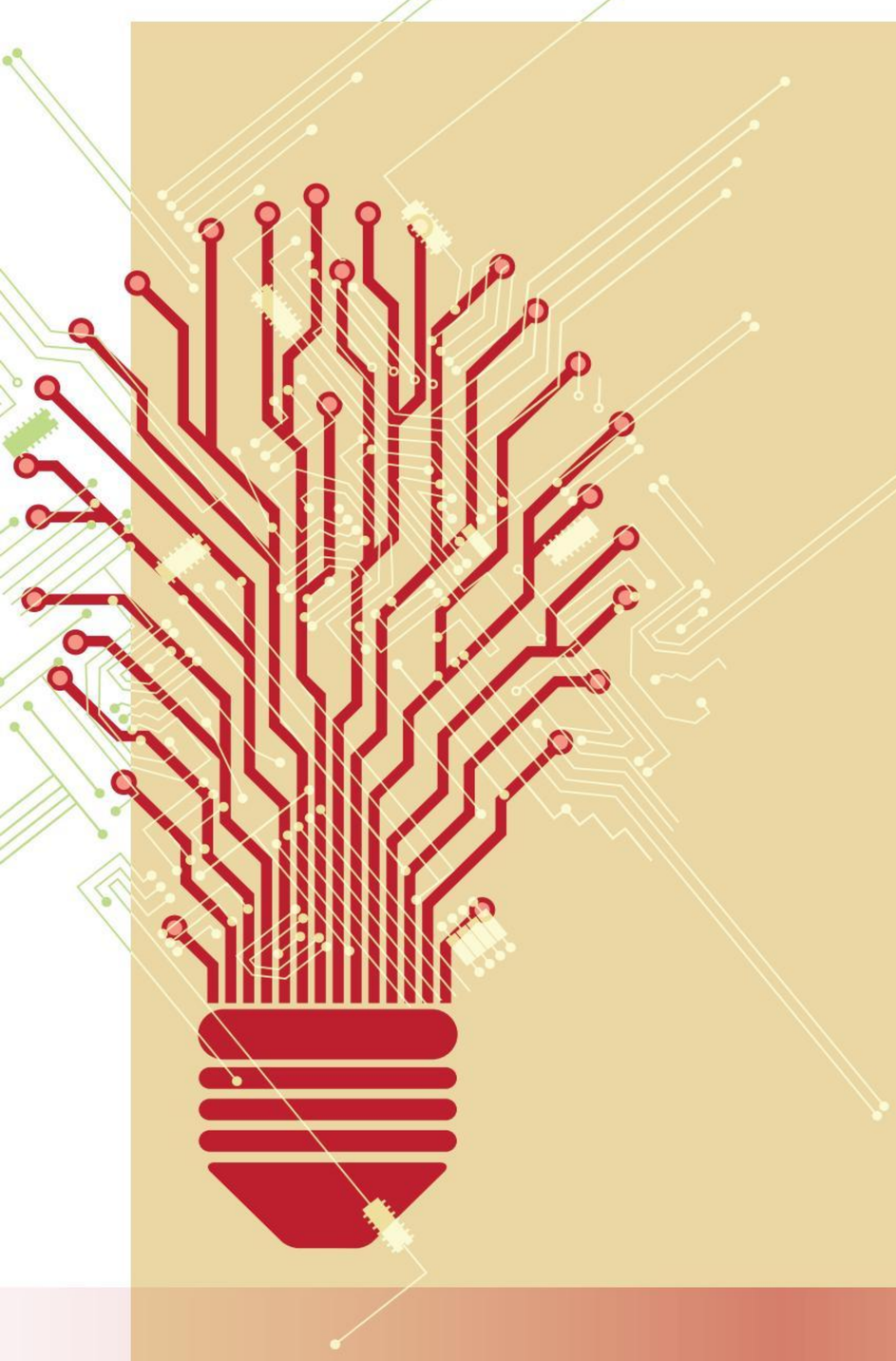


Figura 7.61.

Actividades de ampliación

Con el fin de conseguir una mayor profundización en la materia, se han incluido los enunciados de una serie de ***«actividades de evaluación propuestas de ampliación (7)»*** para esta unidad que podrás encontrar dentro del MATERIAL WEB elaborado para este texto. Selecciona alguna de estas actividades y encuentra su solución.

© Ediciones Paraninfo



8 Generadores electroquímicos y fotovoltaicos

Contenidos

- **8.1.** Electrólisis
- **8.2.** Recubrimientos galvánicos
- **8.3.** Pilas eléctricas
- **8.4.** Acumuladores
- **8.5.** Conexión de pilas y acumuladores
- **8.6.** Energía solar fotovoltaica

Estudiaremos ahora los fenómenos que se dan en las disoluciones químicas en relación con la corriente eléctrica. Ya tuvimos ocasión de comprobar que al introducir dos metales diferentes en una disolución de ácido sulfúrico se producía una pequeña f.e.m., que se correspondía con el principio de funcionamiento de pilas y acumuladores. Pues bien, cuando aplicamos corriente a una disolución química, aparecen fenómenos, como la electrólisis, que pueden ser de gran utilidad para múltiples aplicaciones prácticas.

Por otro lado, la energía solar fotovoltaica se basa en la captación de la energía luminosa procedente del Sol y su transformación en energía eléctrica por medio de células fotovoltaicas. Esta forma de generación de energía eléctrica se presenta como una gran alternativa de futuro. La primera aplicación de los generadores fotovoltaicos fue el suministro de energía eléctrica para el satélite norteamericano Vanguard 1 en 1958. Este acontecimiento estimuló en gran medida la investigación en este campo e impulsó la evolución y eficiencia de los paneles fotovoltaicos.

Objetivos

- Describir los efectos químicos de la corriente eléctrica.
- Enumerar las aplicaciones prácticas de la electrólisis.
- Diferenciar entre pilas y acumuladores.
- Emplear los agrupamientos de generadores correctamente para conseguir un conjunto de unas determinadas características.
- Describir las características de los paneles fotovoltaicos y sus aplicaciones en la producción de energía eléctrica.

8.1. Electrólisis

Actividad experimental 8.1

Llena un pequeño recipiente con agua lo más pura posible (agua destilada); introduce un par de electrodos conectados a una fuente de alimentación de C.C. (Figura 8.1). Mediante un amperímetro conectado en serie comprueba la corriente del circuito. Se podrá comprobar cómo en este caso no pasa la corriente.

Ahora diluye en el agua, bien unas gotas de ácido sulfúrico o de ácido clorhídrico, o bien unas sales. Podrás comprobar que ahora sí hay corriente y que en ambos electrodos aparecen burbujas.

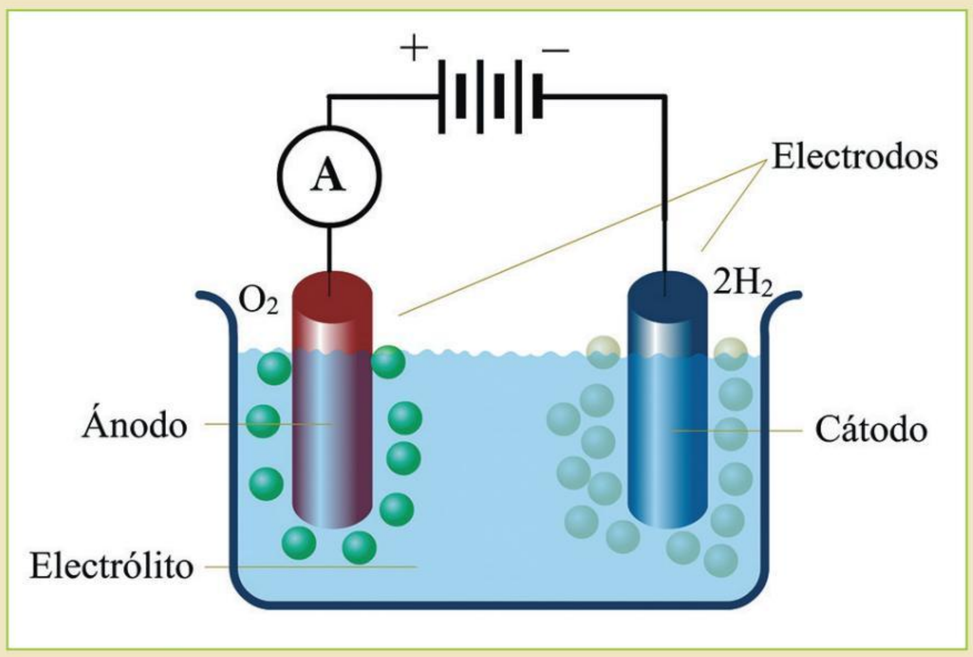


Figura 8.1. Comprobación experimental de la electrólisis.

De la Actividad experimental 8.1 se deduce que el agua pura tiene una resistencia eléctrica muy elevada y, por tanto, no conduce la corriente eléctrica. Sin embargo, al añadir ácidos o sales al agua, hace que la disolución sea conductora de la electricidad.

A los líquidos que permiten el paso de la corriente eléctrica se los denomina **electrólitos.**

A los electrodos que están sumergidos en el electrólito se los conoce por el nombre de **ánodo** cuando están conectados al positivo y **cátodo** al negativo.

Si hiciésemos pasar corriente por un electrólito durante un tiempo se podría observar perfectamente que el ánodo disminuye de peso, mientras que el cátodo aumenta. También se puede apreciar que el burbujeo observado pertenece a la descomposición del agua en hidrógeno y oxígeno. A estos fenómenos de descomposición que se dan en los electrólitos cuando son recorridos por una corriente eléctrica se los denomina **electrólisis.**

El transporte de materia que se produce en los electrólitos al ser atravesados por una corriente eléctrica tiene multitud de aplicaciones, tales como la descomposición del agua, refinado de metales, separación de metales por electrólisis, anodizado, obtención de metales, recubrimientos galvánicos consistentes en depositar un fino baño de oro, plata, níquel, cromo, estaño, cinc, etc., en un cuerpo conductor.

8.2. Recubrimientos galvánicos

Mediante la aplicación de la electrólisis se consiguen recubrimientos o baños metálicos.

Este procedimiento consiste en conectar eléctricamente el objeto que va a recubrirse en el electrodo negativo. En el electrólito se disuelven las sales apropiadas con el metal que deseamos que se deposite en el objeto. Como electrodo positivo se utiliza una placa del mismo metal a recubrir.

Así, por ejemplo, si queremos realizar un recubrimiento o baño de plata en un objeto metálico, podemos utilizar nitrato de plata diluido como electrólito. Los átomos metálicos de plata se disocian como un ion positivo, que al paso de la corriente son arrastrados hacia el electrodo negativo donde se encuentra el objeto a recubrir. Allí acaban depositándose y formando una fina capa de plata (Figura 8.2). De esta manera se pueden hacer baños de oro, níquel, cromo, cinc, etcétera.

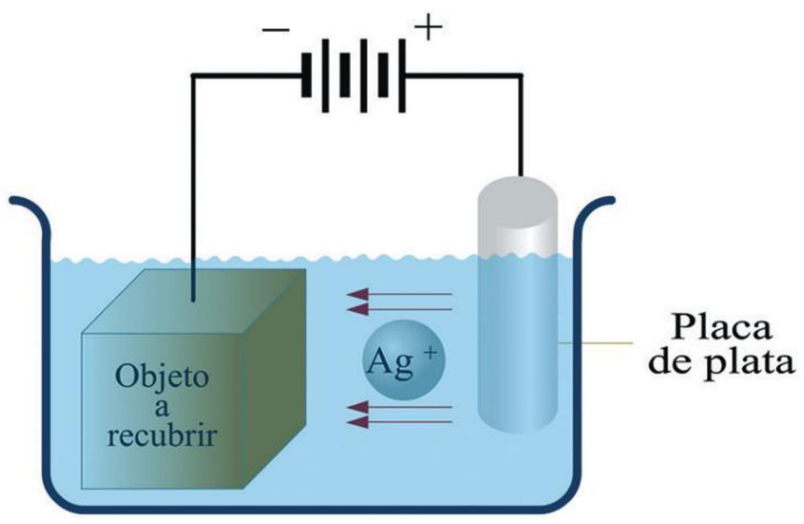


Figura 8.2. Proceso de recubrimiento galvánico.

8.3. Pilas eléctricas

Las pilas eléctricas son elementos que convierten la energía que se produce en una reacción química en energía eléctrica.

Sus aplicaciones son ya de sobra conocidas por todos nosotros, y se reducen fundamentalmente a la alimentación de pequeños aparatos portátiles. El tipo de corriente que produce una pila es de corriente continua. El principal inconveniente que nos encontramos con las pilas es que una vez agotado su combustible químico, se vuelven inservibles y hay que desecharlas.

Al contrario, los acumuladores funcionan de una forma similar a la de las pilas, con la ventaja de que se pueden

© Ediciones Paraninfo

recargar multitud de veces, tan solo con conectarlos durante un tiempo a una fuente de tensión continua (cargador de acumuladores).

Para construir un elemento básico de una pila, basta con introducir dos electrodos de diferentes metales en un electrólito. Al hacer esto aparece entre los electrodos una tensión eléctrica que depende de la naturaleza de los metales utilizados como electrodos y de la composición y concentración del electrólito.

El funcionamiento de una pila básica es el siguiente (Figura 8.3). El electrólito ataca al metal de los electrodos y los disuelve, pasando a la disolución como iones metálicos. Los iones metálicos adquieren siempre carga positiva (átomos metálicos con defecto de electrones), por lo que los electrodos, de donde son arrancados los átomos que pasan a la disolución, siempre se quedan con un exceso de electrones, es decir, con carga negativa.

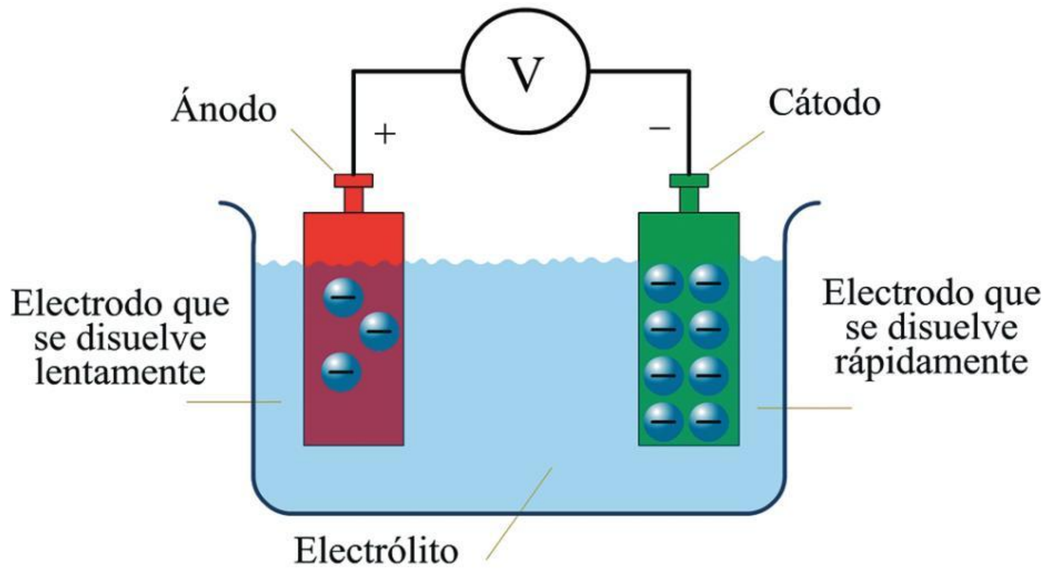


Figura 8.3. Pila elemental.

Dado que los dos electrodos son de diferente naturaleza, siempre existe uno de ellos que se disuelve más rápidamente que el otro, dando lugar a una carga más negativa en el electrodo que se disuelve en menos tiempo que en el que lo hace más lentamente.

El resultado es que aparece una diferencia de potencial entre ambos electrodos que puede ser utilizada para alimentar un receptor eléctrico.

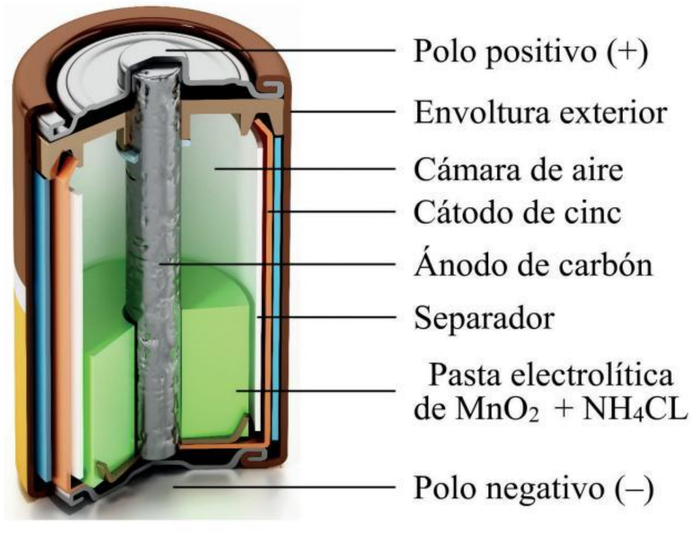


Figura 8.4. Constitución de una pila seca.

En la Figura 8.4 se muestra la constitución de una pila seca. Para evitar que se produzcan fugas del electrólito este queda contenido en un material esponjoso y absorbente; además se encierra la pila con un recubrimiento impermeable y otro de acero.

8.3.1. Características de las pilas

Las características fundamentales de las pilas son las siguientes:

- **Fuerza electromotriz:** la f. e. m. de la pila es la que se mide con un voltímetro de alta resistencia conectado entre los electrodos de la pila, lo que impide que la corriente en la medida sea lo más pequeña posible y así se evitan errores en la medida por caída de tensión en la resistencia interna de la pila. La f. e. m. de una pila depende fundamentalmente de los electrodos y del electrólito.
- **Capacidad:** cantidad total de electricidad que puede suministrar la pila hasta agotarse. La capacidad de una pila depende de los elementos que la constituyen, así como de sus dimensiones, y se mide en amperios-hora.
- **Resistencia interna:** este valor depende de las dimensiones de la pila y de la concentración y temperatura del electrólito, disminuyendo la resistencia interna al aumentar el tamaño de la pila. Este valor suele ser del orden de algunas décimas de ohmio.

8.3.2. Tipos de pilas eléctricas

Se pueden construir pilas combinando diferentes metales en sus electrodos y utilizando electrólitos variados. Así, se construyen las pilas Daniell, Volta, Leclanché, pilas secas tipo Leclanché, pilas secas de magnesio, pilas alcalinas, pilas de litio, pilas de óxido de mercurio, pila patrón de Weston, pilas de oxígeno, pilas alcalinas de pirolusita, pilas en forma de botón, pilas de combustible y otras muchas. Las pilas pueden constituirse a partir de un electrólito líquido, aunque en la actualidad se tiende a utilizar electrólitos inmovilizados mediante materias absorbentes (pilas secas) que confieren a las pilas mejores prestaciones.

De las pilas aquí mencionadas las de uso más común son (Figura 8.5):

- **Pilas tipo Leclanché o de cinc/carbón (Zn/C).** Son las pilas comunes, también denominadas «pilas secas». Son las de menor precio y se usan principalmente en aparatos sencillos y de poca potencia.
- **Pilas alcalinas o de cinc/dióxido de manganeso (Zn/MnO_2).** Usan hidróxido de potasio como electrólito.

© Ediciones Paraninfo

Son de larga duración. La mayoría de ellas vienen blindadas con el fin de evitar el derramamiento del electrólito.

- **Pilas de litio.** Producen tres veces más energía que las pilas alcalinas, considerando tamaños equivalentes, y poseen también mayor voltaje inicial que estas (3 V en vez de los 1,5 V de la mayoría de las alcalinas), pero su coste también es mayor con respecto a las pilas alcalinas. Son de uso común en cámaras fotográficas.

- **Pilas de óxido de plata (Zn-Ag_2O).** Poseen una gran capacidad de almacenamiento. Se construyen en forma de botón y suministran una tensión de 1,55 V. Su principal aplicación se encuentra en pequeños equipos electrónicos, como relojes, audífonos, calculadoras, marcapasos, etcétera.



Pila seca 9 V | Pila alcalina 1,5 V | Pila de litio 3 V | Pila de óxido de plata (1,55 V)

Figura 8.5. Conjunto de pilas eléctricas comerciales.

8.4. Acumuladores

El principio de funcionamiento de los acumuladores es similar al de las pilas eléctricas (dos electrodos de diferente constitución sumergidos en un electrólito). La diferencia entre pilas y acumuladores está en que estos se pueden recargar aplicando entre sus electrodos una diferencia de potencial perteneciente a una fuente de alimentación o cargador de baterías. De esta manera, al hacer pasar corriente eléctrica por un acumulador descargado se consigue reponer las condiciones químicas iniciales.

Dependiendo del electrólito utilizado y de la constitución de los electrodos se pueden construir diferentes tipos de acumuladores. Según el tipo de electrólito utilizado los acumuladores pueden ser **ácidos** o **alcalinos.** En los ácidos se utiliza como electrólito una disolución de ácido sulfúrico (H_2SO_4), como es el caso de los acumuladores de plomo. En los alcalinos el electrólito suele ser hidróxido potásico (KOH), como es el caso de los acumuladores de níquel-cadmio y de níquel-hierro.

8.4.1. Acumuladores de plomo

Estos acumuladores constan de dos placas de plomo sumergidas en un electrólito formado por una disolución de agua destilada más ácido sulfúrico ($H_2SO_4 + H_2O$).

Cuando el acumulador está cargado, el electrodo negativo está constituido por una placa de gran superficie que aloja plomo puro (Pb) en estado esponjoso; y en el electrodo positivo la placa contiene dióxido de plomo (PbO_2) de color marrón oscuro. A su vez, la densidad del ácido sulfúrico es elevada, del orden de 1,2 a 1,28 g/cm^3.

Si en estas condiciones conectamos un receptor entre ambas placas, aparecerá una corriente eléctrica gracias a la f. e. m. generada por el mismo principio de funcionamiento de las pilas (Figura 8.6) (dos electrodos de diferente constitución sumergidos en un electrólito).

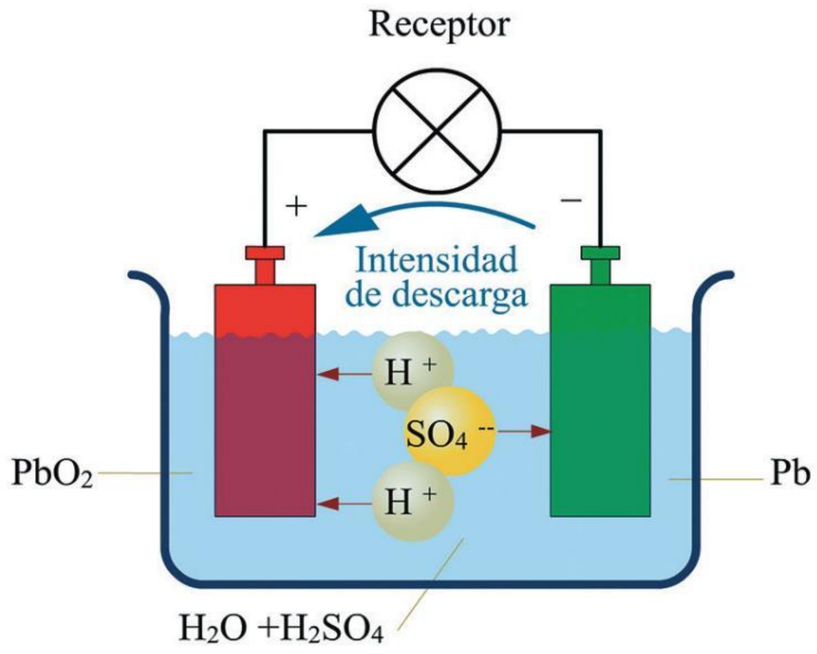


Figura 8.6. Acumulador de plomo cargado en estado de descarga.

En el proceso de descarga el ácido sulfúrico ataca químicamente ambas placas. Por un lado se disocia en 2 H y SO_4, que al recombinarse con las placas produce las siguientes reacciones químicas:

- **Placa positiva:**

$$PbO_2 + 2\,H + H_2SO_4 \Rightarrow PbSO_4 + 2\,H_2O$$

El dióxido de plomo de la placa positiva al combinarse con el ácido sulfúrico se transforman en sulfato de plomo más agua.

- **Placa negativa:**

$$Pb + SO_4 \Rightarrow PbSO_4$$

El plomo de la placa negativa junto con el azufre y el oxígeno se transforman también en sulfato de plomo.

De aquí se deduce que, durante la descarga, las placas se van transformando en sulfato de plomo, mientras que en el electrólito cada vez hay menos ácido sulfúrico y más agua. Según van siendo las placas más iguales se produce menos

© Ediciones Paraninfo

f. e. m., hasta llegar a la descarga total cuando ambas placas son totalmente de sulfato de plomo.

Proceso de carga: Al aplicar una fuente de alimentación al acumulador descargado, tal como se muestra en la Figura 8.7, la corriente eléctrica fluye por el acumulador en sentido contrario al de descarga y se producen reacciones inversas en las placas y en el electrólito, recuperándose el estado inicial:

- **Placa positiva:**

$$PbSO_4 + SO_4 + 2\,H_2O \Rightarrow PbO_2 + 2\,H_2SO_4$$

- **Placa negativa:**

$$PbSO_4 + 2\,H \Rightarrow Pb + H_2SO_4$$

En el proceso de carga la placa positiva se vuelve a transformar en dióxido de plomo, y en la negativa en plomo puro. El electrólito aumenta la densidad del ácido sulfúrico.

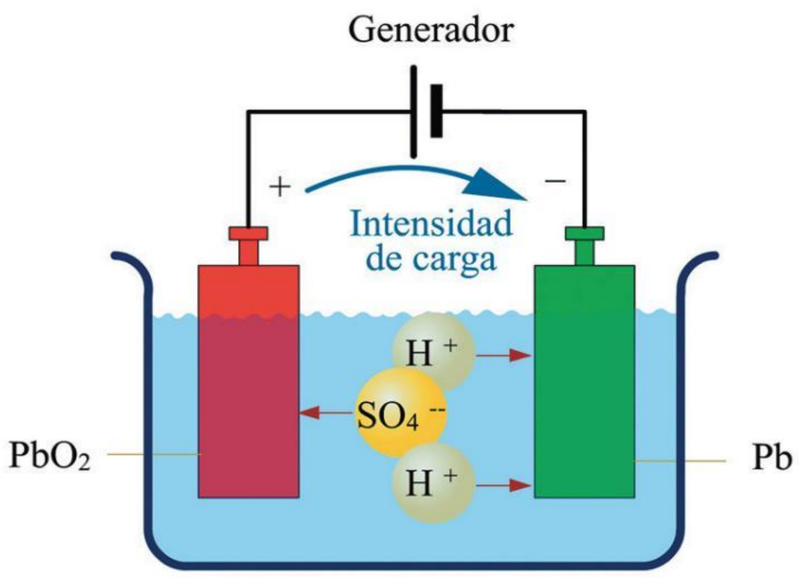


Figura 8.7. Acumulador de plomo descargado en estado de carga.

8.4.2. Constitución de un acumulador

Un acumulador se puede constituir con una única célula.

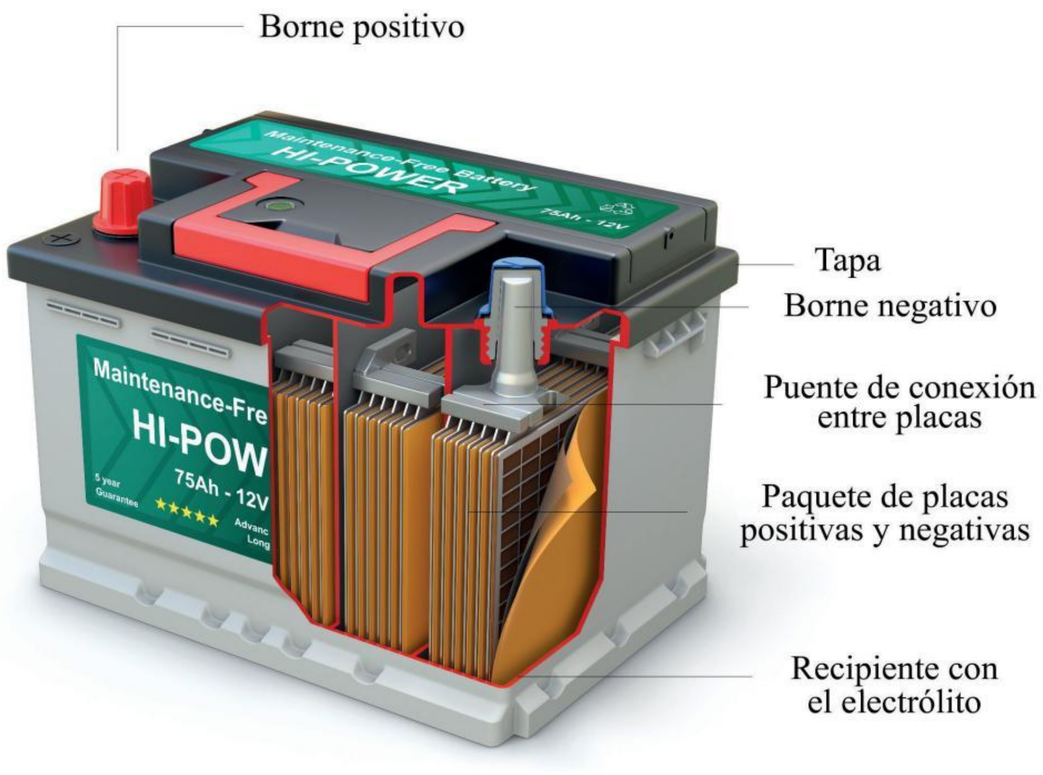


Figura 8.8. Constitución de un acumulador.

Dado que la tensión de una sola célula es baja (2 V en un acumulador de plomo), en la mayor parte de las aplicaciones prácticas se conectan varias células en serie y se introducen dentro de un mismo recipiente (Figura 8.8).

8.4.3. Capacidad de un acumulador

La capacidad de un acumulador nos indica la cantidad de electricidad que almacena. Esta se mide en amperios · hora (Ah) y se calcula mediante la expresión:

$$Q = I \cdot t$$

Actividad resuelta 8.1

Una batería de acumuladores de plomo con una capacidad de 92 Ah se descarga en 10 horas. Determina la corriente media de descarga.

Solución:

$Q = I \cdot t$, despejando

$$I = \frac{Q}{t} = \frac{92}{10} = 9{,}2\ \text{A}$$

La capacidad de un acumulador depende fundamentalmente de su tamaño, así como del número de células o elementos acoplados. Además de estos, también influyen otros factores:

- Las bajas temperaturas disminuyen la capacidad.
- Cuando exigimos que el acumulador ceda grandes cantidades de corriente, las reacciones químicas en las placas son más superficiales, por lo que el acumulador se descarga más rápido y disminuye su capacidad.

De aquí se deduce que la capacidad de un acumulador es mayor cuanto menor sea la intensidad de descarga.

Actividad propuesta 8.1

Una instalación fotovoltaica a 24 V dispone de una batería para su funcionamiento. Calcula la capacidad que será necesario que tenga dicha batería si se desea que pueda alimentar a 5 lámparas de 20 W durante un tiempo mínimo de 10 h.

La solución a esta Actividad propuesta la puedes encontrar dentro del MATERIAL WEB elaborado para este texto.

© Ediciones Paraninfo

8.4.4. Tensión y corriente de carga de un acumulador

Para cargar una batería de acumuladores hay que conectar una fuente de alimentación de C.C. que proporcione una tensión superior a la nominal de la batería, situando el polo positivo de la fuente de alimentación con el positivo de la batería, y el negativo de la fuente con el negativo de la batería.

En este proceso, es importante vigilar que la corriente no supere los valores máximos recomendados por el fabricante. Este valor suele estar en torno al 10 % del valor de la capacidad del acumulador. Así, por ejemplo, para un acumulador con 80 Ah sería aconsejable no superar los 8 amperios de corriente de carga.

Por lo general, utilizaremos como fuente de alimentación un cargador de baterías. Con él se fija la corriente máxima de carga, realizando un proceso automático de la regulación de carga y desconectándose una vez alcanzada la carga completa.

Actividad resuelta 8.2

En el circuito que se muestra en la Figura 8.9 aparece el sistema de carga de una batería de acumuladores de un automóvil. Averigua la tensión que debe proporcionar la fuente de alimentación (F.A.) para conseguir que la intensidad de carga de la batería sea de 15 A, teniendo en cuenta para ello que la resistencia interna de la misma es 0,2 Ω y que la fuerza electromotriz en el actual estado de carga es de 10 V.

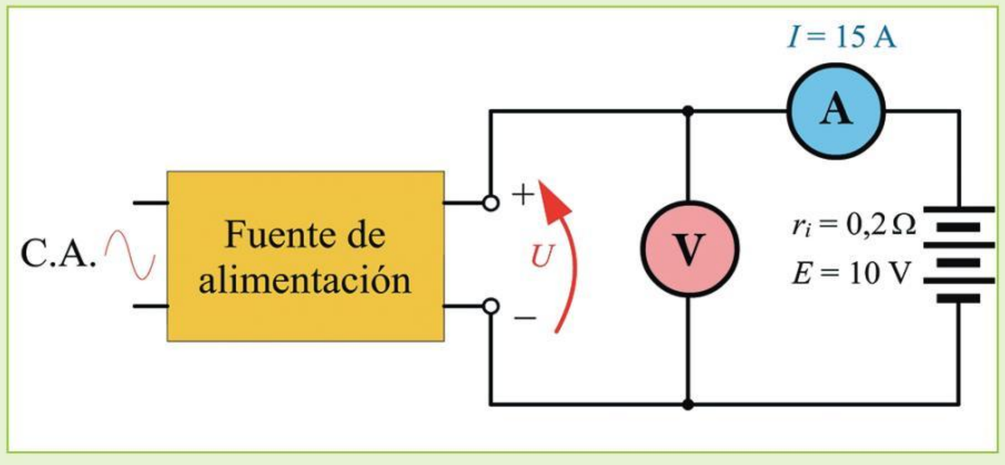


Figura 8.9.

Solución:

Si aplicamos la segunda ley de Kirchhoff al circuito cerrado formado, tendremos que la tensión (U) que tiene que proporcionar la fuente de alimentación será la suma de la f.e.m. (E) de la batería más la caída de tensión ($r \cdot I$) que se produce en la resistencia interna:

$$U = E + r \cdot I = 10 + 0{,}2 \cdot 15 = 13 \text{ V}$$

8.4.5. Tensión y corriente de descarga

Cuando se conecta un acumulador de plomo a un receptor, su tensión en bornes tiende a disminuir debido a la caída de tensión en su resistencia interna. Según se va descargando el acumulador, la tensión en bornes va disminuyendo, y puede llegar a desaparecer por completo. Por supuesto, es importante no llegar nunca a este extremo. De hecho, se recomienda no descender nunca de la **tensión límite de descarga,** que en el caso de un acumulador de plomo está en aproximadamente 1,8 V. Por debajo de esta tensión, el proceso de descarga tiende a formar cristales muy grandes de sulfato de plomo ($PbSO_4$) en las placas (sulfatación de las placas), que hacen difícil su reconstitución en el proceso de carga.

Para evitar que una batería de acumuladores se descargue por debajo de la tensión límite de descarga se utilizan reguladores automáticos que vigilan constantemente la tensión y corriente en bornes de la batería, produciendo la desconexión de esta en caso de alcanzar valores no recomendables.

8.4.6. Resistencia interna

La resistencia interna de un acumulador de plomo es muy pequeña. Esto aporta ciertas ventajas e inconvenientes.

Al ser baja la resistencia interna, la caída de tensión que en ella se origina también lo es, por lo que la tensión en bornes es más estable con los cambios de corriente. Además las pérdidas de potencia son bajas.

Por otro lado, en caso de producirse un cortocircuito, esta pequeña resistencia interna provoca que la corriente sea muy elevada, pudiendo llegar a deformar las placas. En conclusión, se deben evitar los cortocircuitos con las protecciones adecuadas.

8.4.7. Vida de un acumulador

La duración de un acumulador no es ilimitada. Los largos periodos de almacenamiento sin recarga y la simple utilización del acumulador producen transformaciones en los electrodos, como la corrosión, sulfatación de placas, etc., que hacen que la capacidad del acumulador disminuya hasta valores no aceptables para su correcto funcionamiento. Además, los ciclos constantes de carga y descarga producen desprendimientos de materia activa de los electrodos, que acaban sedimentándose en el fondo del recipiente del electrólito y pueden llegar a provocar un cortocircuito entre ambas placas. El resultado es la inutilización definitiva del acumulador.

© Ediciones Paraninfo

8.4.8. Autodescarga de un acumulador

Cuando un acumulador no se usa durante un largo periodo de tiempo se produce una disminución de su capacidad. A este hecho se lo conoce por el nombre de autodescarga.

La descarga espontánea de los acumuladores es mucho mayor que en las pilas. Para evitar que los efectos de la autodescarga puedan dañar a un acumulador almacenado durante largo tiempo conviene llevar a cabo recargas periódicas que compensen las pérdidas provocadas por la autodescarga. Así, por ejemplo, en un acumulador de plomo se produce una pérdida en torno al 100 % de su capacidad en un año debido a la autodescarga. En los acumuladores alcalinos estos valores son inferiores, y rondan el 30 % por año.

El factor que más influye en la autodescarga es la temperatura, de tal forma que si se desea almacenar una batería de acumuladores durante un largo periodo es conveniente hacerlo a bajas temperaturas.

8.4.9. Acumuladores alcalinos

En los acumuladores alcalinos el electrólito que se utiliza consiste en una solución de hidróxido potásico (KOH). Según el material que se emplee en las placas, se pueden construir diferentes tipos de acumuladores, con la idea de encontrar las características idóneas para cada una de las aplicaciones posibles.

En la Tabla 8.1 se da una relación de los diferentes tipos de acumuladores alcalinos.

Tabla 8.1. Acumuladores alcalinos

Electrodo positivo de óxido de níquel	Electrodo positivo de óxido de plata	Electrodo positivo de hidrógeno
Níquel-cadmio	Plata-cinc	Níquel-hidrógeno
Níquel-hierro	Plata-cadmio	Plata-hidrógeno
Níquel-cinc	Plata-hierro	—

Dentro de estos acumuladores los más utilizados hasta ahora son los de níquel-cadmio y el de níquel-hierro. Los acumuladores con electrodos de plata resultan muy caros, aunque sus buenas características los hacen ideales para aplicaciones de interés estratégico (satélites, equipos militares, etc.).

8.4.10. Acumuladores de ion-litio

Uno de los acumuladores más utilizados en la actualidad es de ion-litio. Con ellos se construyen baterías recargables de alta capacidad para su uso en dispositivos electrónicos portátiles, herramientas portátiles de alta potencia, vehículos eléctricos, almacenamiento de energía para paneles solares y energía eólica, etcétera.



Figura 8.10. Baterías de ion-litio.

Los acumuladores de ion-litio permiten ciclos de carga mucho más rápidos; su vida útil se alarga, pudiendo soportar más de 2.000 ciclos de carga y descarga; además permiten almacenar una gran cantidad de energía eléctrica en un espacio reducido.

Una de las grandes ventajas de las baterías de ion-litio sobre las convencionales es su mayor densidad energética, que pueden llegar hasta los 250 Wh/kg. Esta mayor densidad energética permite construir baterías de menor peso y tamaño. Además, proporcionan una tensión por cada celda más alta que sus competidoras, entre los 3,7 y 4,2 V.

Así, por ejemplo, las baterías de plomo-ácido ofrecen 30 Wh/kg de densidad energética, las de NiFe (40 Wh/kg), las de NiCd (50 Wh/kg) y las de NiMH (80 Wh/kg).

La ventaja de las baterías de ion-litio es que no se basan en reacciones químicas que descomponen los electrodos, sino en iones de litio que fluyen de un lado a otro entre el ánodo y el cátodo.

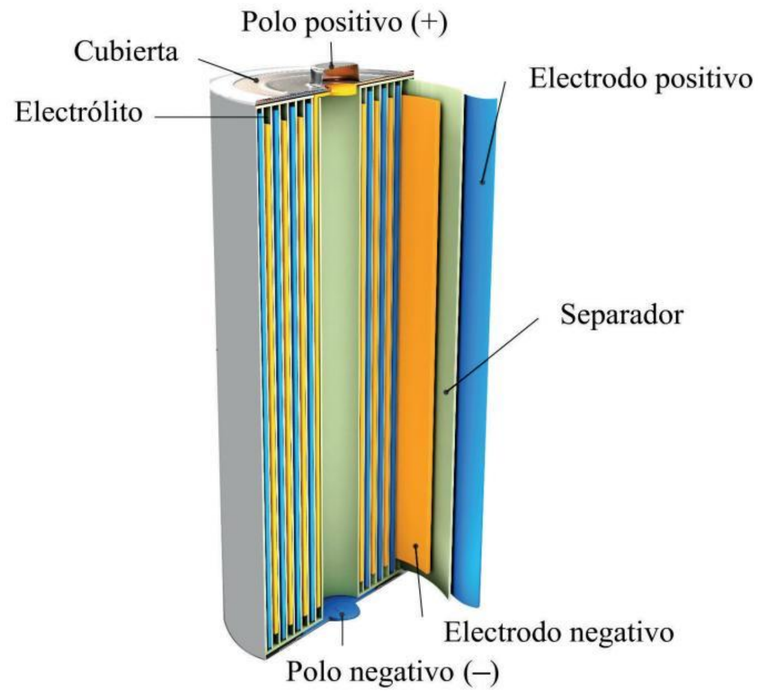


Figura 8.11. Estructura de un acumulador de ion-litio

Un acumulador de ion-litio se compone de los siguientes elementos:

- **Electrodo positivo:** está fabricado en óxido de cobalto litio o, más recientemente, de fosfato de hierro litio.

© Ediciones Paraninfo

- **Electrodo negativo:** está fabricado de grafito.
- **Electrólito:** Se compone de un solvente donde se diluyen las sales de litio.
- **Separador:** está formado por una lámina de plástico aislante que separa el ánodo del cátodo para evitar el cortocircuito entre los electrodos.

El litio es muy reactivo y tiende a perder con mucha facilidad electrones, así cuando lo hace se convierte en un ion de litio positivo.

Durante el proceso de carga del acumulador, los iones de litio son arrastrados del electrodo positivo al negativo a través del electrólito, uniéndose al electrodo de grafito. Aquí se recombinan con los electrones correspondientes a su estructura atómica agrupado en capas hexagonales, quedando el litio allí almacenado (Figura 8.12).

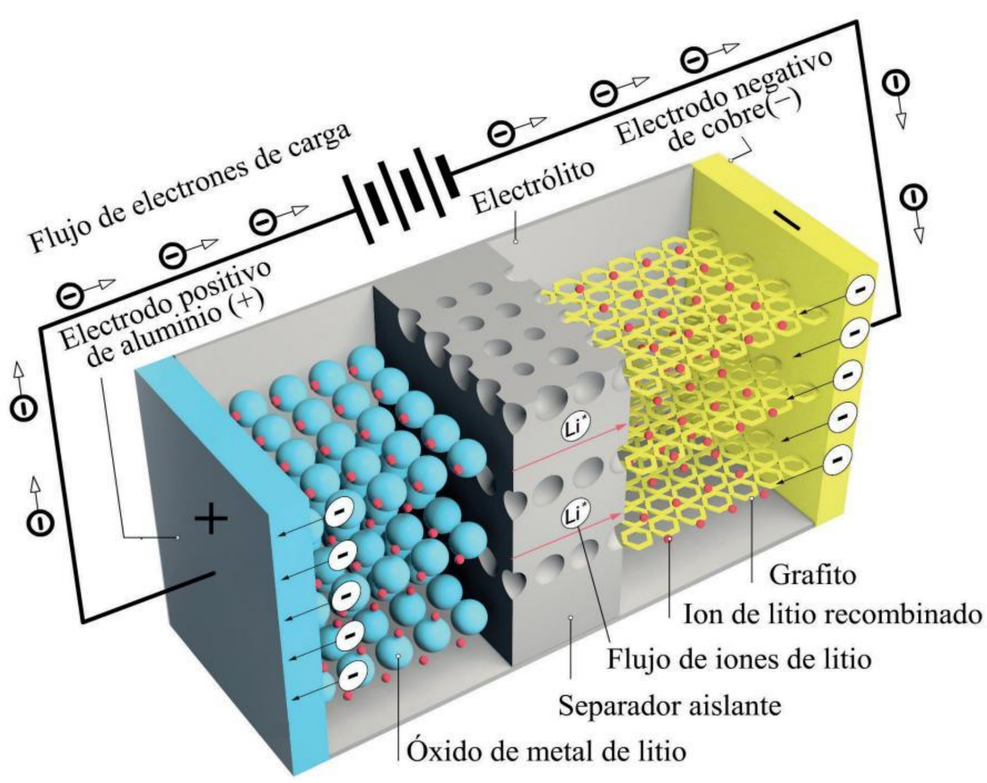


Figura 8.12. Proceso de carga de un acumulador de ion-litio.

Durante la descarga, ocurre el proceso opuesto; los iones de litio se separan del grafito para unirse de nuevo al electrodo positivo.

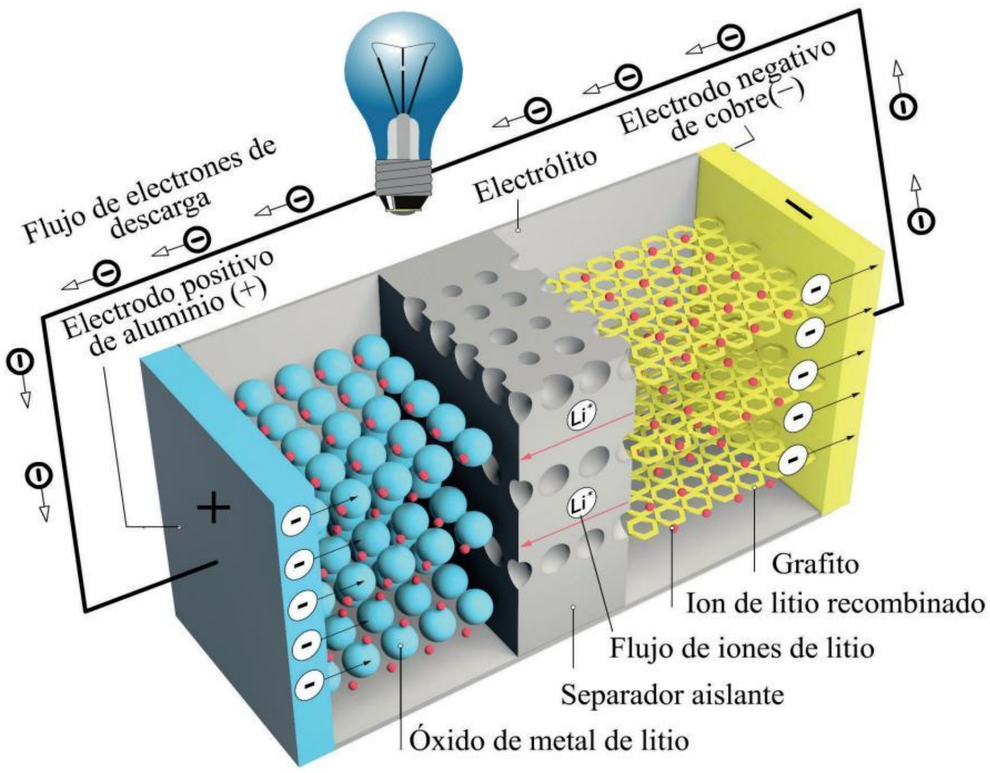


Figura 8.13. Proceso de descarga de un acumulador de ion-litio.

Tanto en la carga como en la descarga, los electrones que constituyen la corriente eléctrica se mueven en dirección contraria a la de los iones de litio por el circuito externo a la celda. El electrólito constituye una barrera aislante que impide que los electrones fluyan de él, pero sí permite el flujo de los iones de litio.

Cuando se somete estas baterías a procesos de carga o descarga rápidos, a base de intensidades de corriente elevadas, aparecen problemas de sobrecalentamiento. Teniendo en cuenta que el electrólito de las celdas está formado por una sustancia altamente inflamable, el aumento de su temperatura puede provocar la aparición de gases a presión elevada. Esta sobrepresión puede llegar a provocar fugas al exterior, que combinadas con las altas temperaturas, dan lugar a su incendio o explosión.

Para evitar estos peligros, se puede dotar internamente a las baterías de sistemas de seguridad que detectan los excesos de temperatura y producen su desconexión automática. Para baterías de gran capacidad, como las del coche eléctrico, se añaden además sistemas de refrigeración que mantienen la temperatura de funcionamiento en su punto óptimo.

8.4.11. Baterías de acumuladores para el coche eléctrico

En la actualidad y debido a la necesidad de aumentar las prestaciones de las baterías para su uso en el coche eléctrico, se siguen diferentes líneas de investigación con el fin de desarrollar baterías que posean una mayor densidad energética con las que se consiga aumentar su autonomía por encima de los 1.000 km. Otro objetivo es conseguir ciclos de carga ultrarrápidos que consigan una carga prácticamente completa en un tiempo récord de 5 minutos. Además, se buscan componentes que permitan aumentar la vida útil de la batería por encima de los 2.000 ciclos de carga.

Algunas de las baterías por venir podrían ser las de litio-metal con electrólito sólido formado por un polímero o resina.

Las baterías para el vehículo eléctrico están formadas por un gran número de celdas conectadas en serie y en paralelo para conseguir las características eléctricas requeridas (Figura 8.14).

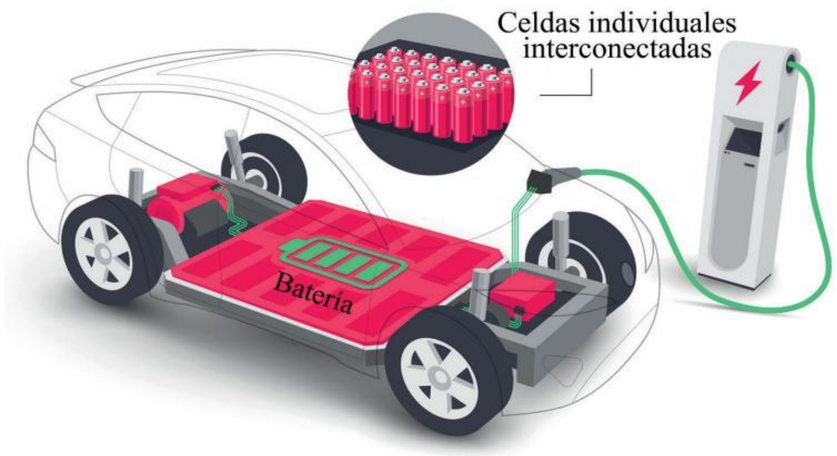


Figura 8.14. Batería del vehículo eléctrico.

© Ediciones Paraninfo

8.5. Conexión de pilas y acumuladores

Al igual que con los receptores, las pilas, los acumuladores y, en general, cualquier tipo de generador pueden ser conectados en serie, paralelo o mixto. El resultado obtenido de estos agrupamientos es muy útil cuando se desea aumentar la tensión o la intensidad que suministra un generador.

Antes de estudiar el resultado de estas conexiones, vamos a examinar algunas de las características típicas de un generador.

8.5.1. Tensión en bornes del generador

Cuando el generador suministra corriente al circuito exterior se produce una cierta caída de tensión en la resistencia interna del generador, de tal forma que la tensión que aparece en bornes del generador es menor que la f. e. m. de este (Figura 8.15):

$$U_b = E \cdot r_i I$$

En estas condiciones, la tensión que suministra un generador irá disminuyendo según vaya aumentando la intensidad de la carga.

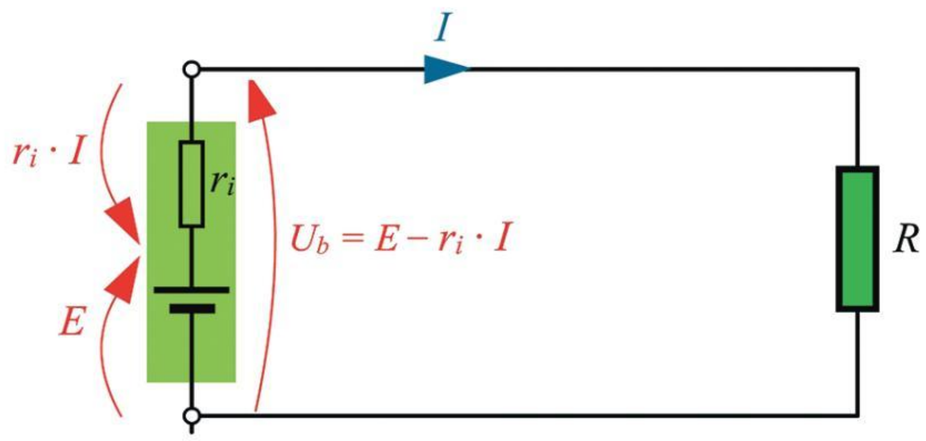


Figura 8.15. Tensión en bornes del generador.

8.5.2. Potencia del generador

En la resistencia interna también se produce una pérdida de potencia, que se transforma en calor por efecto Joule y que reduce el rendimiento del generador.

Potencia perdida por el generador:

$$P_p = r_i I^2$$

La potencia total que cede el generador al circuito será la suma de la potencia que se pierde en la resistencia interna más la que aparece en la carga. Para calcularla aplicamos la expresión de la potencia utilizando la fuerza electromotriz en el primer término (la f. e. m. se corresponde con toda la tensión que proporciona el generador) y la corriente en el segundo.

Potencia total cedida por el generador:

$$P_T = E \cdot I$$

$$P_T = P_u + P_p$$

Al receptor se le entrega una potencia que es inferior a la total generada. Esta potencia útil es igual al producto de la tensión en bornes del generador por la corriente.

Potencia útil cedida a la carga:

$$P_u = U_b I$$

8.5.3. Rendimiento eléctrico de un generador

Es la relación que existe entre la potencia útil que suministra el generador al circuito y la potencia total que este desarrolla. Se representa por la letra griega η. Si expresamos el rendimiento porcentualmente, tendremos que:

$$\eta_{\text{eléctrico}} = \frac{P_u}{P_T} 100$$

Actividad resuelta 8.3

Una batería de acumuladores de automóvil posee una f. e. m. de 12 V y una resistencia interna de 0,2 Ω. Determina la tensión que aparecerá en bornes de esa batería cuando se la conecte a una carga resistiva de 3 Ω. Haz un balance de las potencias entregadas por el generador y determina el rendimiento eléctrico.

Solución:

Para calcular la intensidad tenemos en cuenta que a la resistencia de la carga se le suma la interna del propio generador:

$$I = \frac{E}{R + r_i} = \frac{12}{3 + 0{,}2} = 3{,}75 \text{ A}$$

$$U_b = E - r_i I = 12 - 0{,}2 \cdot 3{,}75 = 11{,}25 \text{ V}$$

$$P_p = r_i I^2 = 0{,}2 \cdot 3{,}75^2 = 2{,}8 \text{ W}$$

$$P_T = E \cdot I = 12 \cdot 3{,}75 = 45 \text{ W}$$

$$P_u = U_b I = 11{,}25 \cdot 3{,}75 = 42{,}2 \text{ W}$$

Comprobaremos si se cumple que

$$P_T = P_u + P_p = 42{,}2 + 2{,}8 = 45 \text{ W}$$

© Ediciones Paraninfo

El rendimiento eléctrico será, entonces:

$$\eta_{\text{eléctrico}} = \frac{P_u}{P_T} 100 = \frac{42{,}2}{45} 100 = 93{,}8\ \%$$

Este resultado nos indica que, de cada 100 W que produce el generador, 93,8 W son útiles.

8.5.4. Conexión de generadores en serie

La conexión de generadores en serie se utiliza cuando queremos aumentar la tensión de salida. Esta forma de conexión es muy utilizada en las baterías de acumuladores, donde se consigue la tensión de salida buscada a base de conectar varios acumuladores en serie.

Esta conexión consiste en agrupar los generadores uno seguido del otro conectándolos entre sí por sus polos contrarios y dejando dos terminales libres, que constituyen el positivo y negativo del agrupamiento. En la Figura 8.16 se muestra la conexión de tres acumuladores en serie.

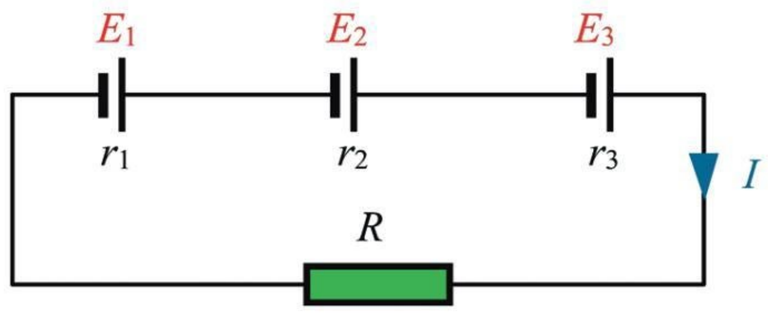


Figura 8.16.

En la conexión en serie se cumple que:

- La fuerza electromotriz del conjunto es igual a la suma de las fuerzas electromotrices de cada uno de los generadores.

$$E = E_1 + E_2 + E_3$$

- La resistencia interna del conjunto es igual a la suma de las resistencias internas de cada uno de los generadores.

$$r = r_1 + r_2 + r_3$$

- La intensidad de la corriente eléctrica es igual en todos los generadores.

Actividad resuelta 8.4

Una batería está compuesta por 6 acumuladores conectados en serie. La f.e.m. de cada acumulador es de 1,5 V y su resistencia interna de 0,1 Ω. Calcula: **a)** la corriente y tensión que aparecerá al conectar una carga de 5 Ω de resistencia; **b)** la tensión en bornes en vacío (sin conectar carga); **c)** intensidad si se cortocircuita la carga (unir eléctricamente mediante un conductor los dos terminales de la batería).

Solución:

$$E = E_1 + E_2 + \ldots + E_6 = 6 \cdot 1{,}5 = 9\ \text{V}$$

$$r = r_1 + r_2 + \ldots + r_6 = 6 \cdot 0{,}1 = 0{,}6\ \Omega$$

El agrupamiento de los acumuladores en serie equivale entonces a uno solo de f.e.m. 9 V y resistencia interna 0,6 Ω.

a) La corriente la determinamos aplicando la ley de Ohm entre los extremos de la batería:

$$I = \frac{E}{R + r} = \frac{9}{5 + 0{,}6} = 1{,}61\ \text{A}$$

La tensión en la carga la calculamos aplicando la ley de Ohm entre sus extremos:

$$U = R \cdot I = 5 \cdot 1{,}61 = 8\ \text{V}$$

b) Cuando se abre el circuito de alimentación, la corriente se interrumpe, y por tanto la caída de tensión en la resistencia interna de los acumuladores se hace cero, apareciendo en la salida una tensión igual a la fuerza electromotriz:

$$U_b = E - rI = 9 - 0{,}6 \cdot 0 = 9\ \text{V}$$

c) Al provocar el cortocircuito la resistencia del receptor se vuelve aproximadamente igual a cero, por lo que la corriente que se alcanza es igual a:

$$I_{cc} = \frac{E}{R + r} = \frac{9}{0 + 0{,}6} = 15\ \text{A}$$

8.5.5. Conexión de generadores en paralelo

La conexión de generadores en paralelo se utiliza cuando queremos aumentar la corriente de salida manteniendo la tensión constante.

En la Figura 8.17 se han conectado tres generadores electroquímicos en paralelo.

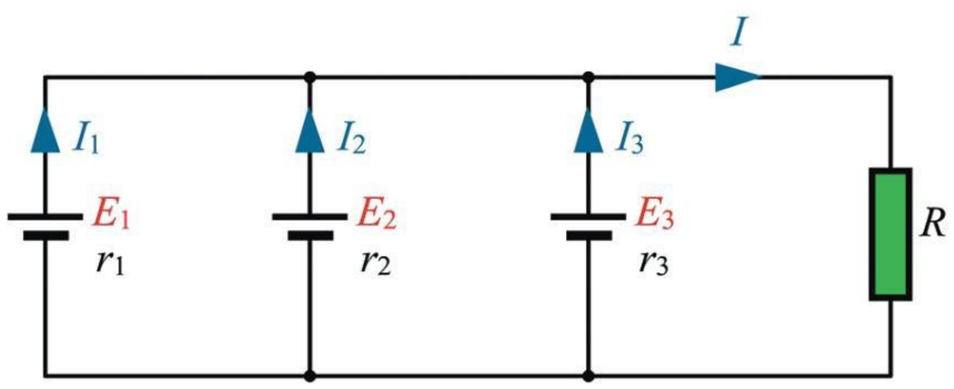


Figura 8.17. Agrupamiento de generadores en paralelo.

© Ediciones Paraninfo

La conexión en paralelo posee las siguientes características:

- Para que todos los generadores aporten energía deberán poseer la misma f. e. m.
- La f. e. m. equivalente al conjunto es la misma que la de los generadores acoplados.
- Si deseamos que todos los generadores aporten la misma corriente y potencia, además de ser igual su f. e. m., también deberán ser iguales sus resistencias internas.
- La intensidad que suministra el conjunto de generadores es igual a la suma de las intensidades que aporta cada generador.

Actividad resuelta 8.5

Se conectan en paralelo tres generadores de 12 V de f. e. m. y 0,3 Ω de resistencia interna. Determina la intensidad y tensión que aparecerá en los terminales del conjunto al conectar una resistencia de 4 Ω. ¿Qué corriente aporta cada generador?

Solución:

Determinaremos primero la f. e. m. y la resistencia interna equivalente del acoplamiento:

$$E = E_1 = E_2 = E_3 = 12 \text{ V}$$

Como las resistencias están conectadas en paralelo y son iguales:

$$r = \frac{0{,}3}{3} = 0{,}1\ \Omega$$

De lo que resulta que el acoplamiento en paralelo de los tres generadores equivale a uno solo de 12 V de f. e. m. y 0,1 Ω de resistencia interna.

$$I = \frac{E}{R + r} = \frac{12}{4 + 0{,}1} = 2{,}93 \text{ A}$$

La tensión que aparece en los terminales del conjunto de generadores es:

$$U_b = E - rI = 12 - 0{,}1 \cdot 2{,}93 = 11{,}7 \text{ V}$$

La corriente que suministra cada generador es:

$$I_1 = I_2 = I_3 = \frac{I}{3} = \frac{2{,}93}{3} = 0{,}98 \text{ A}$$

8.5.6. Conexión mixta de generadores

La conexión mixta de generadores es necesaria cuando se quiere aumentar la tensión e intensidad de corriente del conjunto (Figura 8.18).

Esta configuración resulta imprescindible para la interconexión de paneles solares y la construcción de potentes baterías para el vehículo eléctrico.

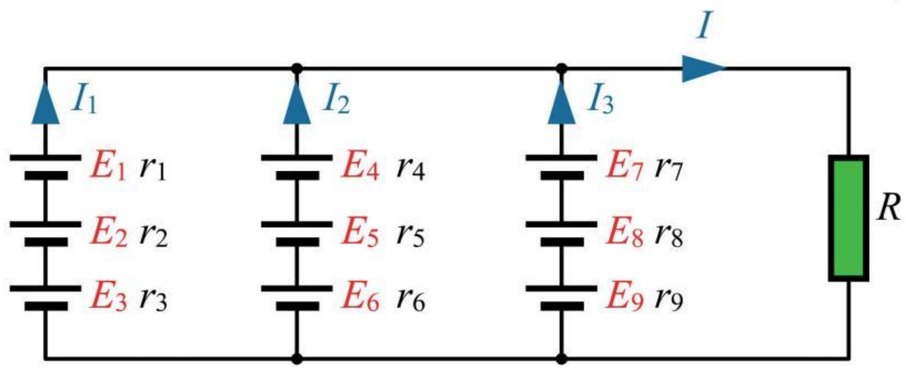


Figura 8.18. Conexión mixta de generadores.

Cuando se conectan de forma mixta los generadores, la tensión en los bornes de salida viene determinada por la suma de la que posean cada uno de los mismos en su rama de conexión en serie. Por otro lado, la corriente de salida será el resultado de sumar la corriente que proporciona cada una de las agrupaciones serie conectadas a su vez en paralelo.

Actividad resuelta 8.6

La batería de un vehículo eléctrico está constituida por 20.000 acumuladores de ion-litio de 4 V de f. e. m.; 0,3 Ω de resistencia interna, y 3 Ah de capacidad. Los acumuladores se conectan en serie en grupos de 100. A su vez, 200 de estas asociaciones se conectan en paralelo (Figura 8.19).

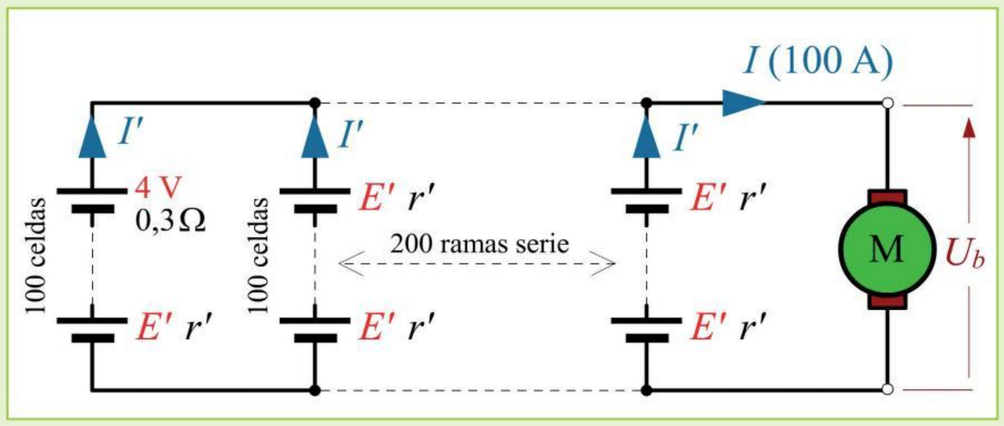


Figura 8.19.

Calcula:

a) Las características eléctricas de la batería en su conjunto.

b) En el caso de alimentar un motor eléctrico que demande una intensidad de 100 A, determina la intensidad que proporciona cada uno de los acumuladores, la tensión total de salida, la potencia entregada al motor y el tiempo total de descarga de la batería.

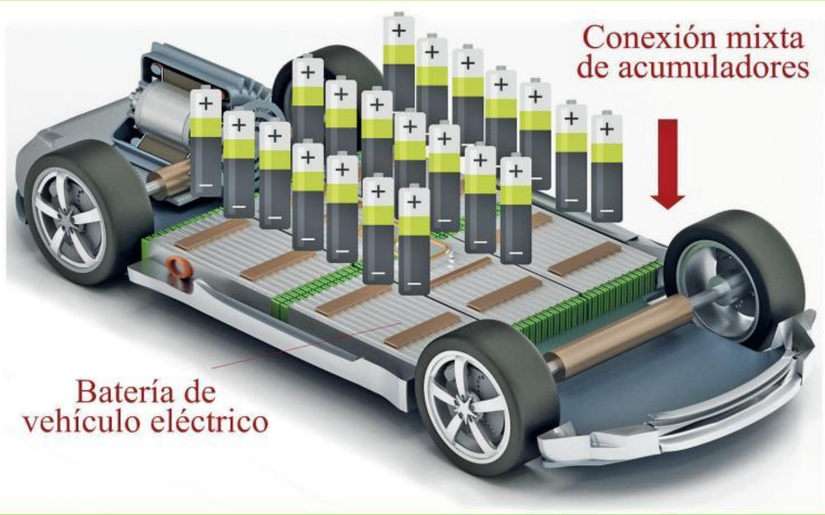


Figura 8.20. Batería de un vehículo eléctrico.

© Ediciones Paraninfo

Solución:

a) La tensión y resistencia interna resultante de cada una de las agrupaciones de 100 acumuladores conectados en serie será de (Figura 8.21):

$$E_s = 100 \cdot 4\ \text{V} = 400\ \text{V}$$

$$r_s = 100 \cdot 0{,}3\ \Omega = 30\ \Omega$$

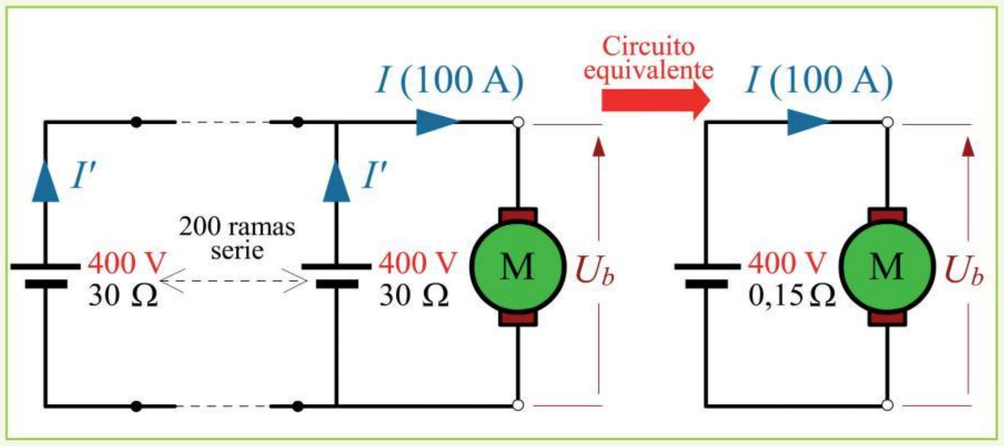


Figura 8.21.

La tensión y resistencia interna resultante de los 200 grupos serie conectados en paralelo será de:

$$E_T = E_s = 400\ \text{V}$$

$$r_T = \frac{r_s}{n_{agrupaciones}} = \frac{30}{200} = 0{,}15\ \Omega$$

La capacidad de cada acumulador de 3 Ah también se puede expresar en términos de energía eléctrica:

$$Wh = P \cdot t = E \cdot I \cdot t = 4\ \text{V} \cdot 3\ \text{A} \cdot 1\ \text{h} = 12\ \text{Wh}$$

La energía eléctrica total que puede aportar esta batería será de:

$$20.000\ \text{celdas} \cdot 12\ \text{Wh} = 240.000\ \text{Wh} = 240\ \text{kWh}$$

b) Cuando la batería proporcione 100 A al motor, la intensidad de corriente que fluye por cada una de las 200 agrupaciones en serie y, por tanto, por cada acumulador, será de:

$$I' = 100/200 = 0{,}5\ \text{A}$$

La tensión en bornes de la batería cuando se suministran 100 A la calculamos teniendo en cuenta los valores de f.e.m. y resistencia interna totales del conjunto de acumuladores:

$$Ub = E - r_T\, I = 400 - 0{,}15 \cdot 100 = 385\ \text{V}$$

La potencia útil entregada al motor será:

$$P_u = U_b\, I = 385 \cdot 100 = 38.500\ \text{W} = 38{,}5\ \text{kW}$$

La potencia total entregada por la batería será:

$$P_u = E\, I = 400 \cdot 100 = 40.000\ \text{W} = 40\ \text{kW}$$

El tiempo de descarga de la batería lo podemos calcular a partir de su capacidad total expresada en kWh:

$$t = Q\ (\text{kWh})/\ P\ (\text{kW}) = 240\ \text{kWh}/40\ \text{kW} = 6\ \text{h}$$

Podríamos llegar al mismo resultado teniendo en cuenta la capacidad de cada celda (3 Ah) y la corriente que suministra cada una de las mismas (0,5 A):

$$t = Q/I = 3\ \text{Ah}/0{,}5\ \text{A} = 6\ \text{h}$$

Actividad propuesta 8.2

Un parque de baterías está formado por 8 celdas de 12 V de f.e.m.; 0,2 Ω de resistencia interna y 50 Ah de capacidad, conectadas según el esquema de la Figura 8.22. El conjunto alimenta a una motobomba con una corriente nominal de 20 A. Calcula: a) tensión en bornes de la motobomba, b) corriente suministrada por cada celda, c) rendimiento eléctrico del parque de baterías, d) capacidad total en kWh, e) tiempo total de descarga.

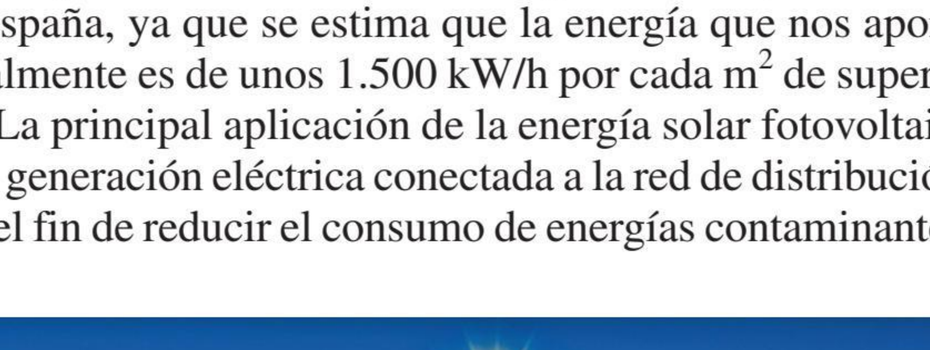


Figura 8.22.

La solución a esta Actividad propuesta la puedes encontrar dentro del MATERIAL WEB elaborado para este texto.

8.6. Energía solar fotovoltaica

La energía solar es una energía renovable que está experimentando un gran desarrollo en la actualidad. El Sol es una fuente de energía con grandes posibilidades de aprovechamiento para su conversión en energía eléctrica, sobre todo en España, ya que se estima que la energía que nos aporta anualmente es de unos 1.500 kW/h por cada m^2 de superficie. La principal aplicación de la energía solar fotovoltaica es la generación eléctrica conectada a la red de distribución, con el fin de reducir el consumo de energías contaminantes.



Figura 8.23. Energía solar fotovoltaica.

La forma de convertir la energía solar en energía eléctrica es a través de paneles fotovoltaicos. Las primeras aplicaciones de estos dispositivos fue la alimentación de energía

© Ediciones Paraninfo

eléctrica a los satélites espaciales y repetidores de radio y televisión alejados de las líneas eléctricas de distribución.

Los paneles fotovoltaicos están formados por células de silicio (materiales semiconductores) que, al recibir radiación solar en forma de luz generan una diferencia de potencial o tensión entre sus extremos en forma de corriente continua. A este fenómeno se le conoce como efecto fotoeléctrico, que consiste en la emisión de electrones por un material semiconductor cuando incide en él una radiación electromagnética (luz visible o ultravioleta, en general). El efecto fotoeléctrico fue descubierto por Heinrich Hertz en 1887.

Dado que la tensión que genera cada célula fotovoltaica es en torno a 0,5 y 0,6 V, para la construcción de un panel fotovoltaico se utilizan un número determinado de células conectadas en serie hasta conseguir la tensión de salida deseada (habitualmente se emplean entre 12 y 36 V). Además, se conectan en paralelo varias de estas redes de células con el fin de aumentar la intensidad de corriente del conjunto del panel fotovoltaico.

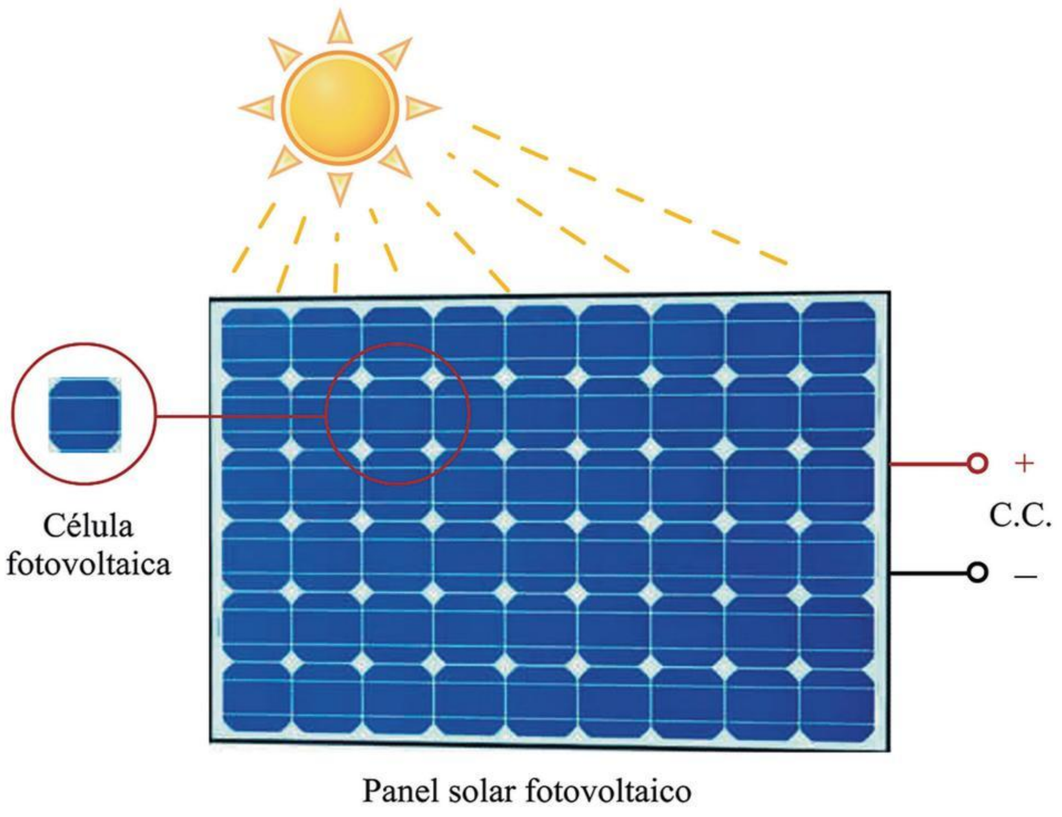


Figura 8.24. Panel solar fotovoltaico.

8.6.1. Características eléctricas de los paneles fotovoltaicos

$P_{máx}$: Es la potencia máxima en vatios que el panel puede entregar a la carga.

$I_{pmáx}$: Intensidad de corriente en amperios a la máxima potencia del panel.

$U_{pmáx}$: Tensión en voltios en el punto de potencia máxima.

I_{cc}: Intensidad de corriente de cortocircuito, resultante de cortocircuitar el panel.

U_0: Tensión de vacío, obtenida en los terminales del panel al no conectar carga alguna.

En la Tabla 8.2 se muestran, como ejemplo, los valores característicos de una gama comercial de paneles fotovoltaicos.

Tabla 8.2. Características eléctricas

Modelo	$P_{máx}$	$I_{pmáx}$	$U_{pmáx}$	I_{cc}	U_0
A5	5 W	0,28 A	17,0 V	0,34 A	21,6 V
A20	20 W	1,18 A	17,0 V	1,40 A	21,6 V
A45	45 W	3,00 A	15,0 V	3,20 A	18,0 V
A65	65 W	4,00 A	16,3 V	4,60 A	20,5 V
A110	110 W	6,79 A	16,2 V	7,40 A	20,5 V
A150	150 W	4,40 A	31,0 V	4,84 A	46,4 V

Otros factores que afectan al funcionamiento de los paneles fotovoltaicos son:

- **La intensidad de corriente eléctrica aumenta con la radiación solar,** mientras que la tensión permanece más o menos constante. En la Figura 8.25 se muestran las curvas de tensión e intensidad de un panel fotovoltaico en función del nivel de radiación solar (irradiancia). La irradiancia se mide en W/m^2 y se define como la energía por unidad de tiempo y superficie que incide en la tierra. En buenas condiciones el valor de la irradiancia por hora es aproximadamente de 1.000 W/m^2, aunque puede variar dependiendo de la latitud o de las condiciones atmosféricas.

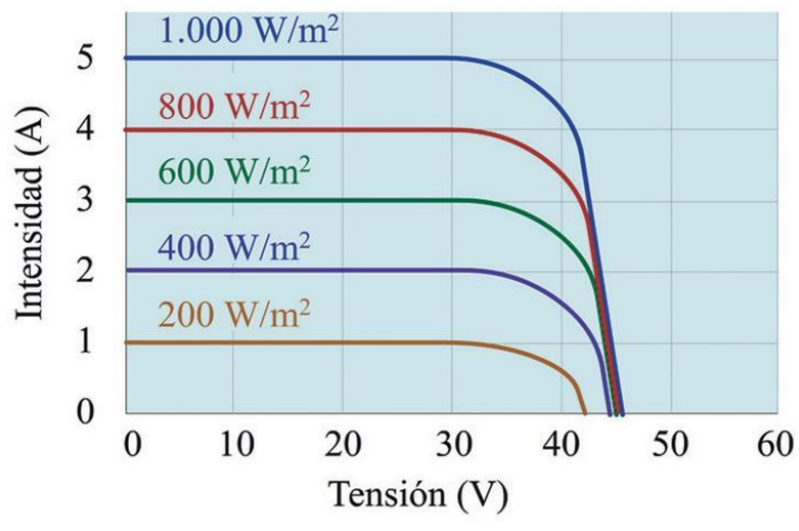


Figura 8.25. Curva tensión e intensidad en función de diferentes niveles de irradiancia.

- **El sol provoca el calentamiento de las células fotovoltaicas,** lo que hace que la tensión generada sea menor, tal como se muestra en las curvas de la Figura 8.26. De aquí que se recomiende instalar los paneles en zonas bien aireadas, o bien compensar este factor instalando paneles con un mayor número de células.

© Ediciones Paraninfo

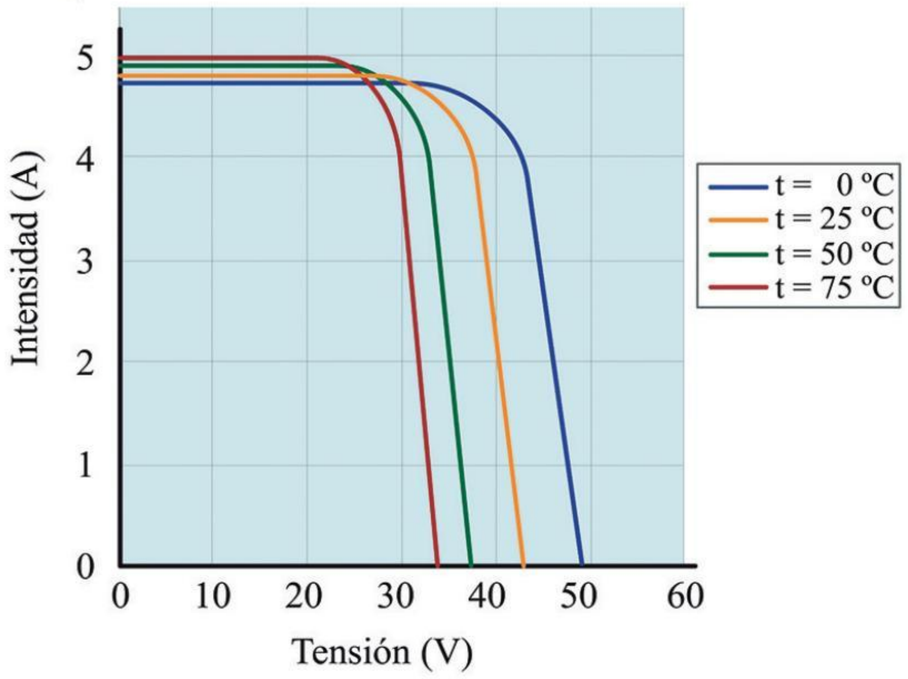


Figura 8.26. Curva tensión e intensidad en función de la temperatura.

8.6.2. Tipos de paneles fotovoltaicos

- **Silicio puro monocristalino:** se componen de secciones de una barra de silicio perfectamente cristalizado en una sola pieza. El rendimiento de estos paneles está en torno al 16 %, alcanzándose en el laboratorio rendimientos máximos del 24,7 %.

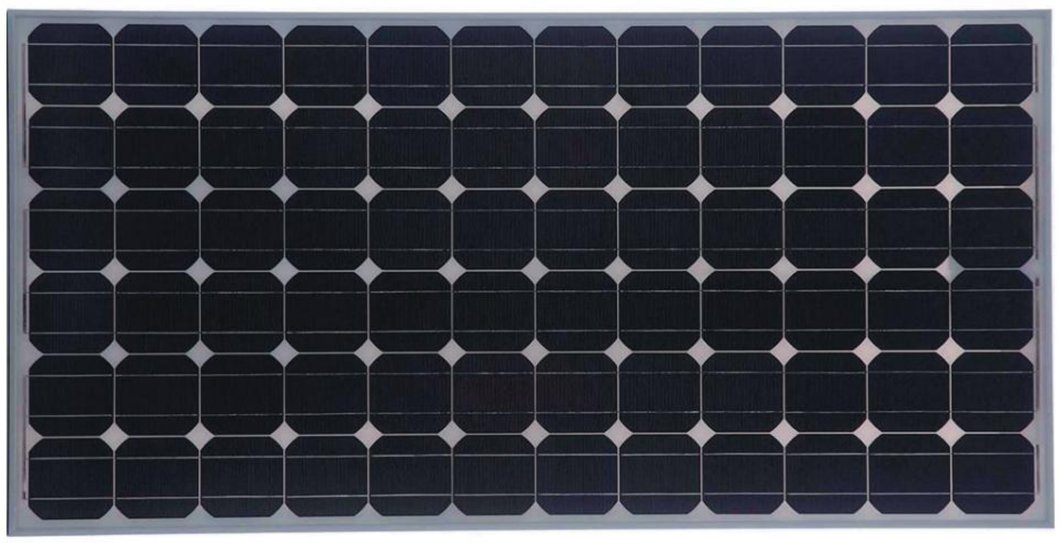


Figura 8.27. Panel solar monocristalino.

- **Silicio puro policristalino:** se basan en secciones de una barra de silicio que se ha estructurado desordenadamente en forma de pequeños cristales. Se reconocen fácilmente por presentar su superficie un aspecto granulado. Se obtiene con ellos un rendimiento más bajo que con los monocristalinos (en torno al 14 %, alcanzándose en el laboratorio rendimientos máximos del 19,8 %) pero a un precio también más bajo.

  Debido a la tecnología de fabricación de los paneles monocristalinos y policristalinos, estos suelen ser de gran grosor. El uso de otros materiales semiconductores para la elaboración de las células hace posible la fabricación de paneles más finos que son capaces de adaptarse a superficies irregulares. A estos se les conoce como paneles de lámina delgada, como los que se describen a continuación.

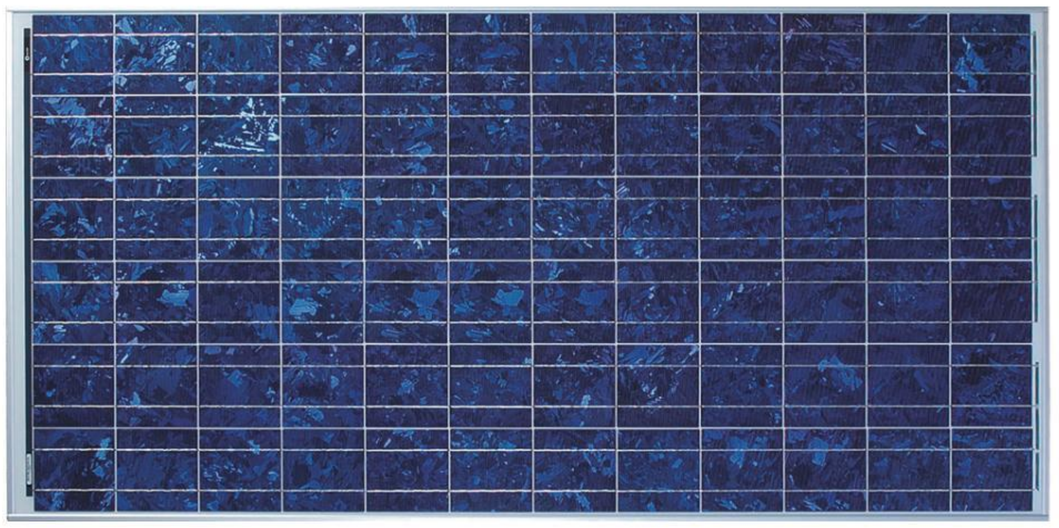


Figura 8.28. Panel solar policristalino.

- **Silicio amorfo (TFS):** las células son también de silicio pero se constituyen sin estructura cristalina alguna. Estos paneles son finos y flexibles y son habitualmente utilizados en pequeños dispositivos electrónicos (calculadoras, relojes) y en pequeños paneles portátiles. Su rendimiento está en torno al 18 %, alcanzándose en el laboratorio rendimientos del 13 %.

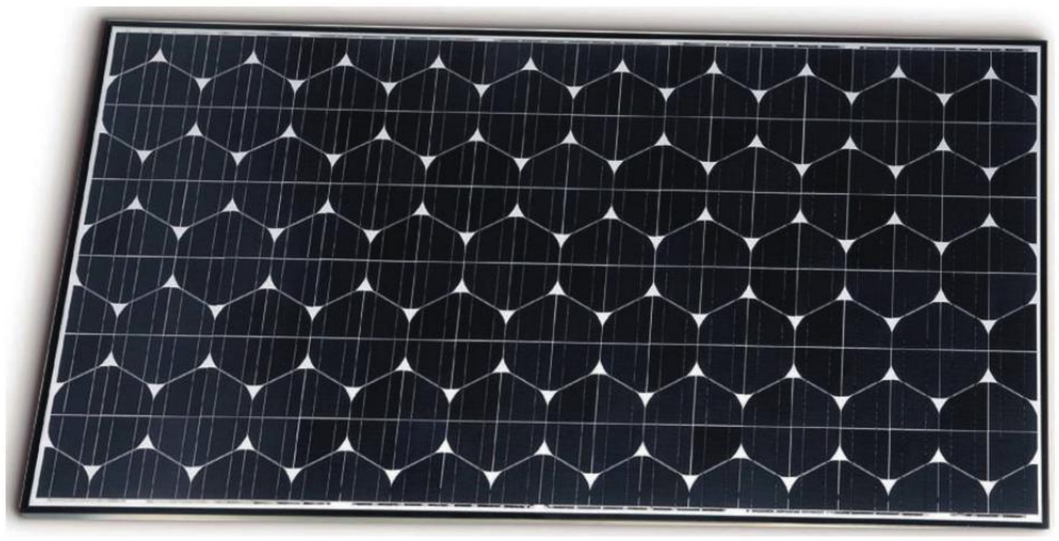


Figura 8.29. Panel solar amorfo.

- **Teluro de cadmio:** rendimiento en laboratorio del 16 % y en módulos comerciales del 8 %.
- **Diseleniuro de cobre en indio:** rendimientos en laboratorio próximos al 17 % y en módulos comerciales del 9 %.
- **Arseniuro de galio:** uno de los materiales más eficientes que presenta un rendimiento en laboratorio del 28 % y del 20 % en los comerciales.
- **Paneles Tándem:** combinan dos tipos de materiales semiconductores distintos. Dado que cada tipo de semiconductor es capaz de sacar el máximo rendimiento en una parte del espectro electromagnético de la radiación luminosa, mediante la combinación de dos o más tipos de semiconductores es posible aumentar el rendimiento de las células fotovoltaicas. Con este tipo de paneles se están consiguiendo rendimientos por encima del 35 %, pudiéndose alcanzar teóricamente rendimientos del 50 % con uniones de tres materiales.

© Ediciones Paraninfo

- **Paneles de cobre, indio, galio y selenio (CIGS):** nueva tecnología que está llamada a revolucionar el mundo de la energía solar fotovoltaica. Se trata de un nuevo tipo de panel solar muy fino, muy barato de producir y que presenta el mayor nivel de eficiencia de todos los materiales. Este nuevo tipo de panel podría llegar en un futuro no muy lejano, debido a su competitiva relación producción de energía/coste, a sustituir a los combustibles fósiles en la producción de energía.



Figura 8.30. Paneles CIGS.

Las instalaciones de generación de energía eléctrica fotovoltaica se pueden clasificar en dos tipos claramente diferenciados:

- Instalaciones aisladas de la red eléctrica.
- Instalaciones conectadas a la red eléctrica.

8.6.3. Instalaciones aisladas de la red eléctrica

Hasta no hace mucho tiempo, la energía fotovoltaica se aprovechaba para el suministro autónomo de energía eléctrica en lugares donde no era rentable la instalación de líneas eléctricas. Hoy en día su uso se ha ido extendiendo hasta llegar a las instalaciones fotovoltaicas en conexión con la red eléctrica, que funcionan como auténticas centrales eléctricas produciendo y vendiendo energía para todo el país.

La generación de energía fotovoltaica autónoma tiene muchísimas aplicaciones, en sectores como:

- Electrificación de viviendas alejadas de la red eléctrica.
- Suministro de agua a poblaciones.
- Bombeo de agua/riegos.
- Naves ganaderas.
- Pastores eléctricos.
- Telecomunicaciones: repetidores de señal, telefonía móvil y rural.
- Tratamiento de aguas: desalinización, cloración.
- Señalizaciones (marítima, ferroviaria, terrestre y aérea) y alumbrado público.
- Sistemas de telecontrol vía satélite, detección de incendios.

Una instalación básica de generación autónoma de energía solar fotovoltaica puede estar compuesta por los siguientes dispositivos:

- **Módulo fotovoltaico:** conjunto de paneles fotovoltaicos que captan energía luminosa y la transforman en corriente continua a baja tensión.
- **Batería de acumuladores:** almacena la energía eléctrica excedente producida por los paneles fotovoltaicos, para posteriormente ser usada en situaciones de menor o nula irradiación solar como las que se dan en el periodo nocturno. Las baterías se pueden conectar en serie o en paralelo dependiendo de las necesidades de tensión y capacidad de la instalación.
- **Regulador de carga:** es un equipo electrónico que regula la carga de la batería y su descarga a través de los receptores a alimentar. Evita las sobrecargas o descargas excesivas de la batería de acumuladores y asegura que los equipos operen en todo momento en el punto de máxima eficacia. Las características eléctricas que hay que tener en cuenta a la hora de dimensionar un regulador son su tensión nominal y la intensidad máxima de carga y de consumo que es capaz de regular. Así, por ejemplo, en una gama comercial nos podemos encontrar con reguladores para tensiones de 12, 24 y 48 V y para intensidades de 7, 11, 15 y 20 A.
- **Inversor** (opcional): dado que la energía disponible para ser utilizada es en forma de corriente continua, en el caso de desear utilizar receptores estándar a 230 V de C.A. a 50 Hz en la instalación es necesario el empleo de un inversor. Este es un equipo electrónico que convierte la corriente continua en alterna. Las características típicas de un inversor son: la tensión de entrada, que se deberá adaptar a la tensión de salida del equipo de generación, la potencia máxima que puede convertir y su rendimiento. Este último aspecto es de vital importancia para no tener que aumentar de forma innecesaria el número de paneles fotovoltaicos.

Seguidamente se muestran los dos tipos de suministros que se pueden realizar según sea el tipo de corriente de los receptores a utilizar:

- **Alimentación de receptores de corriente continua:** en esta instalación no se requiere el uso del inversor, sin embargo es necesario adquirir receptores que se

© Ediciones Paraninfo

puedan alimentar en corriente continua (iluminación, electrodomésticos especiales, etc.). En la Figura 8.31 se muestra el esquema de la instalación.

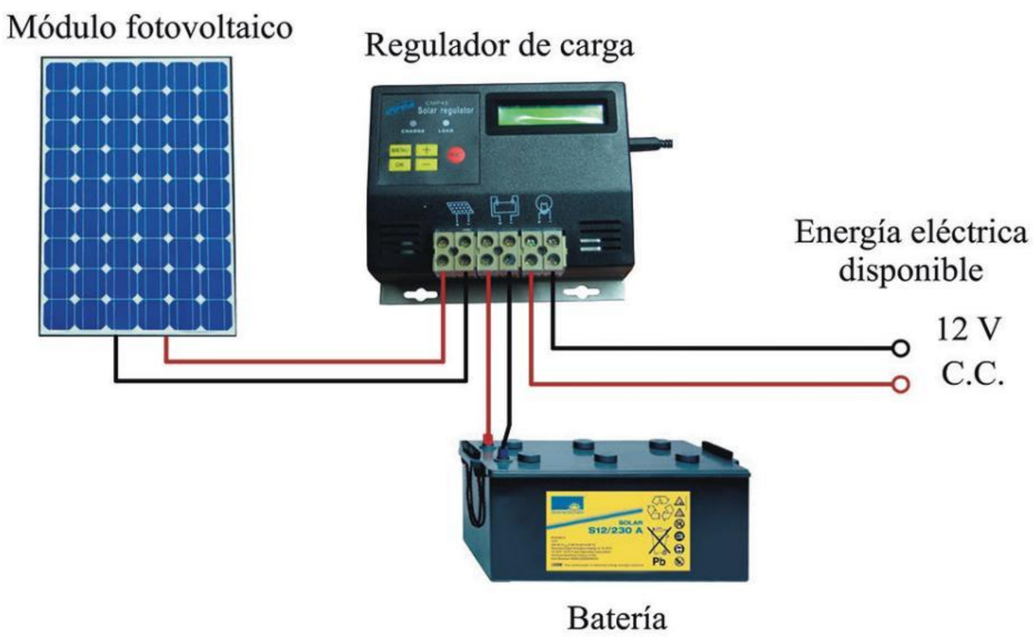


Figura 8.31. Instalación autónoma fotovoltaica con suministro de corriente continua.

- **Alimentación de receptores de corriente alterna:** en esta instalación se convierte la corriente continua en alterna mediante un inversor. De esta forma, se pueden utilizar receptores de corriente alterna a 230 V como en cualquier otra instalación de la red (Figura 8.32).



Figura 8.32. Instalación autónoma fotovoltaica con suministro de corriente alterna.

8.6.4. Instalaciones conectadas a la red eléctrica

Estos sistemas de producción de energía eléctrica están teniendo hoy en día una gran aceptación por parte de particulares y empresas. Consiste en inyectar la energía producida por nuestra instalación fotovoltaica a la red de distribución eléctrica a través de un inversor. Existe todo un marco legal regulador que hace posible que cualquier usuario pueda vender energía producida a las compañías eléctricas.

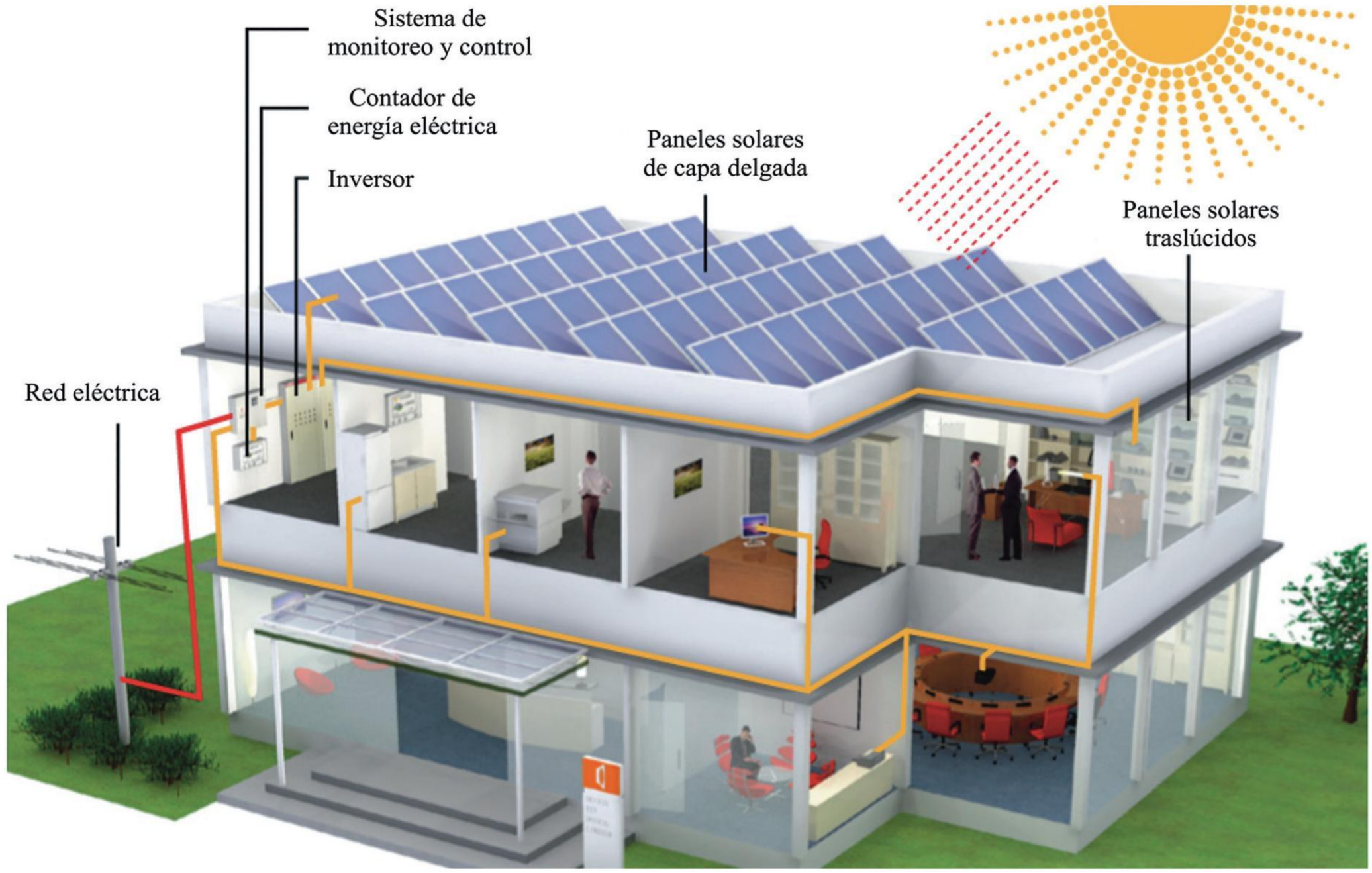


Figura 8.33. Instalación solar fotovoltaica conectada a red. (Cortesía de DuPont.)

© Ediciones Paraninfo

A diferencia del sistema fotovoltaico autónomo, las instalaciones conectadas a red no requieren del uso de los sistemas de acumulación formados por las baterías de acumuladores ni, por tanto, del regulador de carga. Sin embargo, se hace necesario el empleo de un inversor capaz de sincronizar la fase de la corriente alterna generada con la de la tensión de red (Figura 8.34).

A modo de ejemplo, en la Figura 8.33 se muestra una instalación solar fotovoltaica conectada a la red.



Figura 8.34. Instalación fotovoltaica conectada a la red eléctrica.

8.6.5. Autoconsumo fotovoltaico

El autoconsumo es un concepto que cada vez tiene más aceptación, se trata de que el usuario produzca su propia energía eléctrica para su consumo en su vivienda o en cualquier actividad comercial. En el caso que nos ocupa, el autoconsumo fotovoltaico solar, la energía eléctrica se genera con la instalación de placas fotovoltaicas orientadas a la luz solar.

Este sistema se está popularizando en España, gracias a que recibe unos 300 días de sol anuales con una alta irradiación solar.

Dado que España apuesta por disponer de una energía más limpia, y como parte de la transición energética, el autoconsumo es una de las bases para conseguirlo. Para apoyar el autoconsumo por parte de las Administraciones Públicas, es posible contar con las siguientes subvenciones:

- Bonificaciones del IBI (Impuesto sobre Bienes Inmuebles).
- Bonificaciones del ICIO (Impuesto sobre Construcciones, Instalaciones y Obras).
- Deducciones del IRPF.
- Ayudas autonómicas y municipales.
- Ayudas estatales.

Las instalaciones de sistemas fotovoltaicos de autoconsumo deben cumplir con el REBT y, en particular, la instrucción técnica ITC-BT-40 (Instalaciones generadoras de baja tensión).

Además, en la publicación del Real Decreto 244/2019, se regulan las condiciones administrativas, técnicas y económicas del autoconsumo de energía eléctrica. Según esta normativa, se distinguen las siguientes modalidades:

- **Modalidades de suministro con autoconsumo sin excedentes:** cuando los dispositivos físicos instalados impidan la inyección alguna de energía excedentaria a la red de transporte o distribución.
- **Modalidad de suministro con autoconsumo con excedentes:** cuando las instalaciones de generación puedan, además de suministrar energía para autoconsumo, inyectar energía en las redes de transporte y distribución.

Según la ubicación donde se instale el sistema y de si este va a estar conectado a la red eléctrica o no, existen varios tipos de autoconsumo fotovoltaico:

- **Autoconsumo residencial conectado a la red:** la instalación se puede conectar, tanto al sistema eléctrico de la vivienda, como a la red de distribución de la compañía eléctrica. Este sistema garantiza totalmente las necesidades de energía de la residencia, ya que en caso de que el sistema generador fotovoltaico no sea capaz de suministrar la energía requerida, será la red eléctrica la que lo haga. En el caso de que la energía producida sea superior a la consumida, se obtiene un excedente que se inyecta a la red eléctrica, por la que se obtiene una compensación económica.
- **Autoconsumo residencial aislado:** la instalación está aislada de la red de distribución, y se requiere de baterías de almacenamiento de energía. En este tipo de instalación se corre el riesgo de no disponer de la suficiente energía eléctrica para abastecer las necesidad de la residencia en algún momento puntual.
- **Autoconsumo residencial compartido:** es cuando se conectan a la misma instalación varias viviendas o una comunidad de vecinos. En las comunidades de vecinos donde se instala un sistema de autoconsumo compartido, se suele emplear para alimentar las zonas comunes como los pasillos del edificio, garajes o motores para la piscina.
- **Autoconsumo industrial:** básicamente se diferencia del residencial en que el consumo de energía eléctrica va a ser mucho mayor, por lo que el tamaño de las instalaciones de autoconsumo serán mucho mayores.

© Ediciones Paraninfo

Comprobación práctica en el laboratorio

8.1. Construcción de una pila elemental con zumo de limón. Se trata de comprobar de forma práctica el funcionamiento de una pila elemental. Para ello utilizaremos como electrólito un ácido (zumo de limón) y dos electrodos metálicos (cobre y cinc).

La forma más sencilla de realizar este montaje es conseguir un pequeño recipiente de cinc donde se vierte el zumo de unos limones. Introducimos en el zumo una chapa de cobre, cuidando de que no llegue a tocar el fondo del recipiente de cinc. El recipiente de cinc actúa como electrodo negativo (cátodo) y la chapa de cobre, de electrodo positivo. Una vez hecho el montaje, comprueba con un voltímetro la tensión obtenida por esta pila elemental (Figura 8.35). Después conecta un diodo LED o una lamparita de linterna y comprueba si se enciende. Cortocircuita los terminales de la pila y, con un polímetro, averigua su corriente de cortocircuito y su resistencia interna.

Este mismo experimento se podría haber realizado introduciendo un par de electrodos de los metales mencionados en un limón entero al que previamente se le ha presionado para liberar internamente su zumo.

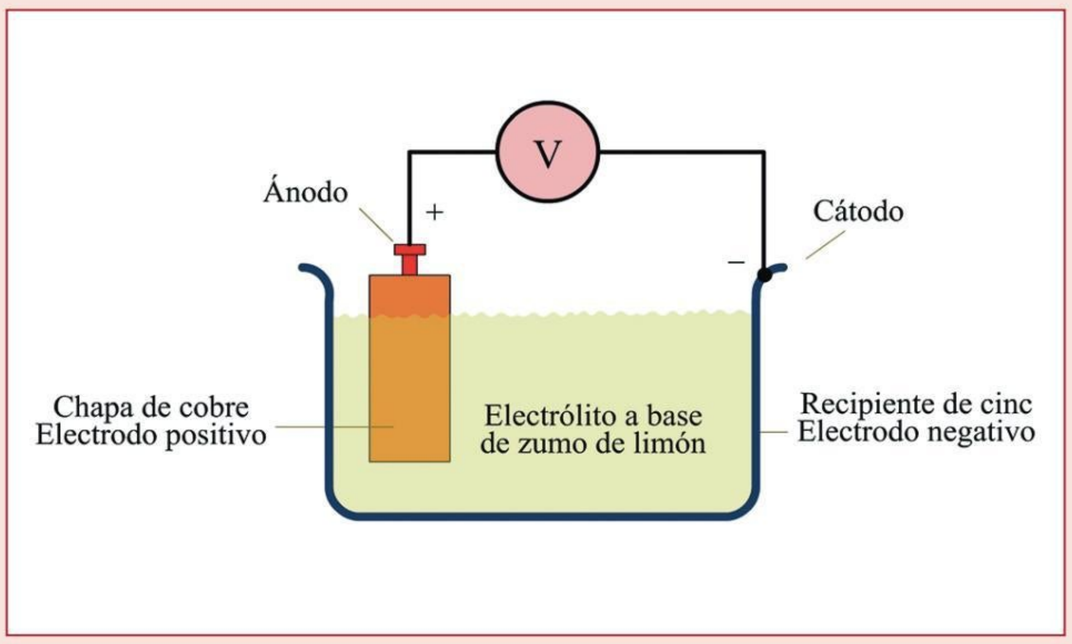


Figura 8.35.

8.2. Conexión de pilas y acumuladores en serie. Conecta un acumulador a una lámpara y mide la tensión y la corriente. Después mide con un voltímetro la f. e. m. del acumulador, para lo cual habrá que retirar la carga. Con los datos obtenidos en el ensayo, determina la resistencia interna, la caída de tensión, la potencia útil, total y perdida, así como el rendimiento del acumulador.

8.3. Conexión de pilas y acumuladores en paralelo. Conecta varios acumuladores o pilas en serie y comprueba mediante un voltímetro el aumento de tensión conseguido. Repite la misma operación conectando las pilas o acumuladores en paralelo y suministrando energía a una lámpara, y comprueba cómo se reparte la corriente total entre cada uno de ellos.

8.4. Verificación de un panel fotovoltaico. Consigue un panel fotovoltaico y conéctalo a un receptor eléctrico, por ejemplo una pequeña lámpara incandescente de similares características eléctricas que el panel. Conecta también un voltímetro y un amperímetro y mide las magnitudes que se dan para diferentes niveles de radiación luminosa y temperaturas de operación del panel (Figura 8.36).

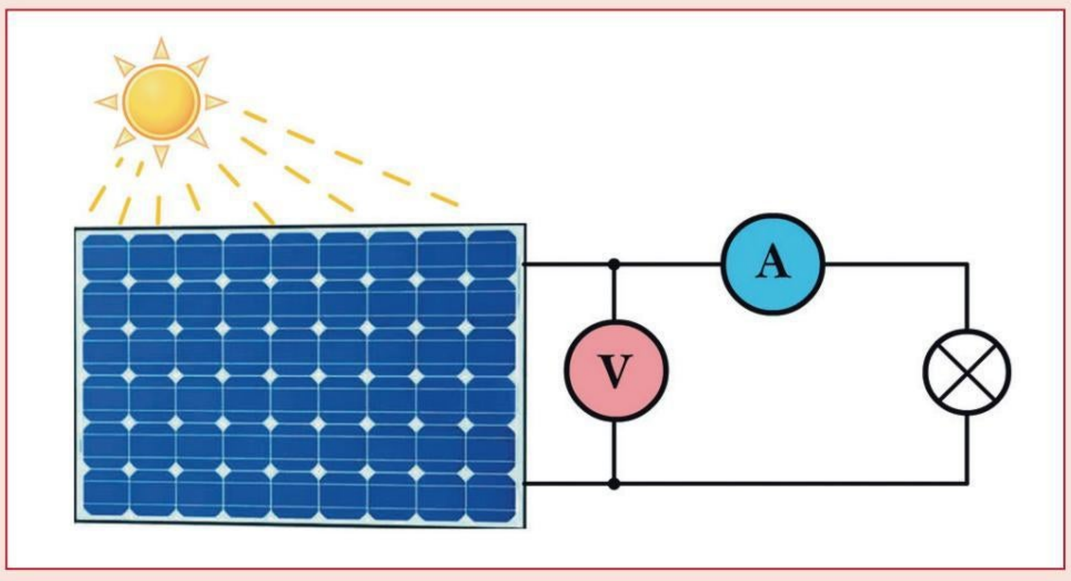


Figura 8.36.

© Ediciones Paraninfo

Actividades de comprobación

8.1. ¿Cómo se denomina a los electrodos de un proceso electrolítico?

a) Cátodo al positivo y ánodo al negativo.

b) Ánodo al positivo y cátodo al negativo.

8.2. Los recubrimientos galvánicos consisten en:

a) Disociar el agua mediante electrólisis.

b) Depositar un metal en un objeto conductor mediante electrólisis.

8.3. ¿Qué elementos fundamentales se necesitan para construir una pila eléctrica?

a) Dos electrodos de diferente naturaleza y un electrólito.

b) Dos electrodos de la misma naturaleza y un electrólito.

8.4. ¿Cómo se mide la f. e. m. de una pila?

a) Mediante un voltímetro de alta resistencia, haciendo la medida a la intensidad de régimen nominal.

b) Mediante un voltímetro de baja resistencia.

c) Mediante un voltímetro de alta resistencia interna conectado entre los electrodos de la pila y sin conectar carga alguna (régimen de funcionamiento en vacío).

8.5. ¿Qué diferencias fundamentales existen entre una pila y un acumulador?

a) Los acumuladores duran más que las pilas.

b) Las pilas son recargables y los acumuladores no.

c) Los acumuladores son recargables y las pilas no.

8.6. Una batería de acumuladores de plomo con una capacidad de 110 Ah alimenta un tubo fluorescente de 20 W. Si la tensión media en el proceso de descarga es de 12 V, determina el tiempo de descarga de la misma.

8.7. Se conectan en serie 10 generadores de C.C. de características iguales, siendo la f. e. m. de cada uno 2 voltios y su resistencia interna de 0,12 ohmios. Calcula:

a) Tensión en bornes en vacío.

b) Tensión y corriente si se conecta una carga de 8 ohmios.

c) Rendimiento eléctrico del conjunto de generadores para dicha carga.

d) Corriente de cortocircuito.

e) Tensión en bornes del conjunto cuando suministra una corriente de 2 amperios.

8.8. Resuelve las mismas cuestiones planteadas en la actividad anterior si en vez de conectar los generadores en serie los acoplamos en paralelo.

8.9. Una batería de acumuladores está formada por 10 elementos conectados en serie de 2,5 V y 0,015 Ω. Se conecta un receptor entre sus extremos y se miden 17,5 V. Determina:

a) Intensidad; resistencia y potencia de la carga.

b) Potencia útil cedida por cada generador.

8.10. ¿Cuántos generadores de $E = 24$ V y $r = 0{,}2\ \Omega$ hay que conectar en serie para conseguir una tensión de 220 V en una resistencia de carga de 22 Ω?

a) 10 generadores.

b) 9 generadores.

c) No es posible la conexión.

8.11. ¿Cuántos generadores con las mismas características que en la actividad anterior hay que conectar en paralelo para conseguir que la resistencia de carga de 0,22 Ω conectada a sus extremos trabaje a 22 V?

a) 5 generadores.

b) 10 generadores.

c) 4 generadores.

8.12. ¿Cuántos generadores de $E = 4{,}6$ V y $r = 0{,}1\ \Omega$ y cómo se tendrán que conectar para conseguir una tensión a la salida de 9 V al suministrar 3 A a una carga?

a) Cuatro generadores conectados en circuito mixto: dos ramas en paralelo y cada una de ellas compuesta por dos generadores conectados en serie.

b) Dos generadores conectados en serie.

c) Seis generadores conectados en circuito mixto: tres ramas en paralelo y cada una de ellas compuesta por dos generadores conectados en serie.

8.13. ¿Qué tensión genera una célula fotovoltaica?

a) 12 V.

b) 24 V.

c) Entre 0,5 y 0,6 V.

8.14. ¿La irradiancia se mide en?

a) W/m^2.

b) lm/m^2.

c) W.

© Ediciones Paraninfo

8.15. ¿Qué magnitud eléctrica permanece más o menos constante en un panel fotovoltaico para diferentes niveles de irradiancia?

a) Potencia.

b) Tensión.

c) Intensidad.

8.16. ¿Qué panel fotovoltaico es más fino y flexible?

a) Monocristalino.

b) Policristalino.

c) Amorfo.

8.17. ¿Qué dispositivo nos permite receptores a 230 V de C.A. en una instalación fotovoltaica?

a) Regulador de carga.

b) Inversor.

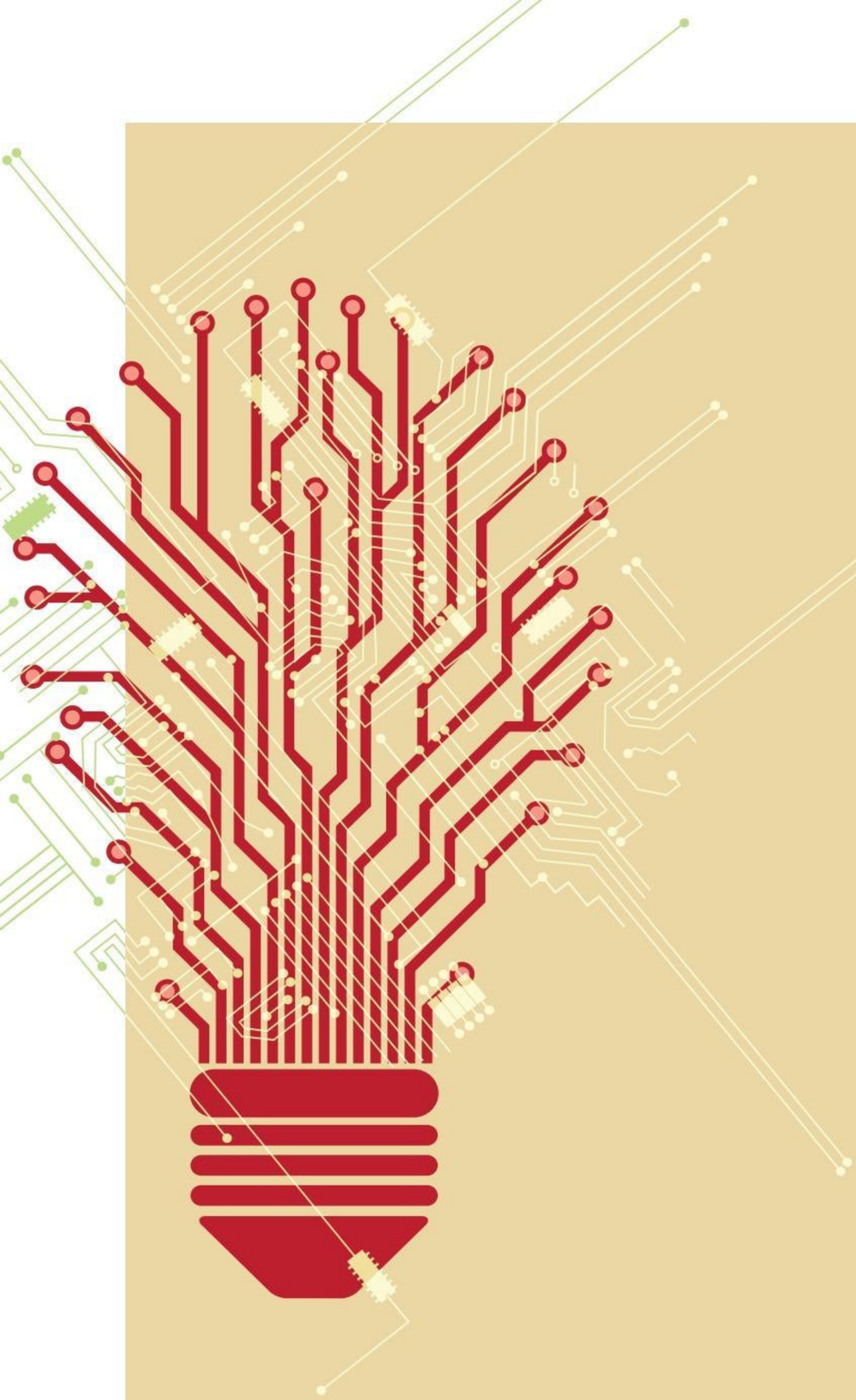
c) Alternador.

Actividades de ampliación



Con el fin de conseguir una mayor profundización en la materia, se han incluido los enunciados de una serie de ***«actividades de evaluación propuestas de ampliación (8)»*** para esta unidad que podrás encontrar dentro del MATERIAL WEB elaborado para este texto. Selecciona alguna de estas actividades y encuentra su solución.

© Ediciones Paraninfo



9 Los condensadores

Contenidos

- **9.1.** Funcionamiento de un condensador
- **9.2.** Capacidad de un condensador
- **9.3.** Carga de un condensador
- **9.4.** Descarga de un condensador
- **9.5.** Constante de tiempo de carga y descarga de un condensador
- **9.6.** Especificaciones técnicas de los condensadores
- **9.7.** Tipos de condensadores
- **9.8.** Identificación de los valores de los condensadores
- **9.9.** Asociación de condensadores

El condensador es un dispositivo muy utilizado en la electricidad, sobre todo en aplicaciones de circuitos electrónicos. Pero ¿qué función cumple el condensador en un circuito? Se puede decir que un condensador es un elemento capaz de almacenar pequeñas cantidades de energía eléctrica para devolverla cuando sea necesaria.

Objetivos

- Describir el funcionamiento y la función de los condensadores.
- Evaluar los procesos de carga y descarga de un condensador.
- Seleccionar adecuadamente las magnitudes de un condensador.
- Reconocer los tipos de condensadores.
- Calcular la capacidad equivalente al asociar condensadores en serie y en paralelo.

9.1. Funcionamiento de un condensador

Si conectamos un condensador electrolítico de alta capacidad, como por ejemplo 4.700 µF (microfaradios), a una pila de 9 V, este se cargará de electricidad, casi de forma inmediata. Esto lo podremos comprobar al conectar un voltímetro entre los extremos del condensador cargado, que nos indicará que se ha cargado con la misma tensión de la pila (9 V). Si ahora conectásemos un diodo LED a los terminales del condensador cargado, se podría observar que el diodo se ilumina durante el pequeño tiempo que dure la descarga de dicho condensador (Figura 9.1).

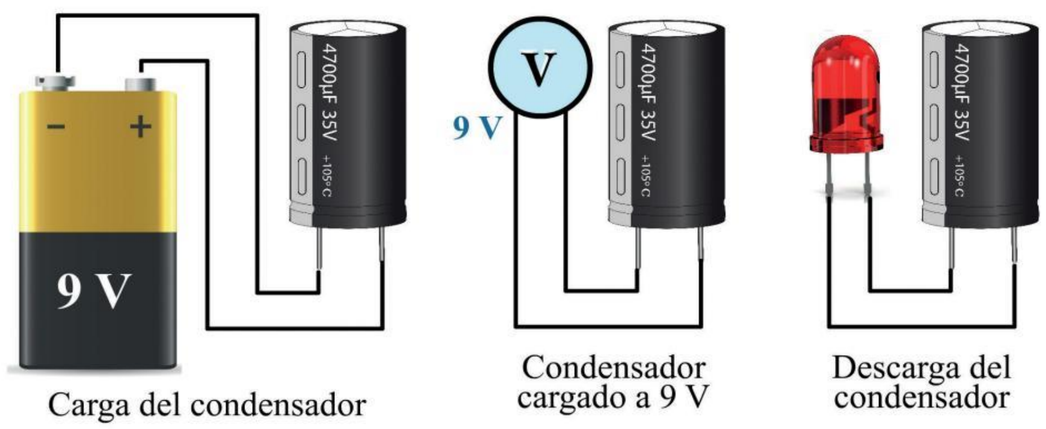


Figura 9.1. Carga y descarga de un condensador.

Así, podríamos decir que un condensador es un componente que es capaz de almacenar una pequeña carga eléctrica, que posteriormente puede devolver. Además, es importante observar que la tensión a la que se carga el condensador siempre coincide con la fuente de tensión a la que se haya conectado. Así, por ejemplo, si una vez cargado el condensador de la Figura 9.1, se le conectase a una batería de 24 V, este aumentaría su carga hasta alcanzar esa misma tensión.

Para construir un condensador basta con montar dos placas metálicas conductoras separadas por un material aislante, denominado dieléctrico, como aire, papel, cerámica, mica, plástico, etc. (Figura 9.2).

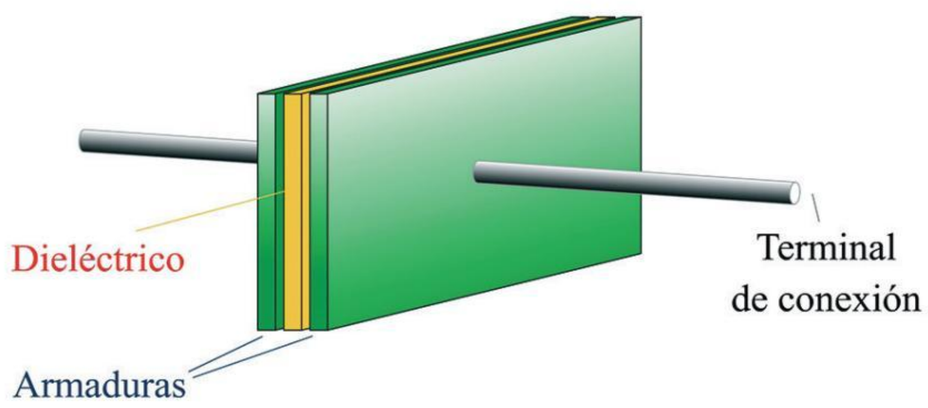


Figura 9.2. Constitución de un condensador.

Normalmente, este dieléctrico se dispone en forma de lámina muy fina para conseguir que las placas metálicas, denominadas armaduras, se encuentren lo más próximas unas de otras.

El condensador se carga de electricidad, según los siguientes fundamentos. Si conectamos las armaduras de un condensador como se indica en el circuito de la Figura 9.3, los electrones en exceso del polo negativo de la pila se dirigirán a la armadura A, cargándola negativamente. A su vez, en la parte interna de la armadura B se producirá una acumulación de cargas positivas por inducción electrostática (recuerda que las placas están muy próximas y, que por tanto, existe una gran atracción entre las cargas eléctricas de ambas armaduras debido a la acción del campo eléctrico). Por otro lado, la carga negativa acumulada en la parte externa de la armadura B es atraída por el polo positivo de la pila, lo que completa la carga del condensador. Una vez que esto suceda, ya no habrá más movimiento de electrones, a no ser que se aumente la tensión de la pila.

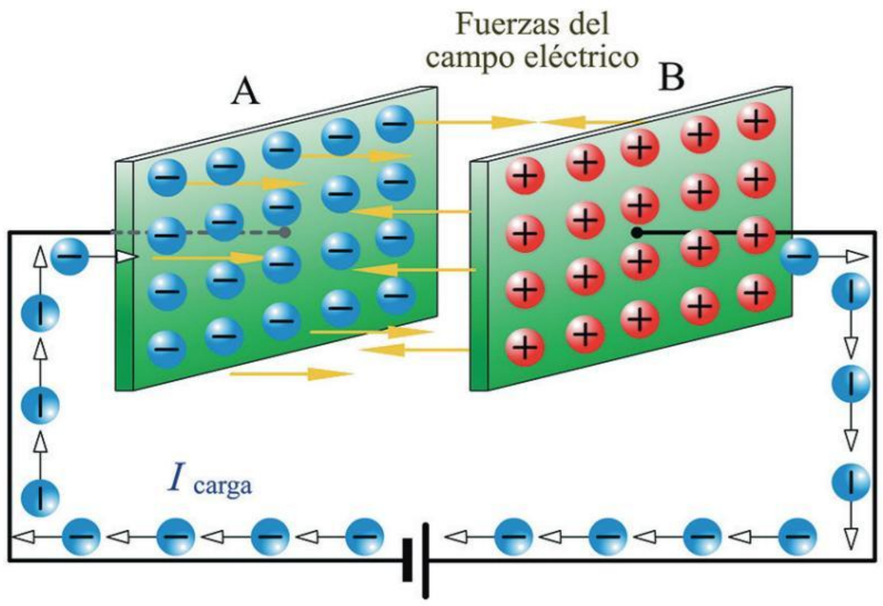


Figura 9.3. Carga de un condensador.

Una vez cargado el condensador, si se lo desconecta de la fuente de energía eléctrica, la acumulación de cargas se mantiene gracias a que sigue existiendo la fuerza de atracción entre las armaduras cargadas debido a la diferencia de cargas (Figura. 9.4).

¿Qué ocurriría si una vez cargado el condensador aplicásemos a este una tensión mayor? Al aumentar la tensión aplicada, aumentan las fuerzas de atracción entre las cargas de las armaduras, y por tanto aparece una nueva corriente, que carga el condensador hasta alcanzar la nueva tensión aplicada.

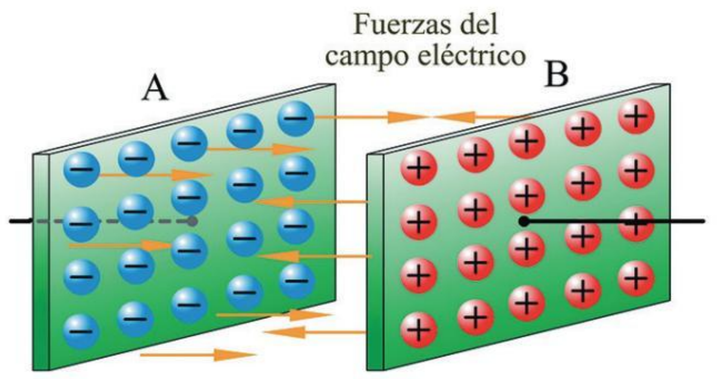


Figura 9.4. Condensador cargado.

¿Qué ocurre si conectamos un condensador en serie en un circuito de corriente continua? Solo existe corriente

© Ediciones Paraninfo

eléctrica mientras se carga el condensador, por lo que una vez que se termina la carga se interrumpe el circuito. Por tanto, se puede decir que un condensador no deja pasar la corriente continua.

¿Qué ocurre si conectamos un condensador en serie en un circuito de corriente alterna? El condensador se carga mientras aumenta la tensión entre sus placas, y se descarga cuando la tensión acumulada es superior a la aplicada. Con lo cual en C.A. el condensador se carga y descarga en cada mitad del ciclo, haciendo fluir corriente por el circuito en todo momento. En conclusión, un condensador sí permite el paso de la corriente alterna, aunque, como ya estudiaremos más adelante, se produce una distorsión o desfase en el tiempo entre la tensión y la corriente.

9.2. Capacidad de un condensador

Se denomina capacidad de un condensador a la propiedad que este posee de almacenar mayor o menor cantidad de electricidad.

La cantidad de cargas que puede almacenar un condensador depende, fundamentalmente, de la tensión aplicada entre sus armaduras y de sus características constructivas.

Para entender mejor esto vamos a comparar la capacidad de almacenar cargas de un condensador con la capacidad de almacenar aire de un globo.

Para que el aire entre en un globo es necesario insuflarlo con una cierta presión, de tal forma que, según aumentemos dicha presión, mayor será la cantidad de aire que conseguiremos almacenar en dicho globo (Figura 9.5).

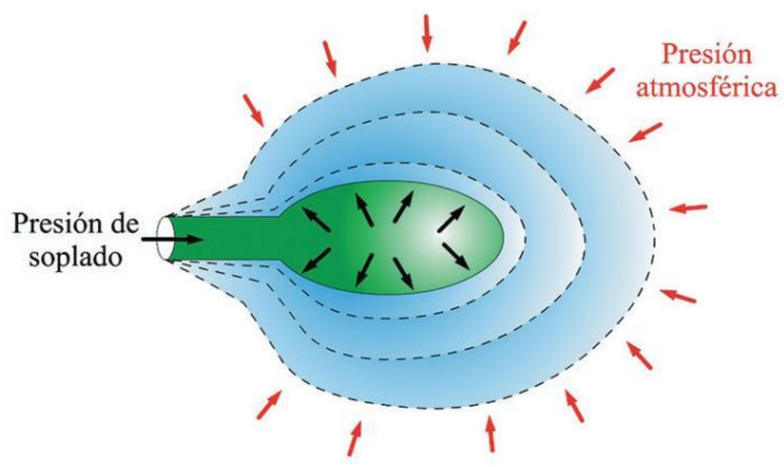


Figura 9.5. Comparación entre el llenado de un globo y la carga de un condensador.

En conclusión, la cantidad de aire que es posible introducir en un globo depende del tamaño del globo y de la presión aplicada a este. Por supuesto, si la presión aplicada fuese superior a la que pueden soportar las paredes elásticas del globo, este estallaría en pedazos.

Si ahora comparamos el concepto de presión aplicado al globo con el de tensión aplicado a las armaduras de un condensador, resultará que la cantidad de cargas almacenadas por un condensador será mayor al aumentar dicha tensión. Debe tenerse en cuenta que las cargas fluyen a las armaduras debido a la diferencia de cargas o tensión que le proporciona la pila o el generador.

Por otro lado, cuanto mayor sea la superficie del dieléctrico, menor la distancia que separa las armaduras y mejor la calidad del aislante, mayor será la capacidad de almacenar cargas del condensador.

Si llamamos Q a la cantidad de carga almacenada por el condensador, C a la capacidad del condensador y U a la tensión entre las armaduras, resulta que:

$$Q = C \cdot U$$

Q = Culombios

C = Faradios

U = Voltios

La unidad de capacidad es el faradio (F). Se puede decir que un condensador posee la capacidad de un faradio cuando almacena una carga de un culombio al aplicar una tensión de un voltio entre sus placas.

El faradio es una unidad muy grande, por lo que se utilizan submúltiplos, correspondientes a su millonésima parte, milmillonésima parte y billonésima parte, que reciben los nombres de:

- **Microfaradio (μF)**

$$1\ \mu F = 1/1.000.000 = 0{,}000001 = 10^{-6}\ F$$

- **Nanofaradio (n*F*)**

$$1\ nF = 1/1.000.000.000 = 0{,}000000001 = 10^{-9}\ F$$

- **Picofaradio (p*F*)**

$$1\ pF = 1/1.000.000.000.000 = 0{,}000000000001 = 10^{-12}\ F$$

Actividad resuelta 9.1

Calcula la carga eléctrica almacenada por un condensador de 2.200 μF de capacidad cuando se lo conecta a una pila de 4,5 V.

Solución:

Lo primero que hacemos es cambiar las unidades:

$$\frac{2.200\ \mu F}{1.000.000} = 0{,}0022\ F$$

$$Q = C \cdot U = 0{,}0022 \cdot 4{,}5 = 0{,}0099 \text{ culombios}$$

© Ediciones Paraninfo

La capacidad de un condensador es mayor cuanto más grande sea la superficie de sus armaduras, ya que al aumentar la superficie de cargas enfrentadas aumenta la carga del condensador. Por otro lado, la capacidad es menor cuanto mayor sea la distancia que separa a las cargas, ya que estas se mantienen sujetas en las armaduras gracias a la atracción que se produce entre ellas por el efecto de las diferencias de cargas. Si la distancia entre estas fuera grande, apenas habría atracción y la capacidad disminuiría.

Por último, se ha comprobado que, según sea la sustancia aislante que se introduce entre las armaduras, la capacidad también varía. Este factor se mide con la constante dieléctrica de la sustancia que se utiliza como aislante.

La expresión matemática que relaciona la capacidad con sus características constructivas es:

$$C = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \frac{S}{d}$$

Como la constante dieléctrica del vacío es igual a:

$$\varepsilon_0 = 1/4 \cdot \pi \cdot 9 \cdot 10^9 \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$$

la expresión final podría quedar así:

$$C = \frac{\varepsilon_r}{4 \cdot \pi \cdot 9 \cdot 10^9} \cdot \frac{S}{d}$$

S = Superficie de las armaduras en m^2.

d = Espesor del dieléctrico en m.

ε_r = Constante dieléctrica de la sustancia aislante relativa al vacío.

ε_0 = Constante dieléctrica del vacío.

En la Tabla 9.1 aparecen reflejados los valores de la constante dieléctrica de los materiales más comunes.

Tabla 9.1. Constante dieléctrica de diferentes aislantes

Sustancia	ε	Sustancia	ε
Aire	1	Ebonita	2,5 a 3,2
Petróleo	2	Poliéster	3
Aceite mineral	2,2 a 2,4	Mica	3 a 6
Parafina	1,9 a 2,3	Porcelana	4,5 a 6
Papel	2 a 2,8	Vidrio	5 a 10
Madera	2 a 8	Baquelita	5,6 a 8,5

Actividad resuelta 9.2

Calcula la capacidad de un condensador si sus placas son de 0,1 m^2, la distancia entre placas de 0,3 mm y el dieléctrico es de: **a)** aire; **b)** poliéster.

Solución:

Para un dieléctrico de aire tenemos que:

$$C = \frac{\varepsilon_r}{4 \cdot \pi \cdot 9 \cdot 10^{-9}} \cdot \frac{S}{d} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot 9 \cdot 10^{-9}} \cdot \frac{0{,}1}{0{,}0003} =$$

$$= 2{,}95 \cdot 10^{-9} \text{ F} = 2{,}95 \text{ nF}$$

0,3 mm = 0,3/1.000 = 0,0003 m

Si utilizamos como dieléctrico el poliéster obtendremos una capacidad tres veces superior, ya que $\varepsilon_r = 3$.

9.3. Carga de un condensador

Con ayuda del circuito de la Figura 9.6 vamos a estudiar el proceso de carga y descarga de un condensador.

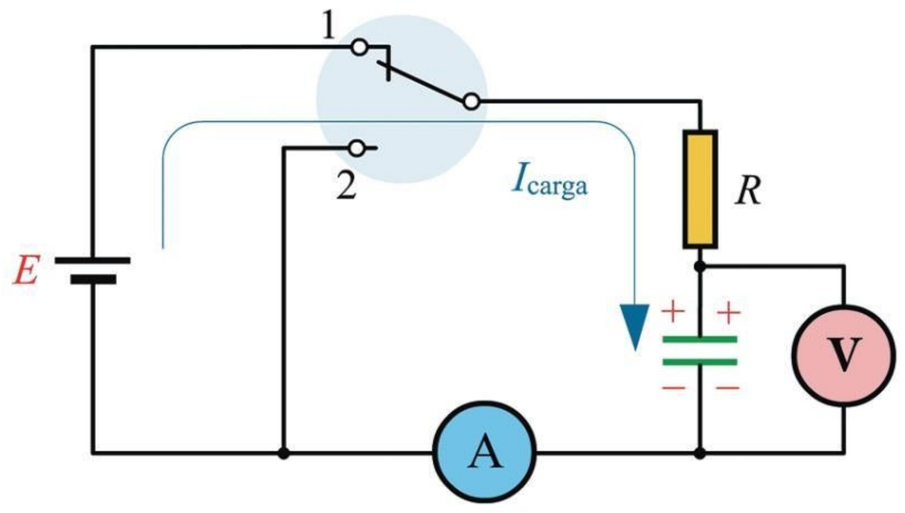


Figura 9.6. Ensayo para estudiar el proceso de carga de un condensador.

La resistencia R se ha conectado en serie con el circuito para retardar el proceso de carga (Figura 9.6). El amperímetro (A) nos indicará la intensidad de carga y el voltímetro (V) la tensión a que queda sometido el condensador en todo momento. Cuando el conmutador se posiciona en el punto (1) el condensador se pone en contacto con el generador y comienza su proceso de carga.

En el primer momento la diferencia de cargas que existe en el condensador es cero y, por tanto, al no haber nada que se oponga al establecimiento de la corriente, la intensidad que indicará el amperímetro en el primer momento de conexión será igual a:

$$i_{máx} = \frac{E}{R}$$

Según se va cargando el condensador la tensión de este irá creciendo, tal como lo podríamos comprobar con el vol-

© Ediciones Paraninfo

tímetro. En consecuencia, la diferencia de potencial que existe entre el generador y el condensador se hace más pequeña y, por consiguiente, se irá reduciendo la intensidad de carga. Cuando el condensador alcanza la misma tensión que el generador se completa el ciclo de carga y la intensidad de corriente queda interrumpida.

En las curvas de carga de la Figura 9.7 se puede apreciar claramente este proceso.

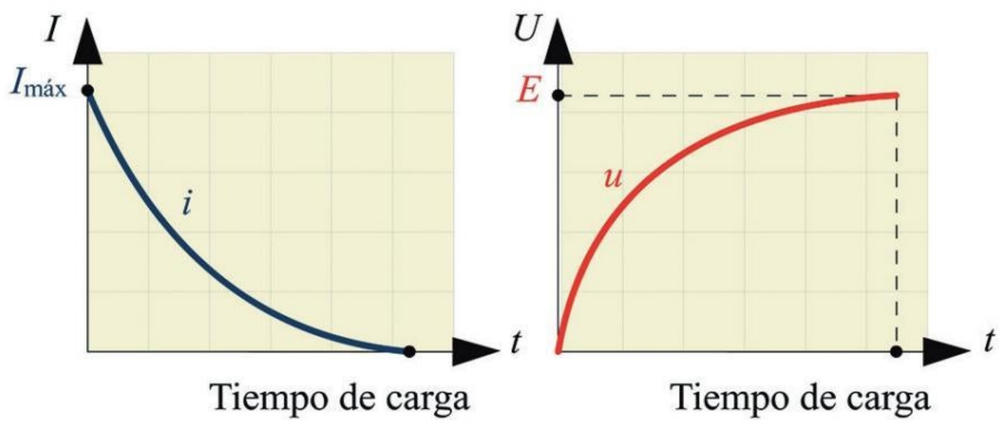


Figura 9.7. Curvas de carga de un condensador.

En conclusión, un condensador en C.C. solo deja pasar la corriente durante el corto periodo de tiempo que dura su carga. Al cabo de este tiempo actúa como un interruptor abierto.

9.4. Descarga de un condensador

Al cambiar de posición el conmutador (Figura 9.8), el condensador se descarga por la resistencia.

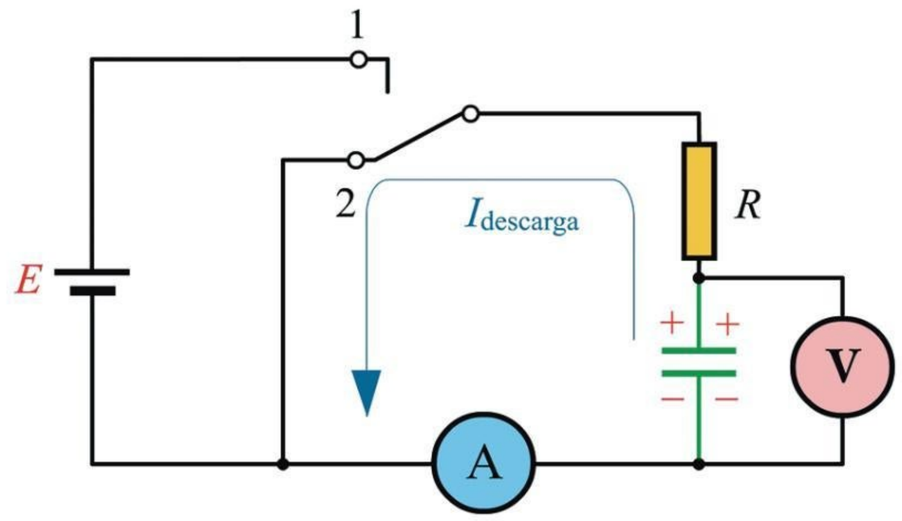


Figura 9.8. Proceso de descarga del condensador.

En un primer momento la intensidad es grande, ya que el condensador tiene toda la tensión (la misma que la del generador).

Según se va descargando el condensador, la tensión se va reduciendo y, con ella, la intensidad de la corriente.

Cuando el condensador se descarga totalmente la intensidad y la tensión se anulan, tal como se ha representado en las curvas de descarga de la Figura 9.9.

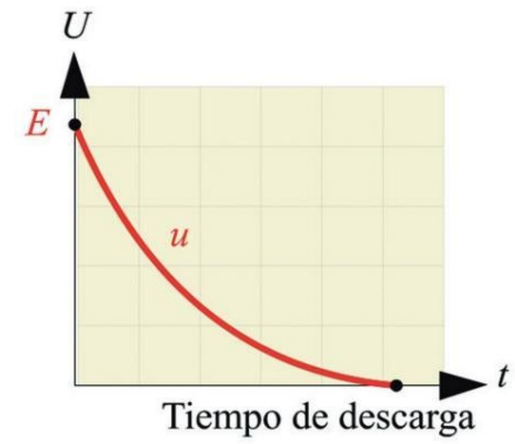


Figura 9.9. Curva de descarga de un condensador.

9.5. Constante de tiempo de carga y descarga de un condensador

Se conoce por constante de tiempo al tiempo que invierte el condensador en adquirir el 63 % de la carga total. La constante de tiempo de condensador es igual al producto $R \cdot C$.

Esta constante es igual de válida para calcular el tiempo de descarga de un condensador. En teoría, un condensador tardaría un tiempo infinito en cargarse o descargarse totalmente; en la práctica, se puede comprobar que transcurrido un tiempo igual a *cinco constantes de tiempo* se puede dar por terminado prácticamente el 100 % del proceso de carga o descarga del condensador.

Actividad resuelta 9.3

Determina la constante de tiempo del condensador del circuito de la Figura 9.10. Calcula también el tiempo de carga completa del condensador.

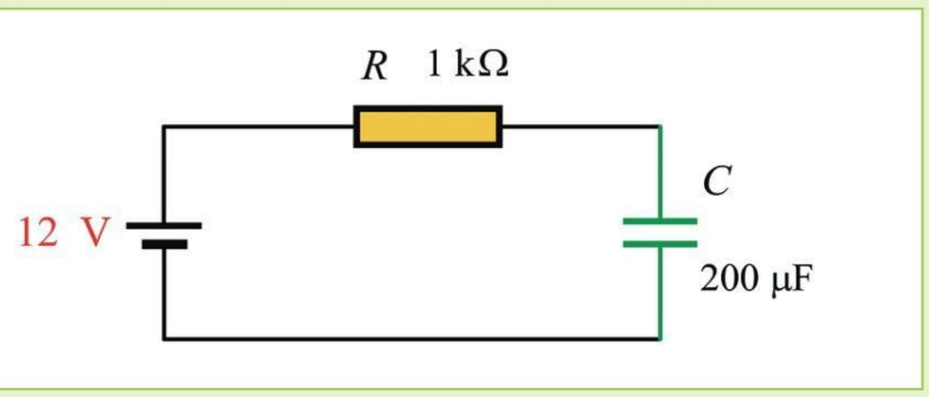


Figura 9.10.

Solución:

La constante de tiempo será igual a:

$$\tau = R \cdot C = 1.000 \cdot 200 \cdot 10^{-6} = 0{,}2 \text{ segundos}$$

El tiempo total de carga se dará para cinco constantes de tiempo:

$$t = 5 \cdot \tau = 5 \cdot 0{,}2 = 1 \text{ segundo}$$

© Ediciones Paraninfo

9.6. Especificaciones técnicas de los condensadores

Los condensadores, al igual que cualquier otro componente electrónico, vienen definidos por una serie de características. Estas siempre las podemos encontrar en las hojas de especificaciones que nos facilita el fabricante.

- **Capacidad nominal:** el valor de la capacidad de un condensador puede cambiar con la frecuencia de trabajo (Hz) y con la temperatura ambiente, por lo que los fabricantes facilitan la capacidad junto con estos últimos parámetros.

- **Tensión de perforación del dieléctrico o tensión pico (U_p):** ¿recuerdas cómo el globo descrito anteriormente estallaba en pedazos al aumentar la presión? De igual forma, si un condensador es sometido a una tensión excesiva, el dieléctrico no podrá soportarlo y se perforará. Téngase en cuenta que las armaduras están muy próximas y un aumento de la tensión produce, a su vez, un aumento de atracción entre las cargas de ambas armaduras.

  De aquí surge el concepto de **tensión de perforación,** que se define como la tensión máxima que es capaz de soportar un condensador sin que se destruya su dieléctrico.

- **Tensión de trabajo o nominal (U_n):** por supuesto, no es recomendable que la tensión a la que trabaja un condensador sea mayor que la de perforación. De aquí nace el concepto de **tensión de trabajo,** que se define como la tensión a la que puede funcionar un condensador de forma permanente sin sufrir daños. Esta tensión es la que se encuentra indicada en la superficie de los condensadores (véase un ejemplo en la Figura 9.11).

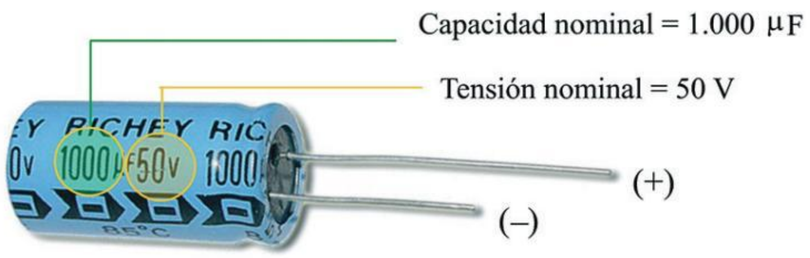


Figura 9.11. Características de un condensador electrolítico.

La tensión de trabajo de un condensador tiene una gran incidencia en las dimensiones de estos. Cuanta más tensión de trabajo posea el condensador, mayor tiene que ser el espesor del dieléctrico, lo que hace que haya que aumentar, en estos casos, la superficie de las placas para conseguir una capacidad considerable. De tal forma que podremos encontrar condensadores de baja tensión y elevada capacidad que presenten un tamaño similar al de otros de elevada tensión y pequeña capacidad.

- **Coeficiente de temperatura (T_C):** al igual que ocurría con las resistencias, la capacidad de un condensador puede variar con la temperatura. Este coeficiente puede ser positivo o negativo, aunque en la mayoría de los condensadores resulta negativo.

- **Tolerancia (%):** nos indica en tantos por ciento los valores en los que se encuentra la capacidad indicada por el fabricante. Las tolerancias más comunes son del 5, el 10 y el 20 % para todos los modelos de condensadores.

Por último, vamos a dar unos consejos para conseguir que los condensadores tengan una larga vida una vez conectados al circuito:

- Procurar que no queden expuestos a fuentes de calor (resistencias de mucha potencia, transformadores, etc.).

- Evitar dañar la envolvente del condensador, ya que de debilitarse su estanqueidad podría penetrar la humedad ambiente en el dieléctrico. Esto suele producir muchos fallos en los condensadores por perforación del dieléctrico. Dicha estanqueidad puede verse afectada simplemente al realizar una manipulación o soldadura incorrecta durante el montaje en la placa del circuito impreso.

- No someter al condensador a sobretensiones.

- No conviene almacenar los condensadores con carga.

- Para descargarlos, hacerlo siempre a través de una resistencia, evitando las descargas mediante cortocircuitos.

9.7. Tipos de condensadores

Existe una gran variedad de tipos de condensadores en el mercado, de los que conviene conocer sus principales características, con objeto de poder utilizarlos para la aplicación más idónea.

Al igual que las resistencias, existen condensadores variables a los que se les puede modificar su valor capacitivo. Estudiaremos aquí algunos de los condensadores fijos, que son los de más extendida aplicación.

9.7.1. Condensadores de papel impregnado

Se fabrican enrollando dos láminas delgadas de aluminio de unos 0,006 mm de espesor (armaduras), separadas por otras dos de un papel impregnado con cera o aceite (dieléctrico) (Figura 9.12). De esta forma se consigue aumentar la superficie de las armaduras sin aumentar excesivamente

© Ediciones Paraninfo

el tamaño del condensador. La tensión de trabajo depende del espesor del papel.

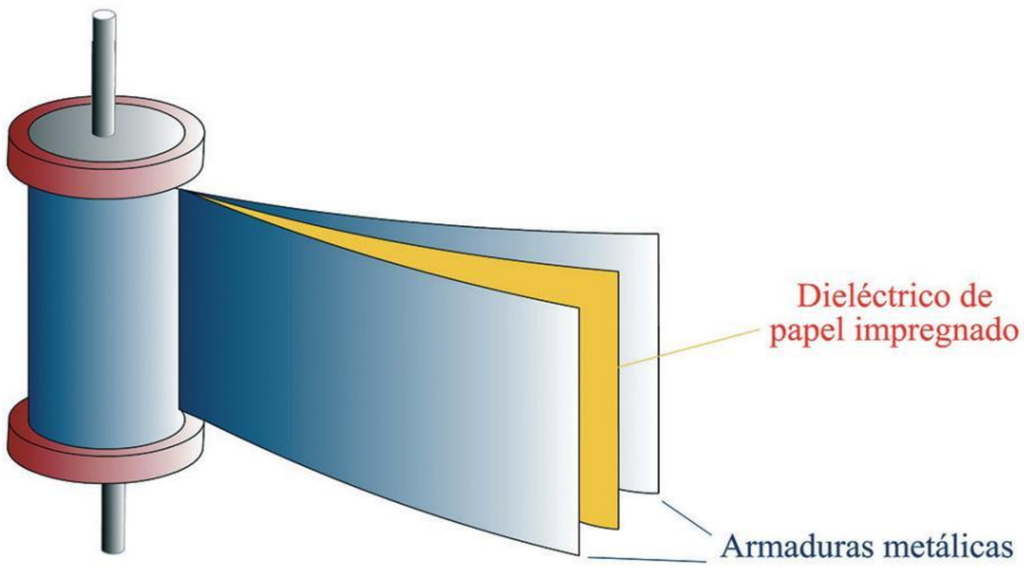


Figura 9.12. Condensador de papel impregnado.

9.7.2. Condensadores de papel metalizado

En este caso, el papel es metalizado con el fin de evitar que se formen vacíos entre las placas y el dieléctrico. De esta forma se consigue reducir su tamaño. Además poseen la propiedad de «autorregeneración» del dieléctrico después de sufrir una perforación de este. También se fabrica una versión similar de este condensador utilizando plástico en vez de papel, lo que da como resultado **condensadores de plástico metalizado (condensadores film o MK)**, que mejoran las características de los de papel (Figura 9.13).

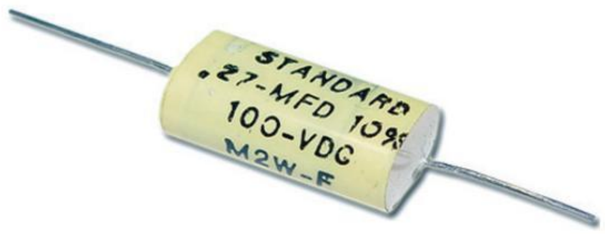


Figura 9.13. Condensador film (0,27 µF/100 V).

9.7.3. Condensadores de plástico

Actualmente son muy utilizados. Estos condensadores utilizan normalmente como dieléctrico el poliéster, policarbonatos, estiroflex, etc. Su utilización tiene la ventaja de conseguir capacidades relativamente elevadas a tensiones que lleguen hasta 1.000 V y capacidades desde un nanofaradio hasta algunos microfaradios (Figura 9.14).



Figura 9.14. Condensadores de plástico.

9.7.4. Condensadores cerámicos

Estos condensadores utilizan como dieléctrico compuestos cerámicos de una constante dieléctrica muy elevada. Con ellos se consiguen valores desde los pocos picofaradios hasta los 100 nF. Soportan poca tensión (Figura 9.15).



Figura 9.15. Condensadores cerámicos.

9.7.5. Condensadores de mica

Aprovechando la facilidad con la que se pueden fabricar láminas de mineral de mica de pequeño espesor uniforme, se pueden construir condensadores intercalando láminas de mica como dieléctrico y láminas de estaño o aluminio como placas. Se suelen emplear en circuitos de transmisión y recepción de radio (radiofrecuencia «RF»).

9.7.6. Condensadores electrolíticos de aluminio

Estos condensadores se diferencian bastante del resto por sus características constructivas. Están constituidos por una lámina de aluminio y otra de plomo sumergidas en una solución de cloruro de amonio (electrólito) (Figura 9.16).

Son condensadores con los que se consiguen capacidades elevadas en un volumen reducido (desde 1 µF hasta decenas de miles de microfaradios). Una de las características que diferencia a los condensadores electrolíticos de los demás es que tienen polaridad, es decir, no pueden invertirse las conexiones indicadas en la superficie del componente, ni, por tanto, aplicarse corriente alterna. En caso contrario, el condensador se perfora. En la actualidad se fabrican **condensadores electrolíticos de tántalo** que reducen el tamaño para la misma capacidad que uno de aluminio. Además, el electrólito suele ser seco (Figura 9.17).

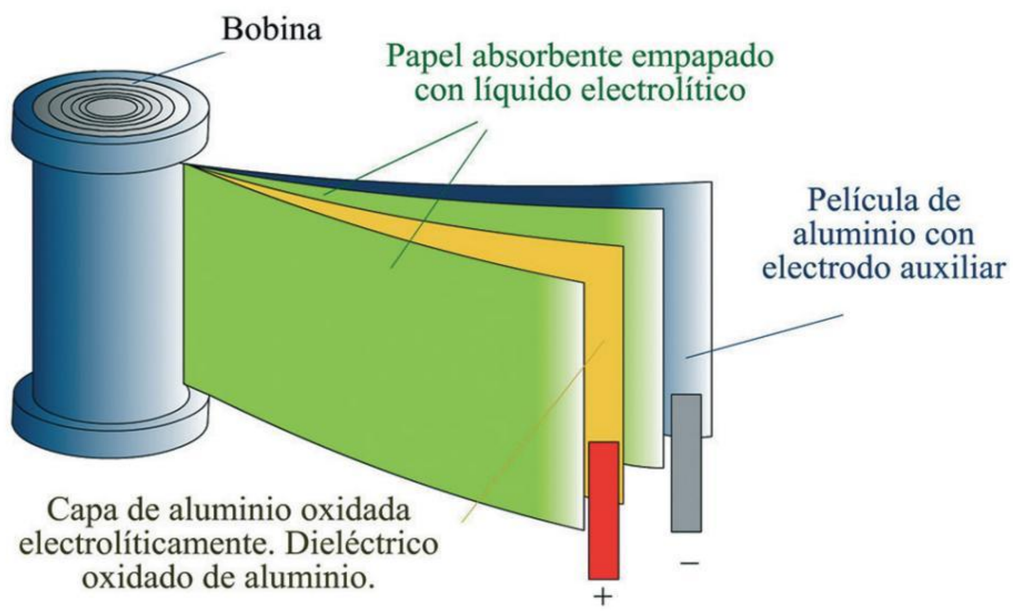
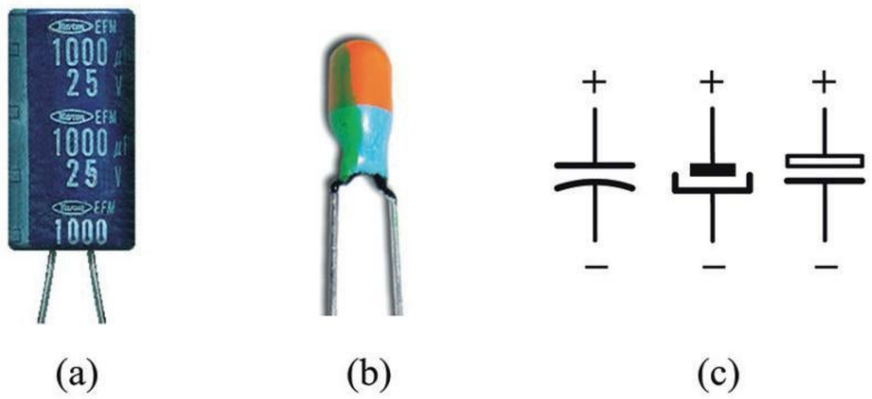


Figura 9.16. Condensador electrolítico seco.

© Ediciones Paraninfo



(a) (b) (c)

Figura 9.17. Condensadores electrolíticos: (a) de aluminio; (b) de tántalo; (c) símbolos.

9.8. Identificación de los valores de los condensadores

Por lo general, los valores de capacidad y tensión de trabajo aparecen inscritos en la superficie del condensador.

Cuando se trata de valores de capacidad con decimales no se marca la coma, sino que en su lugar se pone la letra *p* (pico) o *n* (nano). Así, por ejemplo, un condensador de 3,9 nF se puede identificar como 3*n*9 y uno de 0,56 pF como *p*56.

En otras ocasiones se marca solo la letra K, que significa mil picofaradios, es decir, 1 nF.

Por ejemplo, un condensador de 100 K se identifica como 100 nF.

Otra forma de identificación consiste en utilizar un código de colores similar al de las resistencias, pero incluyendo una banda de color adicional para marcar la tensión de trabajo. En la Tabla 9.2 se muestran los códigos de colores para condensadores en pF.

NOTA

Cuando en un condensador no se utiliza el código de colores, la tolerancia se suele indicar con un código de una letra tal como se indica en la Tabla 9.3.

Así, por ejemplo, si encontramos un condensador con la indicación 100 J, nos indicará una capacidad de 100 pF y una tolerancia del 5 %.

Seguidamente incluimos para los diferentes tipos de condensadores el significado de cada banda de color. La banda marcada con la letra F nos indica el coeficiente de temperatura del condensador.

Tabla 9.2. Código de colores para condensadores

Color	A–B Cifras significativas	C Multiplicador	D Tolerancia		E Tensión		
			C < 10 pF	C > 10 pF	Poliéster	Styroflex	Tántalo
Negro	0	× 1	± 1 pF	± 20 %		630 V	10 V
Marrón	1	× 10	± 0,1 pF	± 1 %			
Rojo	2	× 100	± 0,25 pF	± 2 %	250 V	160 V	4 V
Naranja	3	× 1.000		± 3 %			40 V
Amarillo	4	× 10.000			400 V	63 V	6,3 V
Verde	5	× 100.000	± 0,5 pF	± 5 %			18 V
Azul	6	× 1.000.000			630 V	25 V	
Violeta	7	× 10.000.000					
Gris	8	× 0,01					25 V
Blanco	9	× 0,1	± 1 pF	± 10 %			2,5 V

Tabla 9.3. Valor de la tolerancia

	Letra	A	B	D	F	G	H	J	K	M
Tolerancia	C < 10 pF ± pF	0,1	0,25	0,5	1	2	—	—	—	—
	C > 10 pF ± %	—	—	5,5	1	2	2,5	5	10	20

© Ediciones Paraninfo

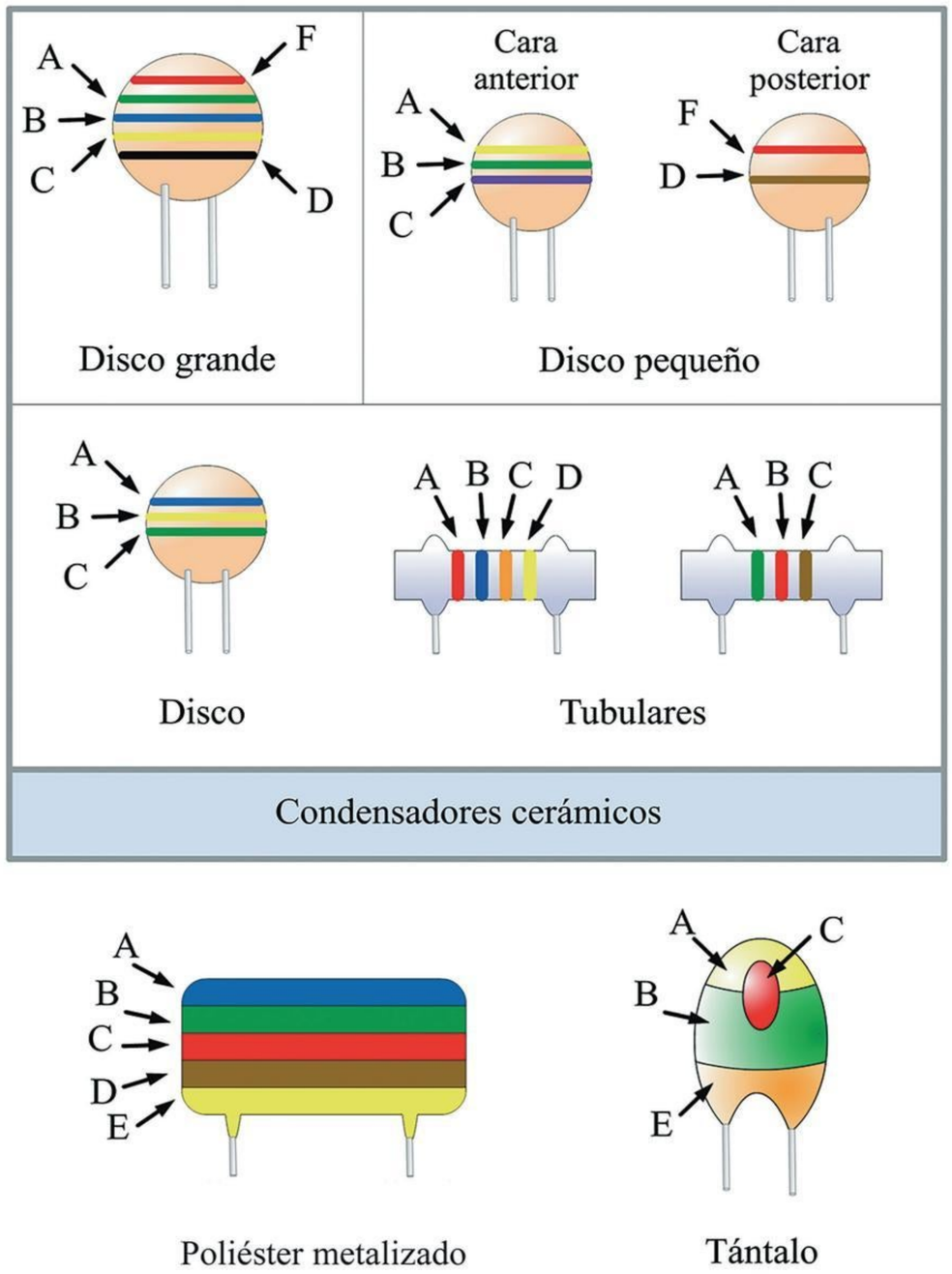


Figura 9.18. Códigos para diferentes tipos de condensadores.

Actividad resuelta 9.4

Determina las características del condensador de poliéster metalizado que aparece en la Figura 9.19.



Figura 9.19.

Solución:

Situamos las cifras que van asociadas a los colores en el orden en que estos aparecen inscritos.

(A) (B) (C) (D) (E)

Amarillo - Azul - Rojo - Blanco - Rojo

(4) (6) (×100) (±10%) (250 V)

$46 \cdot 100 = 4.600$ pF = 4,6 nF, ± 10%, 250 V

Actividad resuelta 9.5

¿Cuáles son las características del condensador de tántalo de la Figura 9.20?

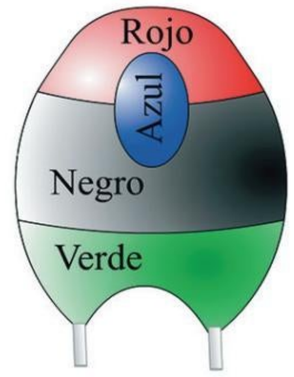


Figura 9.20.

Solución:

Seguimos la disposición de las cifras según la Figura 9.20.

(A) (B) (C)

Rojo (2) - Negro (0) - Azul (×1.000.000)

$20 \cdot 1.000.000 = 20.000.000$ pF = 20 µF

(E)

Tensión nominal = (Verde) = 18 V

9.9. Asociación de condensadores

En el caso de que un condensador no disponga de la capacidad o tensión de trabajo adecuada para nuestras necesidades, se pueden acoplar entre sí en serie o paralelo y así conseguir las características deseadas.

9.9.1. Asociación de condensadores en serie

La tensión aplicada al conjunto se reparte entre los terminales de cada uno de los condensadores (Figura 9.21), de tal forma que se cumple la relación: $U = U_{AB} + U_{BC} + U_{CD}$.

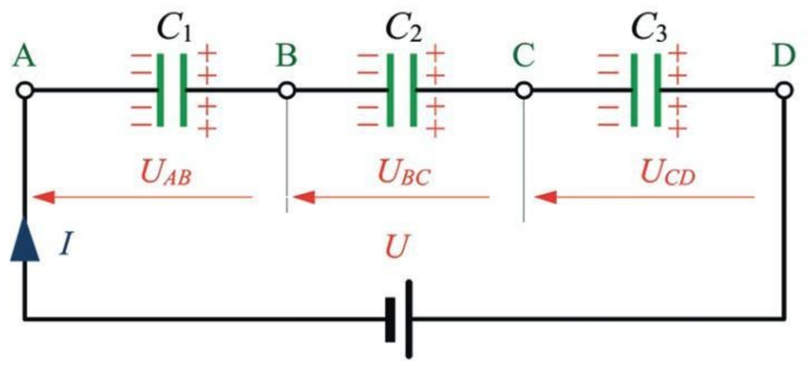


Figura 9.21. Asociación de condensadores en serie.

Con esta disposición cada uno de los condensadores trabaja a una tensión más baja que la aplicada al conjunto

© Ediciones Paraninfo

de aquellos. Sin embargo, la capacidad total obtenida es inferior a la de cualquiera de ellos. Se cumple que:

$$C_T = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}}$$

Veamos cómo se llega a este resultado:

Como el circuito es serie no existe más que una sola intensidad, y como el tiempo de carga (t) es igual para todos los condensadores, si llamamos Q_1, Q_2 y Q_3 a la carga que consigue cada condensador respectivo, y Q_T a la carga total, tendremos que:

$$I = \frac{Q_1}{t} = \frac{Q_2}{t} = \frac{Q_3}{t} = \frac{Q_T}{t}$$

de lo que se deduce que $Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q_T$.

Por otro lado, tenemos que $Q = U \cdot C$; despejando U, tenemos que:

$$U_{AB} = \frac{Q_1}{C_1}, \quad U_{BC} = \frac{Q_2}{C_2}, \quad U_{CD} = \frac{Q_3}{C_3}, \quad U = \frac{Q_T}{C_T}$$

Sustituyendo estos términos en la expresión de las tensiones:

$$U = U_{AB} + U_{BC} + U_{CD}$$

tenemos que:

$$\frac{Q_T}{C_T} = \frac{Q_1}{C_1} + \frac{Q_2}{C_2} + \frac{Q_3}{C_3}$$

Como las cargas son iguales:

$$\frac{Q_T}{C_T} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} + \frac{Q}{C_3} \quad \Rightarrow \quad \frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$$

De lo que se deduce la expresión de la capacidad total o equivalente C_T indicada al principio.

Actividad resuelta 9.6

Se conectan en serie tres condensadores de 4 µF, 8 µF y 12 µF a una fuente de alimentación de 100 V en C.C. Calcula la capacidad conseguida por el conjunto, así como la tensión a la que trabaja cada uno de los condensadores.

Solución:

$$C_T = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}} = \ldots = 2{,}18 \text{ µF}$$

$$Q_T = U \cdot C_T = \ldots = 2{,}18 \cdot 10^{-4} \text{ culombios} =$$

$$= Q_1 = Q_2 = Q_3$$

$$U_{AB} = \frac{Q_1}{C_1} = \ldots = 54{,}5 \text{ V}$$

$$U_{BC} = \text{——} = \ldots = 27{,}25 \text{ V}$$

$$U_{CD} = \text{——} = \ldots = 18{,}25 \text{ V}$$

Nota: No hay que olvidar que todas las operaciones se realizan en faradios.

La capacidad del conjunto se ha visto reducida; en compensación, los condensadores trabajan a menos tensión que los 100 V aplicados al conjunto.

Actividad resuelta 9.7

Se dispone de un número ilimitado de condensadores de 100 µF de capacidad y 50 V de tensión de trabajo.

¿Cuántos condensadores de este tipo sería necesario acoplar para conseguir un equivalente con una tensión de trabajo de 200 V y una capacidad de 25 µF? ¿Cómo hay que acoplarlos?

Solución:

Al acoplar cuatro condensadores de 100 µF en serie se consigue una capacidad equivalente igual a:

$$C_T = \frac{100}{4} = 25 \text{ µF}$$

Al ser iguales los condensadores la tensión se reparte por igual en cada condensador:

$$U = \frac{200}{4} = 50 \text{ V}$$

Con esta solución hemos conseguido conectar a una tensión de 200 V condensadores que solo soportan 50 V. Por supuesto se ha hecho a costa de reducir la capacidad de 100 µF a 25 µF.

9.9.2. Asociación en paralelo

En este acoplamiento, la tensión a la que quedan sometidos todos los condensadores es la misma y coincide con la aplicada al conjunto (Figura 9.22).

La capacidad aumenta cuando se les conecta en paralelo. Se cumple que:

$$I_t = I_1 + I_2 + I_3$$

de lo que se deduce que:

$$Q_T = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

© Ediciones Paraninfo

$$U\,C_T = U\,C_1 + U\,C_2 + U\,C_3$$

$$C_T = C_1 + C_2 + C_3$$

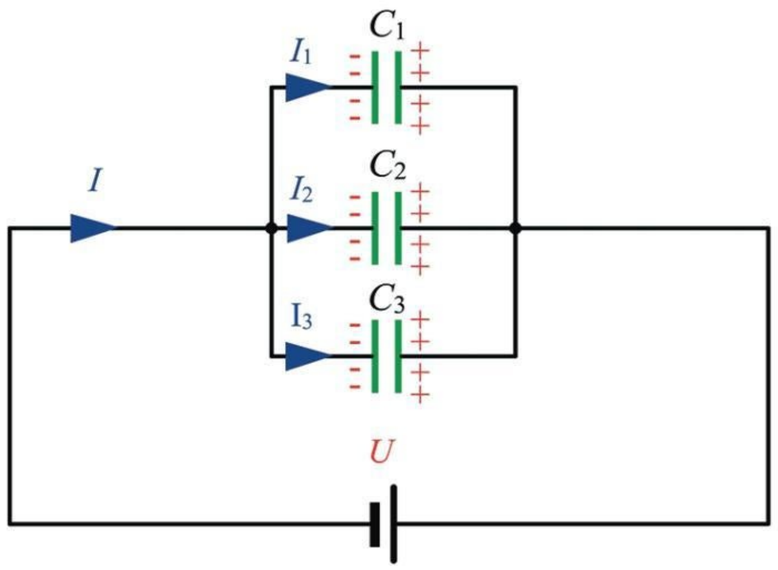


Figura 9.22. Asociación de condensadores en paralelo.

Actividad resuelta 9.8

Se acoplan en paralelo tres condensadores de 4 µF, 8 µF y 12 µF a una fuente de alimentación de 100 V en C.C. Averigua la capacidad del conjunto, así como la tensión a la que trabajan los condensadores.

Solución:

La capacidad total conseguida es:

$$C_T = C_1 + C_2 + C_3 = \ldots = 24\ \mu F$$

La tensión de trabajo de los condensadores es igual para todos: 100 V.

Con este montaje hemos conseguido aumentar la capacidad mientras que la tensión de trabajo permanece invariable.

Actividad resuelta 9.9

Determina cuántos condensadores de 20 µF de capacidad y 5 V de tensión de trabajo hay que conectar para conseguir un equivalente de 20 µF/10 V.

Solución:

Al conectar dos condensadores en serie se consigue aumentar la tensión hasta 10 V a costa de reducir la capacidad a 10 µF. Si ahora conectamos otra rama de dos condensadores en serie que, a su vez, estén conectados en paralelo con la otra rama conseguiremos aumentar la capacidad hasta los 20 µF sin modificar la tensión, tal como se indica en la Figura 9.23.

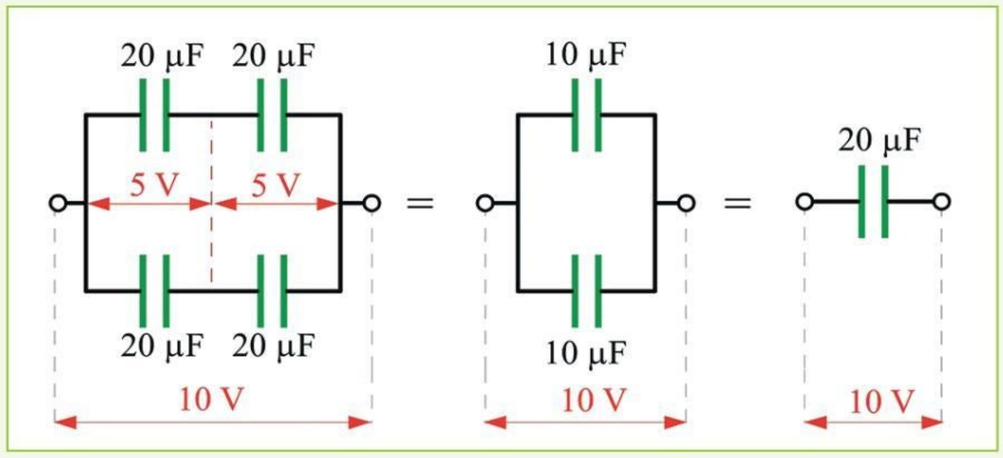


Figura 9.23.

Actividad propuesta 9.1

Un condensador de 100 µF se carga con una tensión de 10 V (posición del conmutador en 1, Figura 9.24). Posteriormente se conectan sus armaduras a las de otro condensador de 50 µF (posición del conmutador en 2) que se encuentra totalmente descargado. Averigua cuál será la tensión a la que quedan sometidos los dos condensadores una vez que el primer condensador se haya descargado sobre el segundo y la carga eléctrica almacenada en cada uno de ellos.

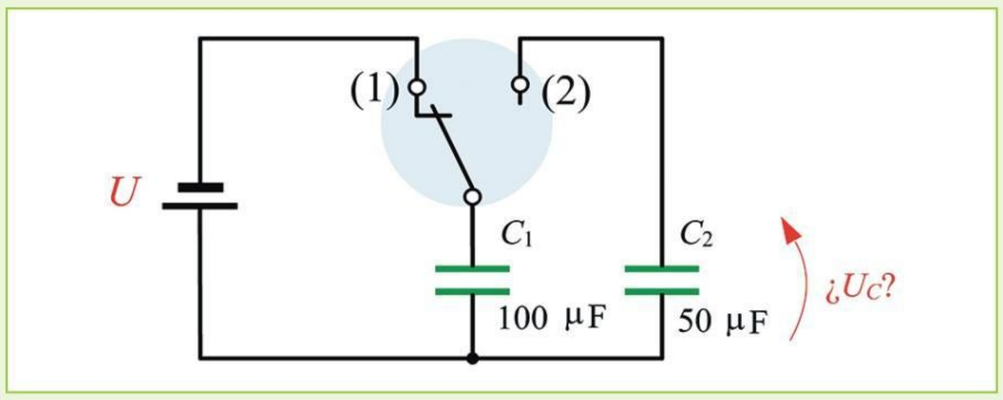


Figura 9.24.

La solución a esta Actividad propuesta la puedes encontrar dentro del MATERIAL WEB elaborado para este texto.

Actividad propuesta 9.2

Calcula la capacidad equivalente y la tensión a la que queda sometido cada condensador del circuito de la Figura 9.25.

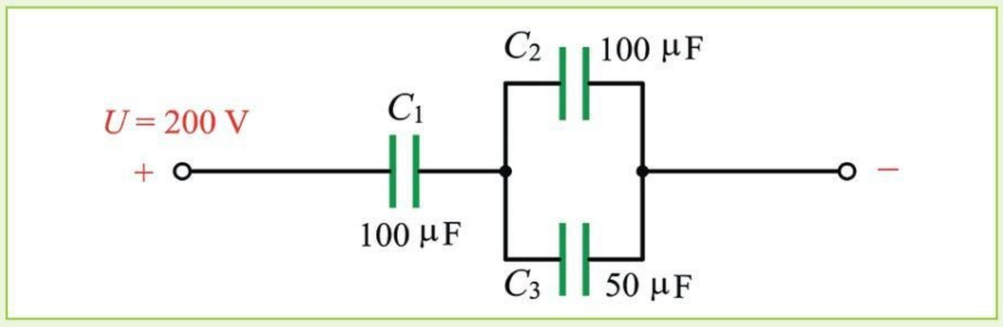


Figura 9.25.

La solución a esta Actividad propuesta la puedes encontrar dentro del MATERIAL WEB elaborado para este texto.

© Ediciones Paraninfo

Comprobación práctica en el laboratorio

9.1. Identificación y medida de condensadores. Consigue diferentes tipos de condensadores e identifica sus características más relevantes. Para ello tendrás que utilizar el código de colores o el código alfanumérico según sea el caso.

Una vez identificados y clasificados, mide con el polímetro el valor de su capacidad. Para ello nos valdremos de los terminales de conexión (Cx) que dispone nuestro polímetro (véase la Figura 9.26).

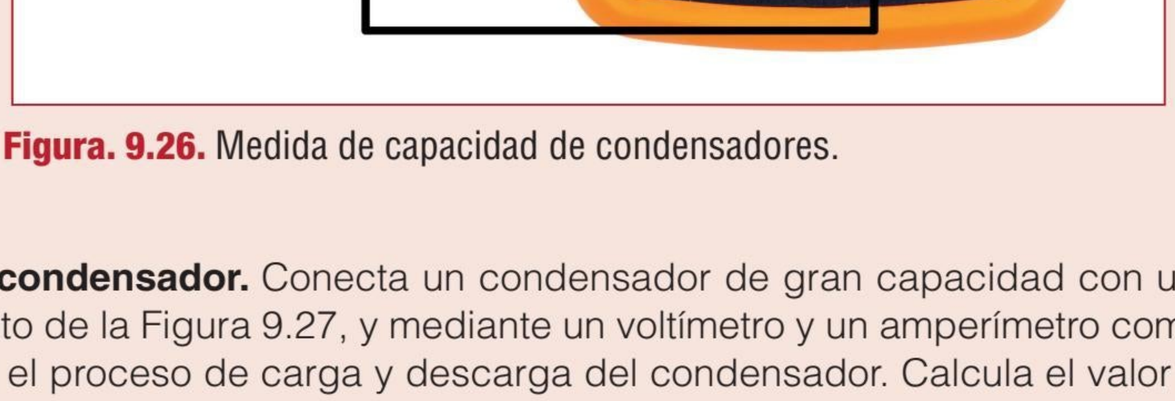


Figura. 9.26. Medida de capacidad de condensadores.

9.2. Carga y descarga de un condensador. Conecta un condensador de gran capacidad con una resistencia en serie, tal como se indica en el circuito de la Figura 9.27, y mediante un voltímetro y un amperímetro comprueba cómo evolucionan la tensión y la corriente en el proceso de carga y descarga del condensador. Calcula el valor teórico de la constante de carga y comprueba experimentalmente si se cumple dicha relación.

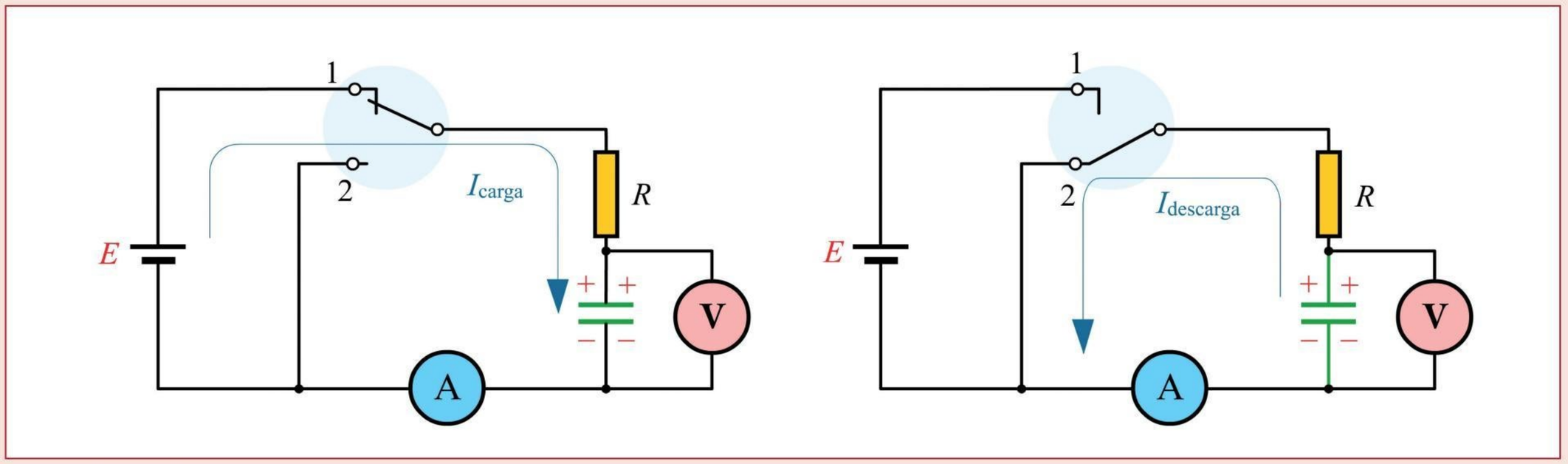


Figura. 9.27. Carga y descarga de un condensador.

© Ediciones Paraninfo

Actividades de comprobación

9.1. ¿Cuáles son las características que hay que conocer para definir un condensador comercial?

a) Capacidad y potencia.

b) Capacidad, tipo de dieléctrico, separación entre placas.

c) Tipo, capacidad, tensión nominal, tolerancia y coeficiente de temperatura.

9.2. ¿Qué ocurre si en un circuito de una lámpara alimentada por una fuente de alimentación de C.C. intercalamos en serie un condensador?

a) La lámpara se enciende durante un pequeño tiempo y luego se apaga totalmente.

b) La lámpara se enciende normalmente.

c) La lámpara se enciende y se apaga constantemente.

9.3. ¿Qué ventajas conlleva el uso de condensadores electrolíticos?

a) Soportan tensiones de trabajo fuertes.

b) Se consiguen altas capacidades y se pueden emplear en C.A.

c) Se consiguen altas capacidades.

9.4. ¿Qué ventajas aporta la conexión de condensadores en serie?

a) Se aumenta la capacidad del conjunto de condensadores acoplados.

b) Se consigue aumentar la tensión de trabajo del conjunto de condensadores acoplados.

c) Se aumenta la tensión y la capacidad.

9.5. ¿Qué puede ocurrir cuando se supera la tensión de trabajo de un condensador?

a) El condensador se calienta.

b) El condensador cambia la capacidad nominal.

c) El condensador se puede perforar y destruir.

9.6. Calcula la carga eléctrica que almacena un condensador de 1.000 μF cuando es sometido a las siguientes tensiones: 4 V, 20 V y 100 V, respectivamente.

9.7. ¿Qué espesor deberá tener el dieléctrico de un condensador plano de porcelana ($\varepsilon = 5{,}5$) para conseguir una capacidad de 1 nF, si posee unas armaduras con unas dimensiones de 50 cm × 2 cm?

9.8. Determina la constante de tiempo y el tiempo que invierte un condensador de 100 μF cargado con 24 V en descargarse totalmente a través de una resistencia de 100 Ω.

9.9. Determina las características de los condensadores de poliéster metalizado que aparecen con los colores:

C_1: (rojo, violeta, naranja, verde, azul).

C_2: (marrón, rojo, naranja, marrón, rojo).

C_3: (rojo, verde, rojo, blanco, amarillo).

9.10. Determina las características de los condensadores de cerámica que aparecen en la Figura 9.28.

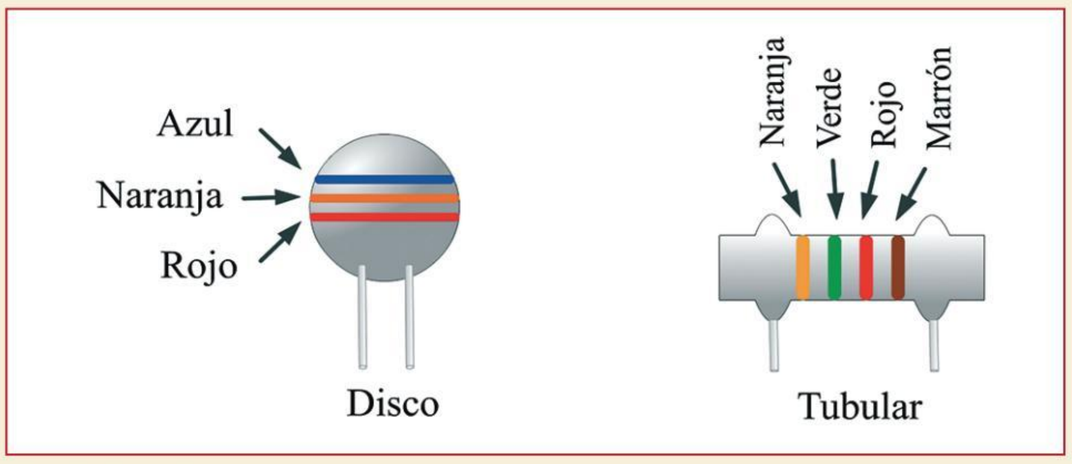


Figura 9.28.

9.11. ¿Qué colores les correspondería a los siguientes condensadores de tantalio?

$C_1 = 3{,}3\ \mu F/10\ V$

$C_2 = 57\ \mu F/25\ V$

$C_3 = 150\ \mu F/4\ V$

9.12. Se dispone de un número ilimitado de condensadores de 10 μF de capacidad y 5 V de tensión de trabajo.

¿Cuántos condensadores de este tipo sería necesario acoplar para conseguir un equivalente con una tensión de trabajo de 20 V y una capacidad de 2,5 μF? ¿Cómo hay que acoplarlos?

a) 4 condensadores en paralelo.

b) 4 condensadores en serie.

9.13. ¿Y para conseguir un equivalente con una capacidad de 5 μF y una tensión de trabajo de 20 V?

a) 8 condensadores agrupados en 2 ramas en paralelo consistentes en 4 condensadores conectados en serie.

b) 16 condensadores agrupados en 4 ramas de 4 condensadores en serie. Las ramas se conectan en paralelo.

© Ediciones Paraninfo

9.14. ¿Y para conseguir un equivalente con la misma capacidad (10 μF) y una tensión de trabajo de 15 V?

a) 9 condensadores agrupados en 3 ramas de 3 condensadores en serie. Las ramas se conectan entre sí en serie.

b) 9 condensadores agrupados en 3 ramas de 3 condensadores en serie. Las ramas se conectan entre sí en paralelo.

9.15. Se conectan en serie un condensador de 6 μF con otro de 3 μF a una tensión de 100 V. Calcula la capacidad y la carga del conjunto formado, así como la carga y tensión de cada condensador.

9.16. Se conectan en paralelo un condensador de 5 μF con uno de 15 μF a una tensión de 100 V. Calcula la capacidad y la carga del conjunto formado, así como la carga de cada condensador.

Actividades de evaluación resueltas

A continuación se dan los enunciados de una serie de actividades de evaluación. Estas actividades las podrás encontrar resueltas accediendo al MATERIAL WEB creado para este texto.

9.1. Un condensador plano de placas paralelas tiene un dieléctrico cuya permitividad relativa vale 7. Cada placa posee un área de 30 cm^2 y la separación entre ellas es de 100 μm. Halla la capacidad de dicho condensador.

(Dato: permitividad del aire = $8{,}85 \times 10^{-12}$ F/m).

9.2. Halla la tensión que adquieren los condensadores de cada uno de los circuitos de la Figura 9.29, al cabo de un tiempo suficientemente grande, una vez cargados, después de cerrado el interruptor s.

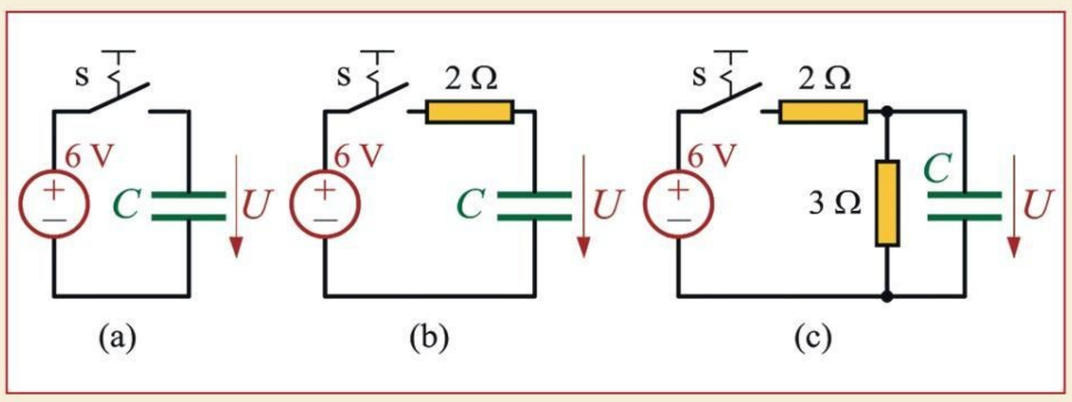


Figura 9.29.

9.3. Los condensadores mostrados en la Figura 9.30 tienen todos la misma forma y dimensiones geométricas. El condensador C_3 tiene un aislante de poliéster de constante dieléctrica relativa 3,3 y una capacidad de 1 μF. Los condensadores C_1 y C_2 tienen un aislante de porcelana de constante dieléctrica relativa 6,6.

Halla:

a) La capacidad de los condensadores C_1 y C_2.

b) La capacidad total de la asociación de condensadores conectada a la fuente de tensión.

c) Si la tensión de la fuente de tensión continua vale 12 V, ¿cuál es la carga de cada condensador?

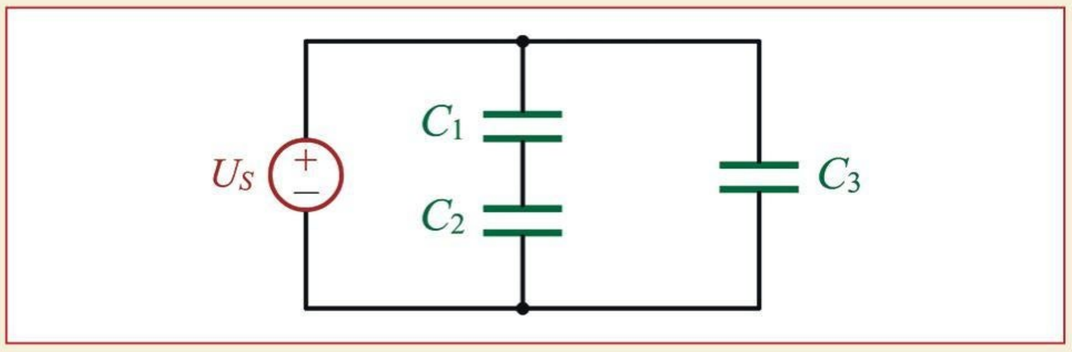


Figura 9.30.

9.4. La red de la Figura 9.31 se halla en régimen permanente de corriente continua. Los parámetros de los elementos pasivos valen: R = 100 Ω, C_1 = 4 μF, C_2 = 15 μF, C_3 = 10 μF, y el amperímetro indica una lectura de 10 A.

Determina:

a) La f, e. m E de la fuente de tensión.

b) La energía almacenada por el condensador C_1.

c) La carga y tensión de los condensadores C_2 y C_3.

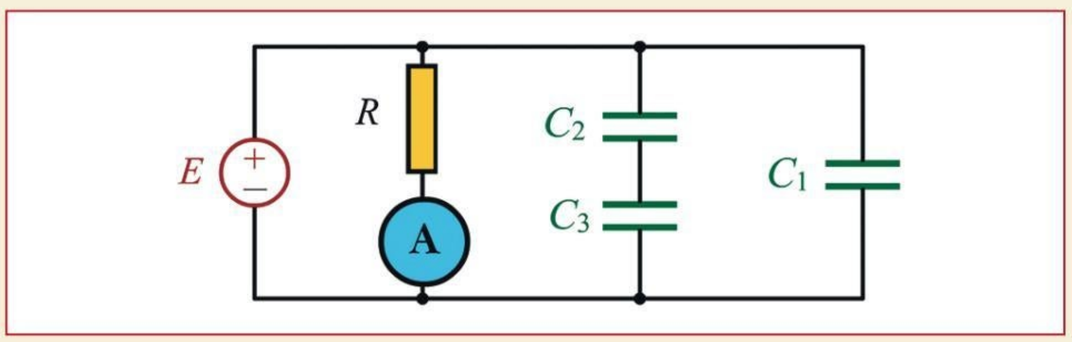


Figura 9.31.

9.5. En la Figura 9.32 se muestra el circuito de retardo RC para un temporizador. Calcula el valor al que habrá que ajustar la resistencia R para conseguir un tiempo de retardo ($t = 5 \cdot \tau$) de 1 minuto.

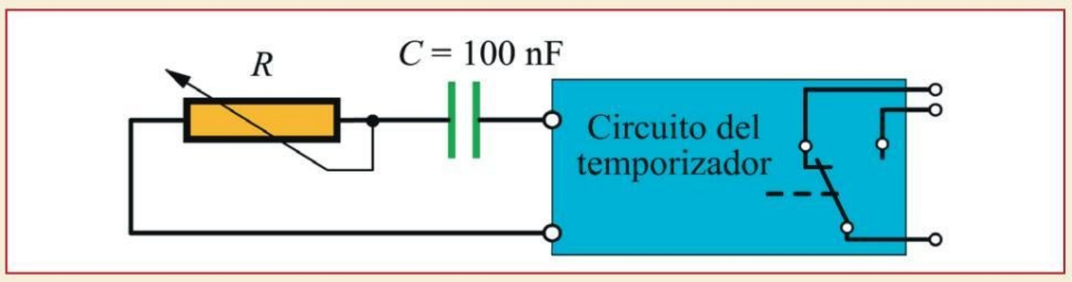


Figura 9.32.

© Ediciones Paraninfo

9.6. ¿Cuáles tendrían que ser las dimensiones cuadradas de las armaduras de un condensador con dieléctrico de aire y una separación entre las mismas de 1 mm, para conseguir una capacidad de 1 F.

9.7. Sabiendo que la energía *E* que almacena en julios un condensador de capacidad *C* cuando es cargado con una tensión *U* se puede calcular con la siguiente expresión:

$$E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2$$

Calcula la energía almacenada en un condensador de 2.000 μF si se le conecta a una fuente de tensión continua de 100 V.

9.8. Se desea fabricar un condensador con dieléctrico de porcelana con una constante dieléctrica relativa de 5 y una rigidez dieléctrica de 10 kV/mm. Las dimensiones de las placas son de 100 mm de largo por 10 mm de ancho. Calcula la capacidad y tensión de perforación del condensador en los siguientes casos:

a) Separación de las armaduras de 0,001 mm.

b) Separación de las armaduras de 0,01 mm.

Actividades de ampliación

9.1. Con el fin de conseguir una mayor profundización en la materia, se han incluido los enunciados de una serie de ***«actividades de evaluación propuestas de ampliación (9)»*** para esta unidad que podrás encontrar dentro del MATERIAL WEB elaborado para este texto. Selecciona alguna de estas actividades y encuentra su solución.

9.2. Busca en el MATERIAL WEB el documento con el nombre **«Ejemplos prácticos de identificación de condensadores».** Aquí podrás encontrar multitud de casos prácticos de identificación de condensadores que te ayudarán a entender mejor esta difícil tarea.

9.3. Identifica las características de los condensadores con marcado alfanumérico de la Tabla 9.4.

Para ello se han seguido los siguientes criterios:

Si la cifra aparece inscrita con una coma decimal, y no figura ninguna unidad, la capacidad vendrá expresada en microfaradios (μF).

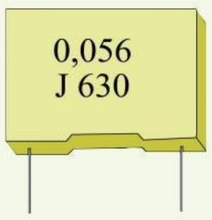
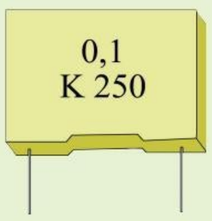
Si en la cifra no aparece ni coma decimal ni unidad, la capacidad vendrá expresada en picofaradios (pF).

Si en la cifra se puede leer la unidad (n = nF; p = pF; μ = μF; K = nF) esta letra hace las veces de coma decimal.

Para condensadores cerámicos, la cifra podría estar compuesta por tres dígitos. La última cifra nos indica el multiplicador (número de ceros después de las dos primeras cifras). El resultado se expresa en picofaradios (pF).

Los valores de tolerancia son los que figuran en la Tabla 9.5.

Tabla 9.4. Ejemplos de identificación de condensadores con marcado alfanumérico

	Capacidad: 0,056 μF = 56 nF Tolerancia: J = 5 % Tensión nominal: 630 V
	Capacidad: 0,1 μF Tolerancia: K = 10 % Tensión nominal: 250 V
	Cerámico con tres cifras Capacidad: 50 · 103 = 50.000 pF = 50 nF
	Capacidad: 48 pF Tolerancia: J = 5 %
	Capacidad: 0,53 nF Tolerancia: J = 5 % Tensión nominal: 250 V
	Capacidad: 48 K = 48 nF Tensión nominal: 250 V

© Ediciones Paraninfo

Tabla 9.5. Valor de la tolerancia

	Letra	A	B	D	F	G	H	J	K	M
Tolerancia	C < 10 pF ± pF	0,1	0,25	0,5	1	2	—	—	—	—
	C > 10 pF ± %	—	—	5,5	1	2	2,5	5	10	20

9.4. Busca en internet el significado del código JIS para condensadores y descubre sus aspectos más significativos. A continuación, busca en el almacén de componentes del laboratorio de Electrotecnia condensadores que vengan marcados con este tipo de código, y averigua su capacidad, tensión de trabajo y tolerancia.

Seguidamente se expone un resumen sobre el código JIS.

El **código JIS (*Japan Industrial Standard*)** es el código utilizado por la industria japonesa para la identificación de condensadores (Figura 9.33).



Figura 9.33. Código alfanumérico JIS.

El código es alfanumérico (letras y números) y se lee de la siguiente manera:

- El primer número y la primera letra se refieren a la tensión máxima de operación del condensador (Tabla 9.6).

Tabla 9.6. Tensión máxima. Código JIS

1H = 50 V
2A = 100 V
2T = 150 V
2D = 200 V
2E = 250 V
2G = 400 V
2J = 630 V

- Los tres números que siguen indican el valor de la capacidad del condensador en picofaradios (pF). Los dos primeros números son las cifras significativas y el tercero es el multiplicador decimal.
- La última letra indica la tolerancia (Tabla 9.7).

Tabla 9.7. Tolerancia. Código JIS

B	+/– 0,10pF
C	+/– 0,25pF
D	+/– 0,50pF
E	+/– 0,5 %
F	+/– 1 %
G	+/– 2 %
H	+/– 3 %
J	+/– 5 %
K	+/– 10 %
M	+/– 0,25pF

Ejemplos:

a) 2E 153 J

Tensión: **(2E)** 250 V

Capacidad: **(153):** 15×10^3 pF = 15.000 pF = 15 nF

Tolerancia: **(J)** +/– 5%

b) 1H 522 K

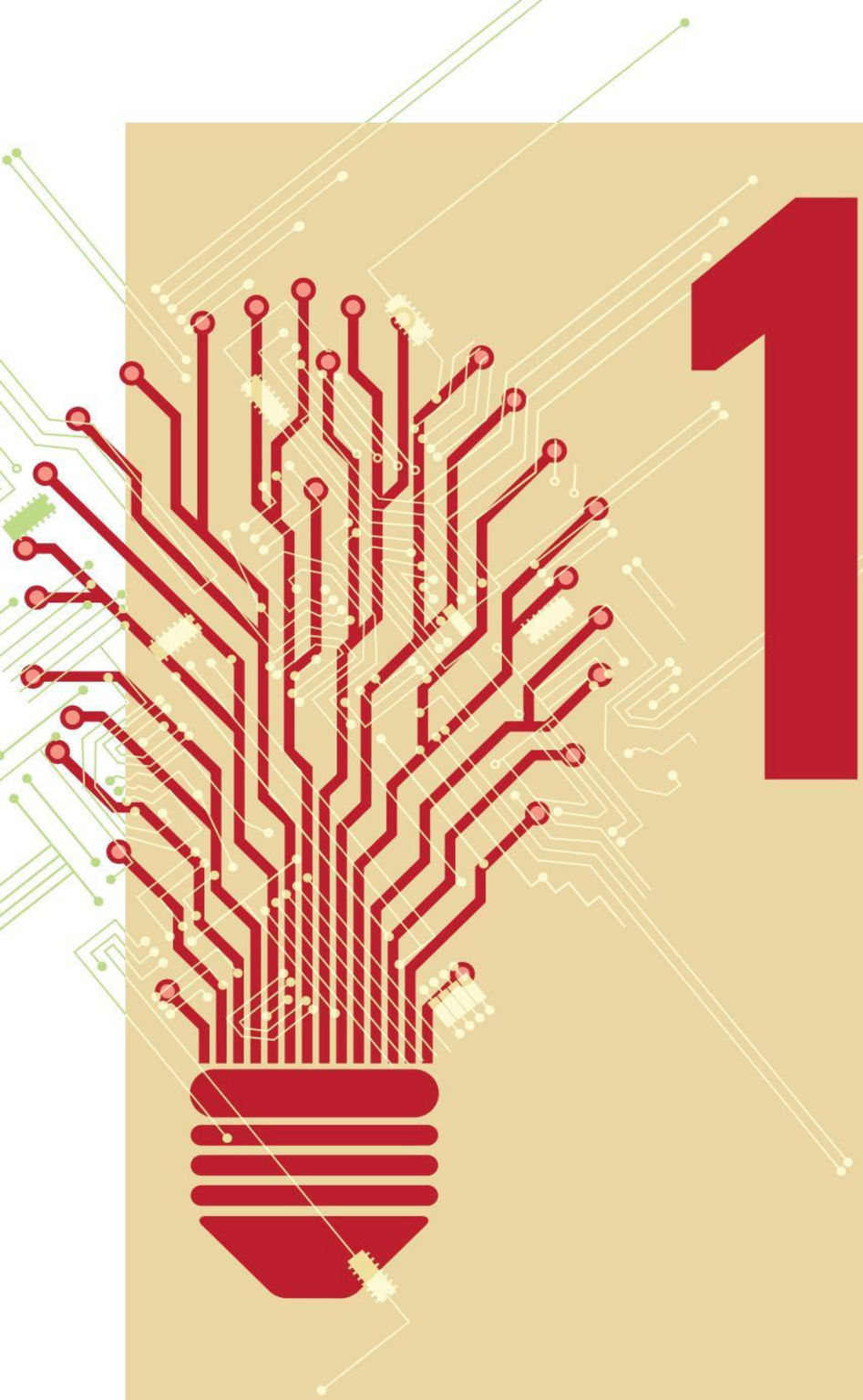
Tensión: **(1H)** 50 V

Capacidad: **(522)** 52×10^2 pF = 5.200 pF

Tolerancia: **(K)** +/– 10%

© Ediciones Paraninfo

10 Magnetismo y electromagnetismo



Contenidos

- **10.1.** Imanes
- **10.2.** Electromagnetismo
- **10.3.** Magnitudes magnéticas
- **10.4.** Curva de magnetización. Saturación
- **10.5.** Permeabilidad magnética
- **10.6.** Histéresis magnética
- **10.7.** Cálculo de circuitos magnéticos
- **10.8.** Electroimanes

El magnetismo tiene que ver con fenómenos de atracción y repulsión que se dan con los imanes y con los materiales ferromagnéticos, y el electromagnetismo con fenómenos magnéticos que aparecen cuando los conductores y bobinas son recorridos por una corriente eléctrica. El estudio de estas dos ciencias es importante, ya que aprovechando estos fenómenos se pueden construir electroimanes, transformadores, motores, generadores de electricidad como las dinamos y alternadores, altavoces, relés y contactores, cerraduras electromagnéticas, cocinas de inducción, detectores de metales, electroválvulas y un sinfín más de aplicaciones.

Objetivos

- Entender los efectos de los campos magnéticos.
- Determinar el espectro magnético de un imán.
- Relacionar las magnitudes fundamentales básicas de un campo magnético con sus unidades de medida y entender su importancia en un circuito magnético.
- Determinar la relación existente entre las corrientes eléctricas y los campos magnéticos.
- Determinar el sentido de las líneas de fuerza de un campo electromagnético, así como la intensidad y densidad del mismo.
- Apreciar la importancia de la permeabilidad magnética en la construcción de núcleos para electroimanes.
- Interpretar la curva de magnetización y el ciclo de histéresis, determinando la saturación magnética, así como las pérdidas originadas en las sustancias magnéticas.
- Utilizar los electroimanes para aplicaciones prácticas.

10.1. Imanes

Actividad experimental 10.1

Consigue un imán rectangular como el de la Figura 10.1 y acerca a sus proximidades los siguientes objetos: una moneda, una punta de hierro, una punta de acero, un trozo de cobre, y todo aquello que se te ocurra.

¿Cuáles fueron los objetos que atrajo el imán hacia sí?

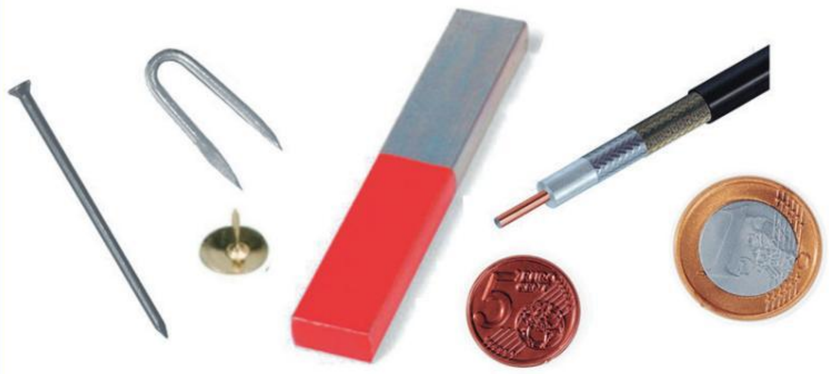


Figura 10.1. Si tomamos un imán e intentamos acercar diferentes objetos metálicos, podremos observar que este atrae con fuerza solo aquellos objetos que sean de hierro o acero.

A estos materiales que son susceptibles de ser atraídos por un imán se los conoce por el nombre de **materiales ferromagnéticos.**

Las aplicaciones de los imanes son muy variadas, ya que con ellos se pueden producir fuerzas mecánicas considerables. Así, por ejemplo, se pueden utilizar como separadores magnéticos que separan materiales magnéticos de no magnéticos. Otras aplicaciones de los imanes son pequeñas dinamos, micrófonos, altavoces, aparatos de medida analógicos y pequeños motores eléctricos de C.C.

10.1.1. Polos de un imán

Si depositamos una cantidad de limaduras de hierro sobre un imán recto, como el de la Figura 10.2, podremos observar que aparece una mayor concentración de estas en los extremos del imán. A su vez también se puede comprobar cómo esta concentración disminuye hacia el centro, hasta desaparecer prácticamente en el centro.

Las zonas donde se produce la mayor atracción se denominan polos magnéticos. La zona donde no hay atracción se denomina línea neutra.

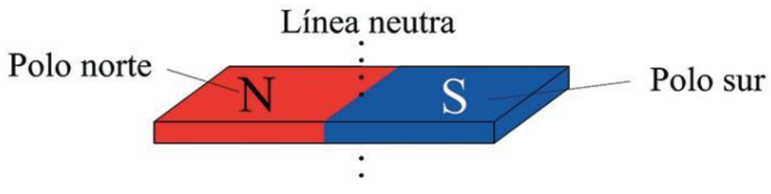


Figura 10.2. Polos de un imán.

10.1.2. Brújula

Una brújula es una aguja imantada que puede girar libremente en su eje central (Figura 10.3). Si nosotros dejamos girar libremente a la aguja imantada de una brújula, esta se orientará siempre con un extremo hacia el polo norte terrestre y el otro hacia el sur. De aquí proviene el nombre de los polos de un imán. Al extremo de la aguja que se orienta hacia el norte geográfico terrestre se lo denomina **polo norte,** y al otro, **polo sur.**



Figura 10.3. Brújula.

Dado que en los imanes los polos del mismo nombre desarrollan fuerzas de repulsión y los de diferente nombre de atracción, mediante una brújula será fácil determinar los nombres de los polos. Para ello bastará con acercar la brújula a uno de los polos del imán y comprobar si existe atracción o repulsión del polo norte de aquella.

10.1.3. Clases de imanes

En la naturaleza se pueden encontrar **imanes naturales,** como la magnetita, que posee ciertas propiedades magnéticas. Ahora bien, si lo que deseamos es potenciar dichas propiedades se pueden fabricar **imanes artificiales** a partir de sustancias ferromagnéticas.

A su vez, los imanes artificiales, o sustancias magnetizadas, dependiendo del tipo de sustancia utilizada, una vez magnetizados pueden mantener durante largo tiempo sus propiedades magnéticas (imanes permanentes) o solo cuando están sometidos a la acción de un campo magnético (imanes temporales).

Como ejemplo de imanes temporales tenemos el hierro puro, y como imán permanente, el acero. Mediante una sencilla experiencia se puede comprobar que al acercar un trozo de acero (por ejemplo, un destornillador) a un imán, el acero queda magnetizado, y se aprecian sus propiedades de atracción aunque retiremos el imán de dicho trozo de acero. Sin embargo, si utilizamos un trozo de hierro para la experiencia (por ejemplo, un clavo de hierro), este manifiesta propiedades de atracción hacia otros materiales solo cuando

© Ediciones Paraninfo

está bajo la acción del campo magnético del imán; una vez retirado el imán, dicho trozo de hierro pierde prácticamente todas las propiedades magnéticas adquiridas.

Para la construcción de imanes permanentes se utilizan aleaciones de acero-tungsteno, acero-cobalto, acero al titanio, hierro-níquel-aluminio-cobalto, etcétera.

Los imanes temporales son de gran utilidad para la construcción de núcleos para electroimanes, motores, generadores y transformadores. En estos casos se emplea la chapa de hierro aleada, por lo general, con silicio.

10.1.4. Teoría molecular de los imanes

Si rompemos un imán en dos, las dos partes resultantes son dos imanes completos con sus polos correspondientes. Si volviésemos a romper una de estas partes obtendríamos otros dos nuevos imanes. Este proceso se puede repetir multitud de veces, hasta alcanzar lo que vendremos a llamar **molécula magnética** (Figura 10.4).

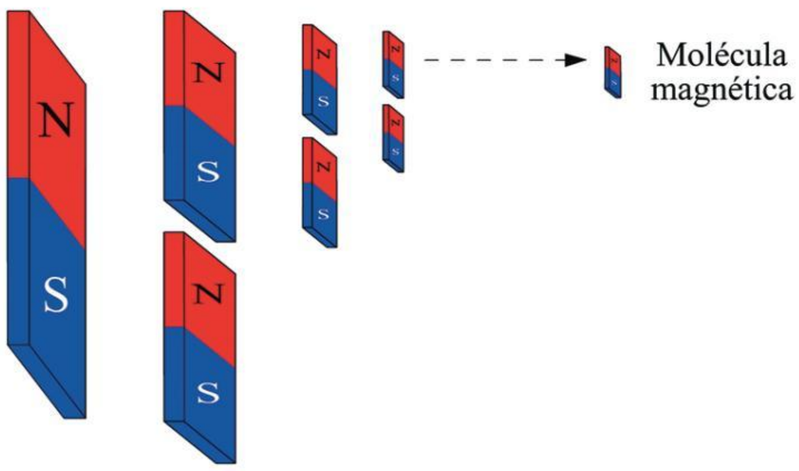


Figura 10.4. Molécula magnética.

Según esta teoría, se puede suponer que un imán está compuesto de moléculas magnéticas perfectamente orientadas con los polos respectivos del imán (Figura 10.5a). Un trozo de hierro sin imantar está compuesto de moléculas magnéticas totalmente desorientadas (Figura 10.5b).

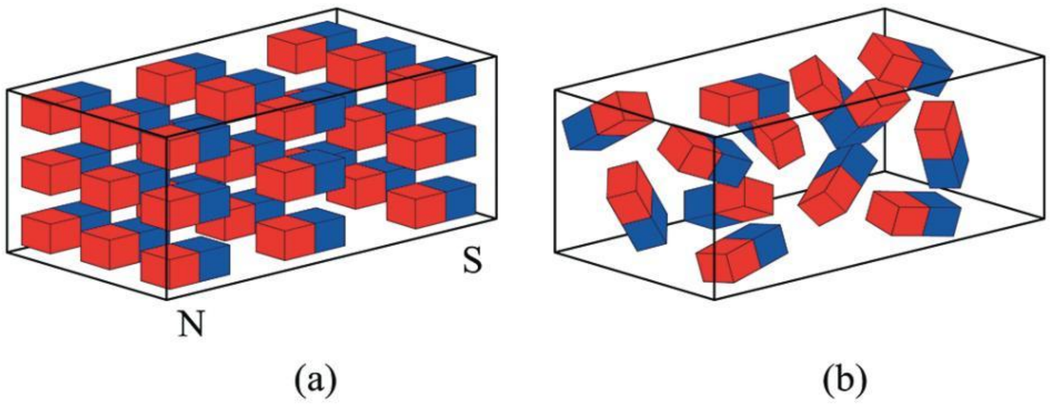


Figura 10.5. Moléculas magnéticas de un imán (a) y de un trozo de hierro (b).

Esta teoría nos servirá de gran ayuda para comprender fenómenos complejos, como la permeabilidad, la saturación magnética, la histéresis, etc., que estudiaremos más adelante.

Gracias a esta teoría también podremos entender más fácilmente el comportamiento de los materiales magnéticos utilizados para la elaboración de imanes permanentes y artificiales. En el caso de los imanes permanentes, aparece una especie de rozamiento interno entre las moléculas magnéticas que dificulta el retorno al estado inicial una vez orientadas y magnetizadas. Al contrario, en los imanes temporales las moléculas magnéticas se ordenan y desordenan con facilidad, en función de la influencia ejercida por la acción de un campo magnético externo al mismo.

Las propiedades magnéticas de los imanes se ven alteradas por la temperatura; así, por ejemplo, el hierro puro pierde totalmente su magnetismo por encima de los 769 ºC. Por otro lado, si golpeamos fuertemente un trozo de acero imantado se pueden modificar su propiedades magnéticas. Esto es debido a que los golpes pueden cambiar el orden de las moléculas magnéticas.

10.1.5. Campo magnético de un imán

Se puede decir que el campo magnético es el espacio, próximo al imán, en el cual son apreciables los fenómenos magnéticos originados por dicho imán.

El campo magnético de un imán es más intenso en unas partes que otras. Así, por ejemplo, el campo magnético adquiere su máxima intensidad en los polos, disminuyendo paulatinamente según nos alejamos de ellos. Para poder hacernos una idea del aspecto que tiene el campo magnético, o sea, de su espectro magnético, realiza la siguiente experiencia:

Actividad experimental 10.2

Se toma un imán sobre el que se coloca una lámina de plástico transparente y se espolvorea con limaduras de hierro, procurando que queden uniformemente repartidas por toda la superficie de la lámina de plástico transparente. Las limaduras de hierro se orientan sobre la lámina dibujando la forma del campo magnético (Figura 10.6).

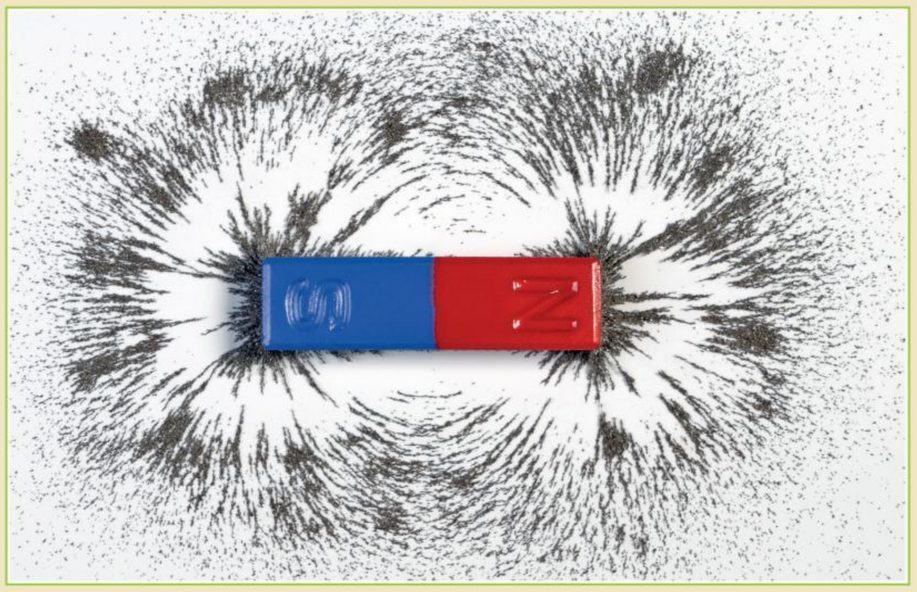


Figura 10.6. Espectro magnético de un imán.

© Ediciones Paraninfo

Observa que hay más limaduras concentradas en los extremos, y que existen unas cadenas de limaduras que forman unas líneas que van de un polo a otro. A estas cadenas se las conoce por el nombre de **líneas de fuerza del campo magnético.**

Las líneas de campo se pueden dibujar tal como se muestra en la Figura 10.7. Las líneas de fuerza únicamente representan la forma del campo magnético. Ahora bien, por motivos de convencionalismos teóricos, se les da un sentido de circulación, de tal forma que se dice que las líneas de campo salen por el polo norte del imán, recorren el espacio exterior y entran por el polo sur. El sentido de circulación de estas líneas por el interior del imán es de sur a norte.

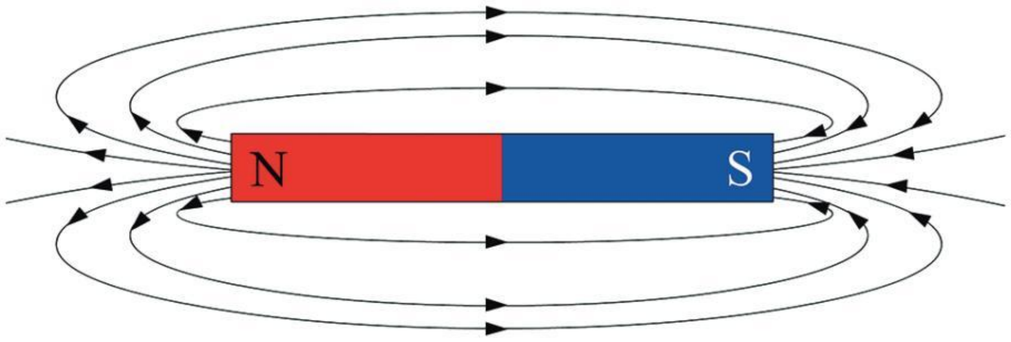


Figura 10.7. Líneas de fuerza del campo magnético.

La visualización de las líneas de campo resulta muy interesante, ya que conociendo su dirección podemos determinar la polaridad del campo magnético. Además, la mayor o menor concentración de esas líneas nos indica lo intenso que es el campo en una determinada zona.

En la Figura 10.8 se puede observar que cuando acercamos dos imanes por sus polos iguales, las líneas de campo se repelen.

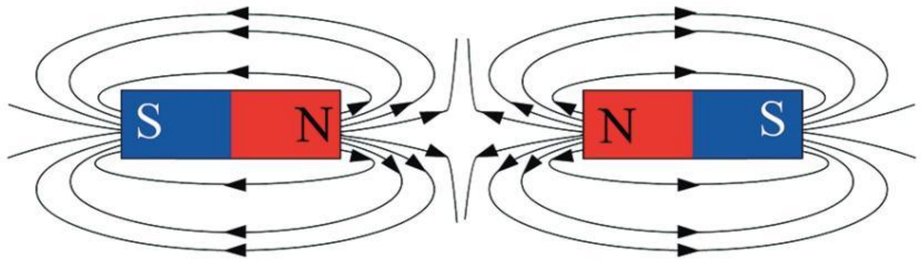


Figura 10.8. Repulsión de dos imanes.

Sin embargo, si acercamos dos imanes por sus polos opuestos (Figura 10.9), las líneas de campo se establecen en la misma dirección y se suman.

Figura 10.9. Atracción de dos imanes.

10.2. Electromagnetismo

Los imanes producen un campo magnético considerable, pero para ciertas aplicaciones este resulta todavía muy débil. Para conseguir campos más intensos utilizaremos bobinas fabricadas con conductores eléctricos, que al ser recorridos por una corriente eléctrica desarrollan campos magnéticos, cuya intensidad depende fundamentalmente de la intensidad de la corriente y del número de espiras de la bobina.

10.2.1. Campo magnético creado por un conductor cuando es atravesado por una corriente eléctrica

Si nosotros espolvoreamos limaduras de hierro sobre una hoja de papel que es atravesada por un conductor por donde circula una corriente eléctrica (Figura 10.10a), observaremos que las limaduras se orientan y forman un espectro magnético de forma circular (Figura 10.10b).

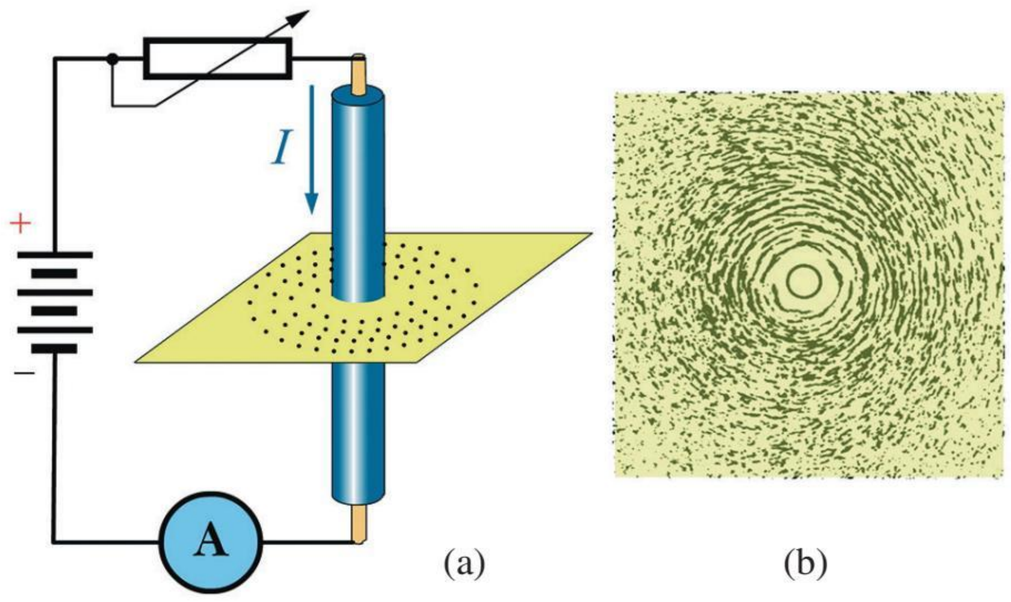


Figura 10.10. Campo magnético de un conductor.

Esto demuestra que cuando un conductor es atravesado por una corriente eléctrica, a su alrededor aparece un campo magnético. Observando el espectro del campo magnético se puede apreciar que las líneas de fuerza toman la forma de círculos concéntricos que se cierran a lo largo de todo el conductor.

Si situamos varias agujas imantadas alrededor del conductor, podremos observar que su orientación depende del sentido de la corriente. Para determinar el sentido de las líneas de fuerza de una forma sencilla, se aplica la regla del sacacorchos o de Maxwell que dice así: *El sentido de las líneas de fuerza, concéntricas al conductor, es el que indicaría el giro de un sacacorchos que avanzase en el mismo sentido que la corriente* (Figura 10.11).

NOTA

Para aplicar correctamente esta regla se emplea el sentido convencional de la corriente.

© Ediciones Paraninfo

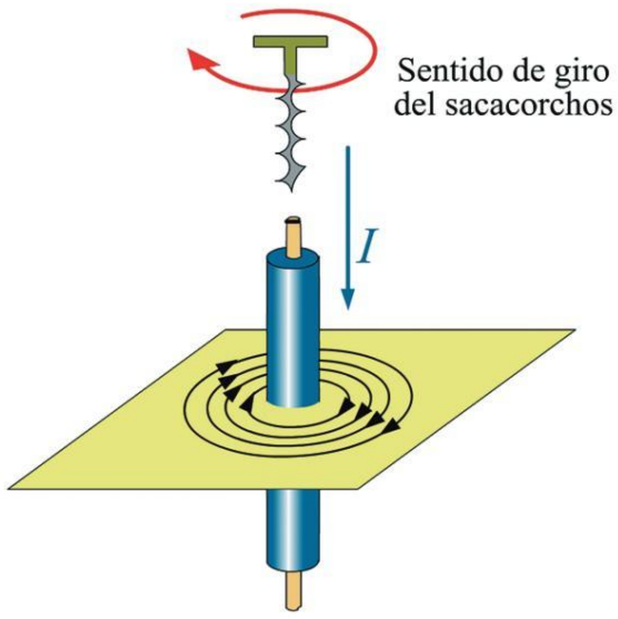


Figura 10.11. Regla del sacacorchos o de Maxwell.

La intensidad del campo magnético desarrollado por el conductor depende fundamentalmente de la intensidad de la corriente que fluye por el conductor. A más intensidad de corriente, más intensidad de campo.

A veces, es mucho más cómodo representar las líneas de fuerza del campo magnético en un plano perpendicular al conductor. Para ello se dibuja la sección recta y circular del conductor, indicando con un aspa la corriente que entra en el papel y con un punto la corriente que sale del papel (Figura 10.12).

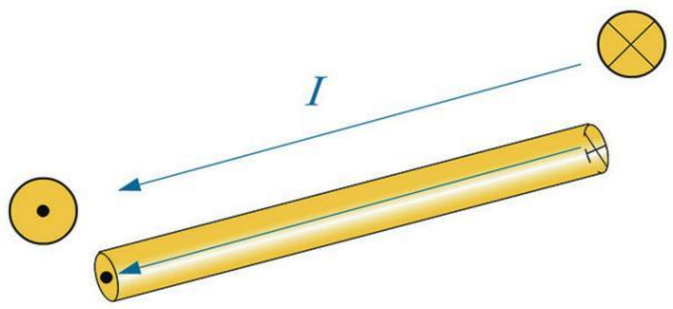


Figura 10.12. Representación en el plano de una corriente por un conductor.

En los siguientes ejemplos de la Figura 10.13 se muestra el aspecto del campo magnético de una corriente saliente y de una entrante, una vez aplicada la regla del sacacorchos.

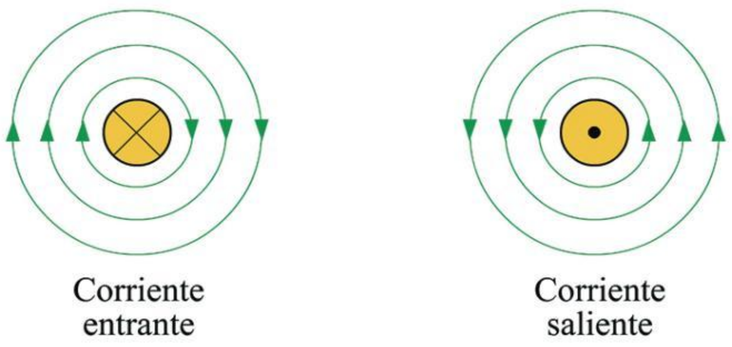


Figura 10.13. Ejemplos de campo magnético de un conductor.

10.2.2. Campo magnético en un conductor en forma de anillo

Un conductor recto produce un campo magnético muy disperso y, por tanto, muy débil. La forma de conseguir que el campo magnético sea más fuerte es disponer el conductor en forma de anillo.

El sentido de las líneas de fuerza de una parte del conductor se suma a la del otro, para formar un campo magnético mucho más intenso en el centro de la espira (Figura 10.14). En la Figura 10.15 se puede apreciar el efecto de concentración de las líneas de campo en el centro del anillo al que, como en otras ocasiones, se le ha realizado el espectro magnético con limaduras de hierro.

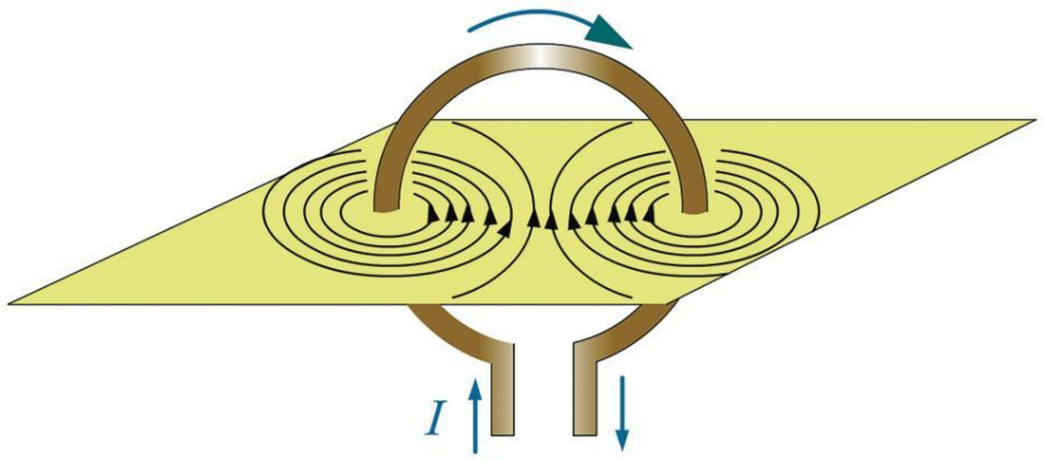


Figura 10.14. Campo magnético de una espira.

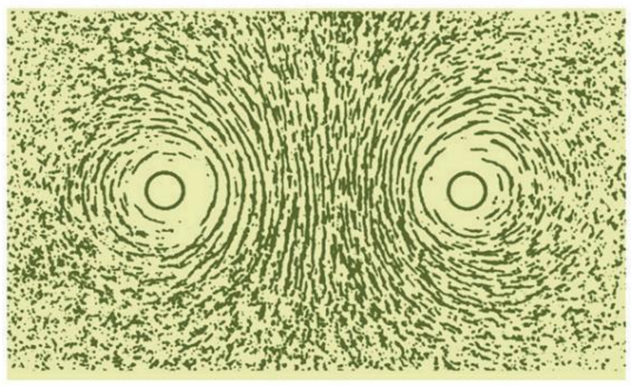


Figura 10.15. Espectro magnético de una espira.

10.2.3. Campo magnético formado por una bobina

En una bobina, el campo magnético de cada espira se suma al de la siguiente, concentrándose este en el centro de la misma. El campo resultante es uniforme en el centro de la espira y mucho más intenso que en el exterior. En los extremos de la bobina se forman polos magnéticos (Figura 10.16).

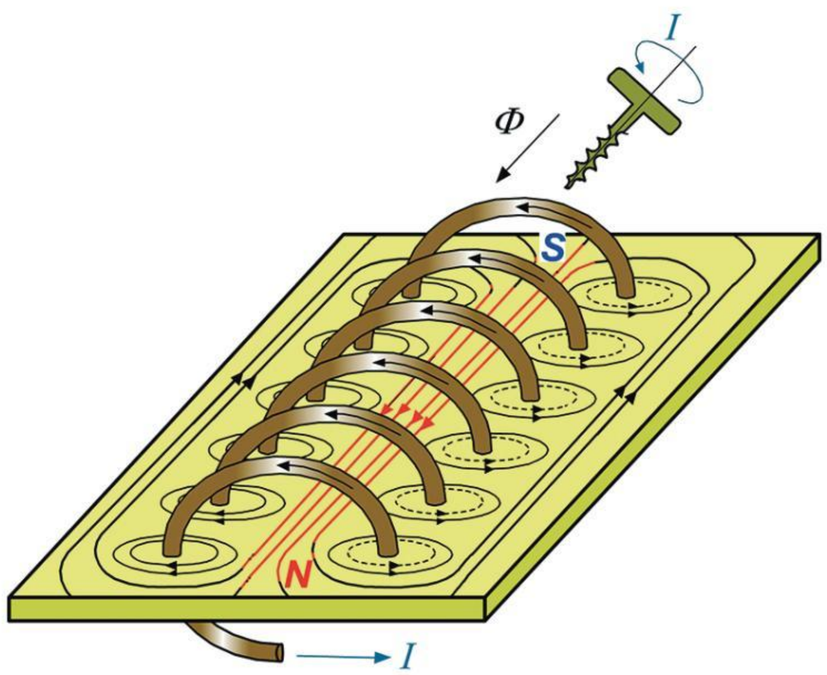


Figura 10.16. Campo magnético de una bobina.

© Ediciones Paraninfo

Para determinar el sentido de las líneas de fuerza se aplica la regla del sacacorchos, pero de otra forma. Basta con girar el sacacorchos, en el mismo sentido de giro que la corriente eléctrica por las espiras. El sentido de avance del sacacorchos nos indica el sentido de las líneas de fuerza. Una vez determinado este sentido, bien fácil es determinar los polos de la bobina (el polo norte estará situado en el extremo por donde salen las líneas de fuerza, y el sur por donde entran).

10.3. Magnitudes magnéticas

Al igual que para definir el comportamiento de un circuito eléctrico utilizamos las magnitudes eléctricas, para definir los campos electromagnéticos utilizamos las magnitudes magnéticas.

10.3.1. Flujo magnético (Φ)

El campo magnético se representa a través de las líneas de fuerza. La cantidad de estas líneas se denomina flujo magnético.

Se representa por la letra griega Φ; sus unidades son:

- El **weber (Wb)**, en el Sistema Internacional.
- El maxvelio, en el Sistema CGS (Mx).

La relación que existe entre ambas unidades es 1 Wb = $= 10^8$ Mx.

10.3.2. Inducción magnética (B)

La inducción magnética se define como la cantidad de líneas de fuerza que atraviesan perpendicularmente la unidad de superficie. En cierta forma, nos indica lo densas que son las líneas de fuerza, o lo concentradas que están, en una parte del campo magnético (Figura 10.17).

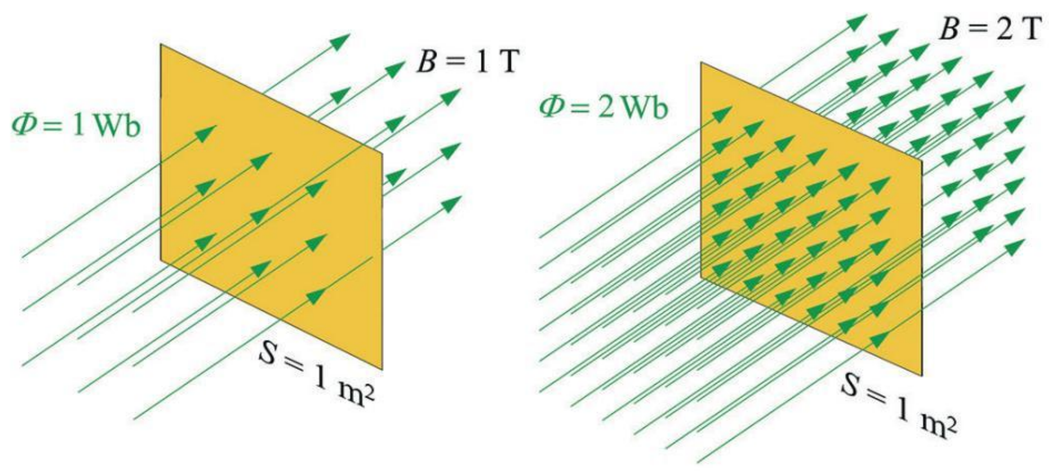


Figura 10.17. Comparación entre un campo magnético con una inducción magnética de 1 tesla y otro más denso de 2 teslas.

Se representa por B; sus unidades son:

- La **tesla (T)**, en el Sistema Internacional.
- El gauss (Gs), en el Sistema CGS.

La relación que existe entre ambas unidades es 1 T = $= 10^4$ Gs.

Se dice que existe una inducción de un tesla cuando el flujo de un weber atraviesa perpendicularmente una superficie de un metro cuadrado.

$$1 \text{ tesla} = \frac{1 \text{ weber}}{1 \text{ m}^2}$$

$$B = \frac{\Phi}{S}$$

Actividad resuelta 10.1

¿Cuál es la inducción magnética existente en la cara plana del polo de un imán recto de 30 cm^2 de superficie cuando es atravesado por un flujo magnético de 0,009 Wb? Expresa el resultado en teslas.

Solución:

$$B = \frac{\Phi}{S} = \frac{0{,}009}{0{,}003} = 3 \text{ T}$$

$$30 \text{ cm}^2 = \frac{30}{10.000} = 0{,}003 \text{ m}^2$$

Actividad resuelta 10.2

¿Cuál será el flujo magnético que existe en el campo magnético producido por una bobina si esta tiene un núcleo de 20 cm^2 de superficie y la inducción magnética en ella es de 1,5 teslas?

Solución:

Despejando de la fórmula general:

$\Phi = B \cdot S = 1{,}5 \cdot 0{,}002 = 0{,}003$ Wb = 3 mWb (miliweber)

10.3.3. Fuerza magnetomotriz ($\mathcal{F}$)

Se puede decir que es la capacidad que posee la bobina de generar líneas de fuerza en un circuito magnético. La fuerza magnetomotriz aumenta con la intensidad de la corriente que fluye por la bobina y con el número de espiras de esta.

$$\mathcal{F} = N \cdot I$$

$\mathcal{F}$ = Fuerza magnetomotriz en amperio-vuelta (Av).

N = Número de espiras.

I = Intensidad de corriente (A).

© Ediciones Paraninfo

Actividad resuelta 10.3

Para el funcionamiento de un electroimán se necesita una fuerza magnetomotriz de 500 Av. Indica dos posibilidades de conseguirlo.

Solución:

Si fabricamos una bobina con 500 espiras, el número de amperios que tendremos que hacer pasar por ella será de:

$$\mathcal{F} = N \cdot I, \text{ despejando } I = \frac{\mathcal{F}}{N} = \frac{500}{500} = 1 \text{ A}$$

¿Y si la fabricamos con 100 espiras?

$$I = \frac{500}{100} = 5 \text{ A}$$

Para la fabricación de electroimanes muy potentes, como por ejemplo los que se utilizan para suspender en un colchón magnético un tren de alta velocidad sobre un monorraíl, se necesitan fuerzas magnetomotrices muy elevadas. Es decir, bobinas con muchas espiras que son atravesadas por grandes intensidades de corriente. Para evitar fabricar bobinas de grandes dimensiones se utilizan materiales superconductores. De esta forma se consiguen potentísimos campos magnéticos con pocas espiras y corrientes de miles de amperios, que no calientan los superconductores por el efecto Joule por carecer estos de resistencia eléctrica.

Actividad resuelta 10.4

Calcula la intensidad del campo en el interior de la bobina de la Figura 10.18. El número de espiras de la misma es de 300 y la corriente 10 A.

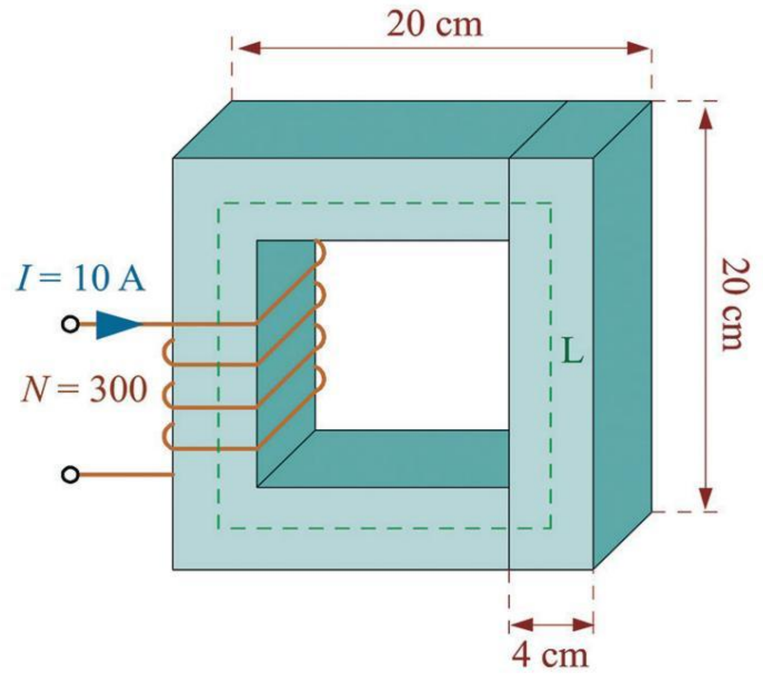


Figura 10.18.

Solución:

Primero determinamos la línea media por donde se van a establecer las líneas de campo. Para ello observamos las dimensiones del núcleo de la bobina:

$$L = 16 + 16 + 16 + 16 = 64 \text{ cm} = 0{,}64 \text{ m}$$

$$H = \frac{N \cdot L}{L} = \frac{300 \cdot 10}{0{,}64} = 4.687{,}5 \text{ Av/m}$$

10.3.4. Intensidad de campo magnético (*H*)

Nos indica lo intenso que es el campo magnético. La intensidad de campo en una bobina depende de la fuerza magnetomotriz ($N \cdot I$). Ahora bien, cuanto más larga es la bobina, más se dispersan las líneas de campo, lo que da como resultado una intensidad de campo más débil; por lo que se puede decir que, para una fuerza magnetomotriz constante, la intensidad de campo (H) es inversamente proporcional a la longitud media de las líneas de campo, tal como se expresa en la siguiente ecuación:

$$H = \frac{N \cdot I}{L}$$

H = Intensidad del campo en amperio-vuelta/metro (Av/m).

N = Número de vueltas de la bobina.

I = Intensidad de la corriente (A).

L = Longitud de la bobina (m).

Para el cálculo de la intensidad de campo magnético en una bobina se pueden dar dos casos que convendría aclarar:

a) **En una bobina con núcleo de aire (como el de la Figura 10.16).** En este caso solo se puede calcular la intensidad del campo magnético en el interior de la bobina, ya que en el exterior el campo se dispersa y por tanto la intensidad disminuye. Para estos casos se toma como longitud exclusivamente lo que mide el largo de la bobina.

b) **En una bobina con núcleo de hierro cerrado (como el de la Figura 10.18).** Para estos casos el núcleo magnético conduce las líneas de campo a través de todo el núcleo, por lo que la intensidad de campo tiende a ser uniforme a lo largo de todo el núcleo de hierro. En estos casos la longitud que se toma para el cálculo se corresponde con la longitud media de todo el núcleo de hierro (en este caso, y por lo general, la longitud resulta ser más larga que la de la propia bobina).

© Ediciones Paraninfo

10.3.5. Reluctancia ($\Re$)

La reluctancia de un material nos indica si este deja establecer las líneas de fuerza en mayor o menor grado. Los materiales no ferromagnéticos, como el aire, poseen una reluctancia muy elevada. En cierta forma la reluctancia es un concepto similar al de resistencia en un circuito eléctrico, hasta tal punto que podemos establecer una ley de Ohm para los circuitos magnéticos: el flujo que se establece en un circuito magnético es proporcional a la fuerza magnetomotriz proporcionada por la bobina e inversamente proporcional a la reluctancia del medio por donde se establecen las líneas de fuerza del campo magnético:

$$\Phi = \frac{\mathcal{F}}{\Re}$$

Esta expresión también se conoce por **ley de Hopkinson.**

La reluctancia es una característica propia de cada material magnético, y de la ley de Hopkinson se deduce que:

$$\Re = \frac{\mathcal{F}}{\Phi}$$

Las unidades que le corresponden son: Av/Wb

Actividad resuelta 10.5

Calcula la reluctancia que posee el núcleo de un electroimán si al hacer circular 5 A por la bobina de 1.000 espiras se ha establecido un flujo magnético de 5 mWb.

Solución:

La fuerza magnetomotriz de la bobina del electroimán es:

$$\mathcal{F} = N \cdot I = 1.000 \cdot 5 = 5.000 \text{ Av}$$

Si se establecen en el núcleo de hierro 5 mWb, eso significa que su reluctancia es:

$$\Re = \frac{F}{\Phi} = \frac{5.000}{0{,}005} = 1.000.000 \text{ Av/Wb}$$

10.4. Curva de magnetización. Saturación

Cuando se somete una sustancia a la acción de un campo magnético creciente H, la inducción magnética que aparece en ella también aumenta en una relación determinada. Por lo general, esta relación (B-H) no es constante, por lo que es de gran utilidad conocer la curva de magnetización, que representa el valor de la inducción en función de la intensidad de campo en cada material. En la Figura 10.19 se muestra el montaje que podría realizarse para la toma de datos en un ensayo para la obtención de la curva de magnetización de un determinado material magnético.

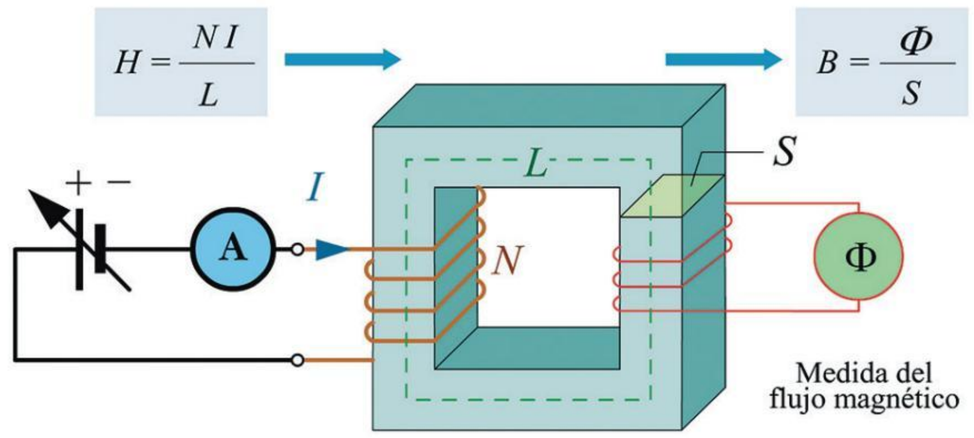


Figura 10.19. Ensayo para la obtención de la curva de magnetización.

En la curva de la Figura 10.20 se ha representado la relación B-H de un hierro dulce. En ella se puede apreciar que para valores de intensidad de campo de hasta 200 Av/m (tramo a-b), la inducción magnética crece proporcionalmente hasta 1,2 T. A partir de este punto aparece un punto de inflexión en la curva, y a aumentos de la intensidad de campo les corresponden aumentos pequeñísimos de inducción magnética. A partir de ese punto se dice que el hierro ha alcanzado la **saturación magnética.**

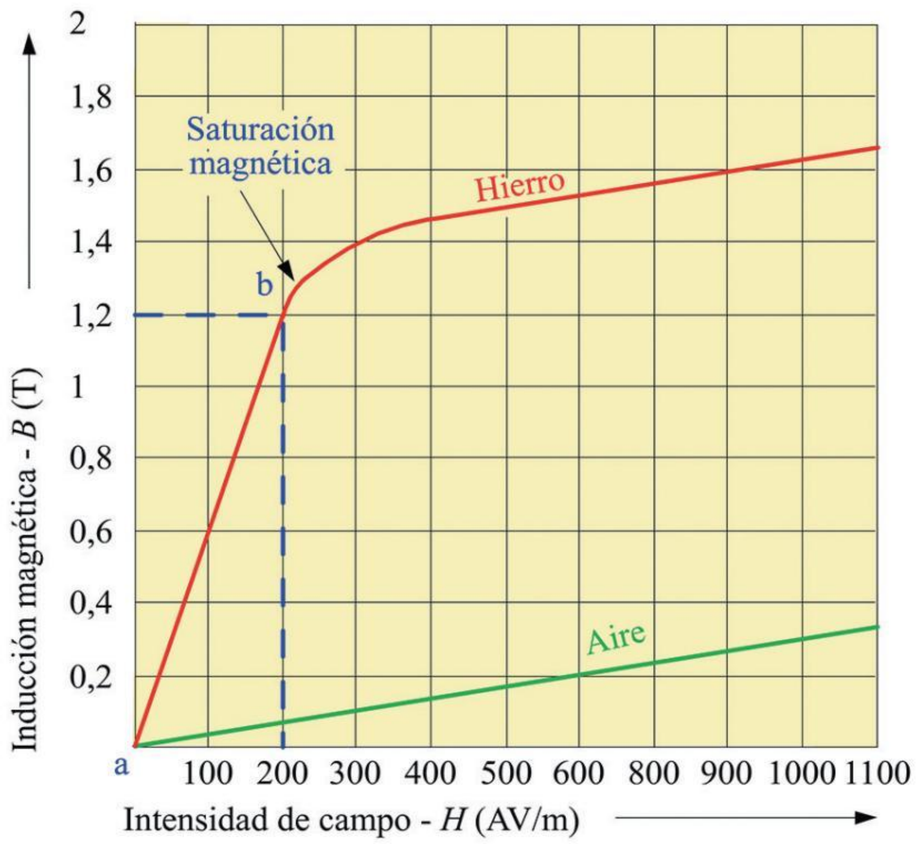


Figura 10.20. Curva de magnetización.

Para explicar el fenómeno de la saturación magnética se puede recurrir a la teoría molecular de los imanes: cuando se introduce en una bobina un núcleo de una sustancia ferromagnética y se hace circular una corriente eléctrica por dicha bobina, aparece un campo magnético en su interior, de intensidad H, que orienta un cierto grado las moléculas magnéticas de dicha sustancia, lo que refuerza el campo con una inducción B. Un aumento de la intensidad de la corriente trae como consecuencia un aumento de H; esto

© Ediciones Paraninfo

hace orientarse un poco más las moléculas magnéticas, lo que se ve reflejado en un nuevo aumento de la inducción. Si seguimos aumentando la intensidad de la corriente, y con ella H, llega un momento en que las moléculas magnéticas están ya totalmente orientadas, y por mucho que se aumente la intensidad del campo, este ya no se ve reforzado. Se ha alcanzado la saturación magnética.

En la Figura 10.20 también se ha incluido la curva de magnetización del aire, donde se observa un crecimiento pequeño pero constante de la inducción magnética alcanzada respecto a la intensidad de campo de la bobina.

10.5. Permeabilidad magnética

Se puede comprobar experimentalmente que al introducir en el núcleo de una bobina una barra de hierro, se aprecia un notable aumento de las propiedades magnéticas de dicha bobina. Por esta razón, siempre que deseemos producir campos magnéticos intensos utilizaremos núcleos de hierro, como es el caso de los electroimanes.

Cuando se introduce en el núcleo de una bobina una sustancia ferromagnética, se aprecia un aumento de líneas de fuerza en el campo magnético. Si llamamos B_0 a la inducción magnética que produce el electroimán con un núcleo de aire, y B a la inducción magnética conseguida al introducir una sustancia ferromagnética, tendremos que:

$$B = \mu_r \cdot B_0$$

μ_r es el poder que posee la sustancia ferromagnética de multiplicar las líneas de campo. A este parámetro se lo conoce por el nombre de permeabilidad. En este caso, se trata de la **permeabilidad relativa** con respecto al aire o al vacío.

Este fenómeno lo podemos explicar valiéndonos de la teoría molecular de los imanes: la bobina con núcleo de aire produce un número determinado de líneas de fuerza. Al introducir un trozo de hierro, este se ve sometido a la acción de estas líneas de fuerza y sus moléculas magnéticas tienden a orientarse. El núcleo de hierro ahora es un imán temporal que refuerza la acción del campo magnético original.

En la práctica, es más usual utilizar el concepto de **permeabilidad absoluta** (μ). Esta relaciona la intensidad de campo que produce la bobina (H) con el nivel de inducción magnética alcanzado al introducir una sustancia ferromagnética en el núcleo.

$$\mu = \frac{B}{H}$$

O lo que es lo mismo: $B = \mu \cdot H$, donde se puede apreciar el poder multiplicador de la permeabilidad.

Las unidades de permeabilidad en el SI se dan en henrios/metro (H/m).

Cada sustancia magnética tiene su propio coeficiente de permeabilidad. Cuanto mayor es este coeficiente, mejores propiedades magnéticas poseerán estas sustancias. Como estudiaremos a continuación, la permeabilidad de los materiales no es constante, y depende sobre todo de los niveles de inducción a que se los someta.

La **permeabilidad del aire o el vacío** en el S.I. es:

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$$

Con esta expresión relacionamos la permeabilidad absoluta con la relativa:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$

Actividad resuelta 10.6

Determina la permeabilidad absoluta y relativa que aparecerá en el núcleo de hierro de un electroimán si se ha medido un flujo magnético de 5 mWb. Los datos que se conocen son: $N = 500$ espiras; $I = 15$ A; longitud media del núcleo = = 30 cm; superficie recta del núcleo = 25 cm^2.

Solución:

Primero calculamos la inducción magnética:

$$B = \frac{\Phi}{S} = \frac{0{,}005}{0{,}0025} = 2 \text{ T}$$

La intensidad de campo en la bobina es:

$$H = \frac{N \cdot I}{L} = \frac{500 \cdot 15}{0{,}3} = 25.000 \text{ Av/m}$$

La permeabilidad absoluta es entonces:

$$\mu = \frac{B}{H} = \frac{2}{25.000} = 0{,}00008 \text{ H/m}$$

La permeabilidad relativa:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = \frac{0{,}00008}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} = 64$$

Este último resultado nos indica que las líneas de campo son 64 veces mayores con el núcleo de hierro que con un núcleo de aire.

© Ediciones Paraninfo

Actividad resuelta 10.7

Una bobina posee 300 espiras, una longitud de 24 cm y está bobinada sobre un cilindro de 35 cm^2 de sección. Determina la inducción (el flujo magnético alcanzado) si el núcleo es de aire y se hace circular por la bobina una corriente de 20 A.

Solución:

Primero determinamos la intensidad del campo magnético generado por la bobina:

$$H = \frac{N \cdot I}{L} = \frac{300 \cdot 20}{0{,}24} = 25.000 \text{ Av/m}$$

Aplicando el concepto de permeabilidad absoluta, tendremos que el nivel de inducción alcanzado con un núcleo de aire es:

$$B = \mu_0 \cdot H = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 25.000 = 0{,}03 \text{ T}$$

El flujo magnético para una sección transversal de la bobina de 35 cm^2 es:

$$\Phi = B \cdot S = 0{,}03 \cdot 35 \cdot 10^{-4} = 0{,}105 \cdot 10^{-3} \text{ Wb} = 0{,}105 \text{ mWb}$$

Los datos obtenidos en los ensayos de magnetización de diferentes sustancias se pueden reflejar también en tablas como la Tabla 10.1.

Tabla 10.1. Relación entre *H* y *B* para diferentes niveles de inducción de varias sustancias ferromagnéticas

B (T)	*H* (Av/m)		
	Hierro forjado	Chapa normal	Chapa al silicio
0,1	80	50	90
0,3	120	65	140
0,5	160	100	170
0,7	230	180	240
0,9	400	360	350
1,1	650	675	530
1,3	1.000	1.200	1.300
1,5	2.400	2.200	5.000
1,6	5.300	3.500	9.000
1,7	7.000	6.000	15.500
1,8	11.000	10.000	27.500
1,9	17.000	16.000	—
2	27.000	32.000	—

Con la ayuda de los datos de la Tabla 10.1 es posible comprobar que la permeabilidad de un material no es constante. Tomemos, por ejemplo, la chapa de silicio y calculemos la permeabilidad para los siguientes niveles de inducción: a) 0,7 T; b) 1,3 T, y c) 1,8 T.

a) $\mu = \frac{B}{H} = \frac{0{,}7}{240} = 2{,}9 \cdot 10^{-3}$ H/m

b) $\mu = \ldots = 1 \cdot 10^{-3}$ H/m

c) $\mu = \ldots = 6{,}5 \cdot 10^{-5}$ H/m

En conclusión, la permeabilidad se hace más pequeña según nos acercamos a los niveles de saturación magnética, tal como se muestra en la Figura 10.21.

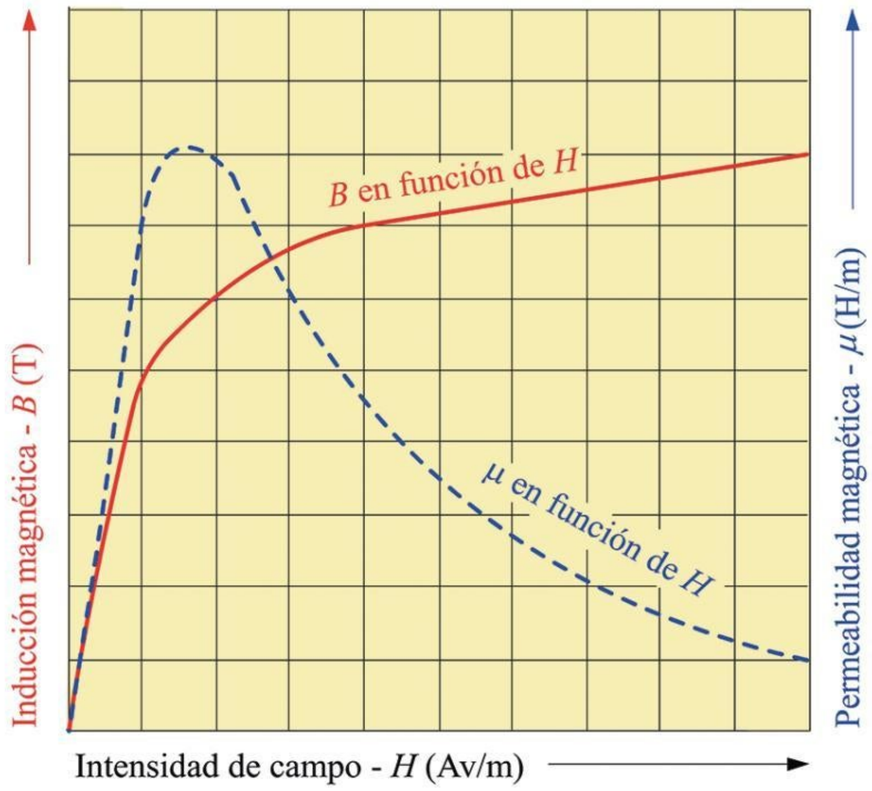


Figura 10.21. Variación de la permeabilidad en los niveles de saturación magnética.

10.6. Histéresis magnética

El estudio de la histéresis tiene una gran importancia en los materiales magnéticos, ya que este fenómeno produce pérdidas en los núcleos de los electroimanes cuando son sometidos a la acción de campos magnéticos alternos. Estas pérdidas se transforman en calor y reducen el rendimiento de los dispositivos con circuitos magnéticos, como transformadores, motores, generadores, etcétera.

La palabra «histéresis» significa remanencia. Después de someter a una sustancia ferromagnética a la acción de un campo magnético, cuando este desaparece, la sustancia manifiesta todavía un cierto nivel de inducción magnética, que recibe el nombre de **magnetismo remanente.**

En la Figura 10.22 se muestra el aspecto de la curva de magnetización de una sustancia ferromagnética cuando es sometida a intensidades de campo magnético alternas.

En el punto **0** la sustancia no ha sido magnetizada nunca y, en consecuencia, la inducción magnética es nula.

© Ediciones Paraninfo

En el tramo (**0-a**) se va aumentando la intensidad de campo *H,* con lo que se consiguen valores crecientes de inducción hasta llegar a la saturación.

En el tramo (**a-b**) se va reduciendo la intensidad de campo en la bobina. La inducción también se reduce, pero no en la misma proporción que antes. En el punto (**b**) se ha anulado la intensidad de campo, sin embargo, la sustancia manifiesta todavía un cierto magnetismo remanente (B_r).

En el tramo (**b-c**) se invierte el sentido del campo magnético (esto se consigue invirtiendo el sentido de la corriente eléctrica que alimenta la bobina del ensayo). En el punto (**c**) la inducción es cero; se ha conseguido eliminar por completo el magnetismo remanente. Para ello, ha habido que aplicar una intensidad de campo (H_c), conocida por el nombre de **campo coercitivo.**

En el tramo (**c-d**) se sigue aplicando una intensidad de campo negativo, con lo que se consiguen niveles de inducción negativos hasta alcanzar la saturación.

En los tramos (**d-e**), (**e-f**) y (**f-a**) se completa el ciclo de histéresis. La curva no pasa otra vez por el punto (**0**) debido a la histéresis.

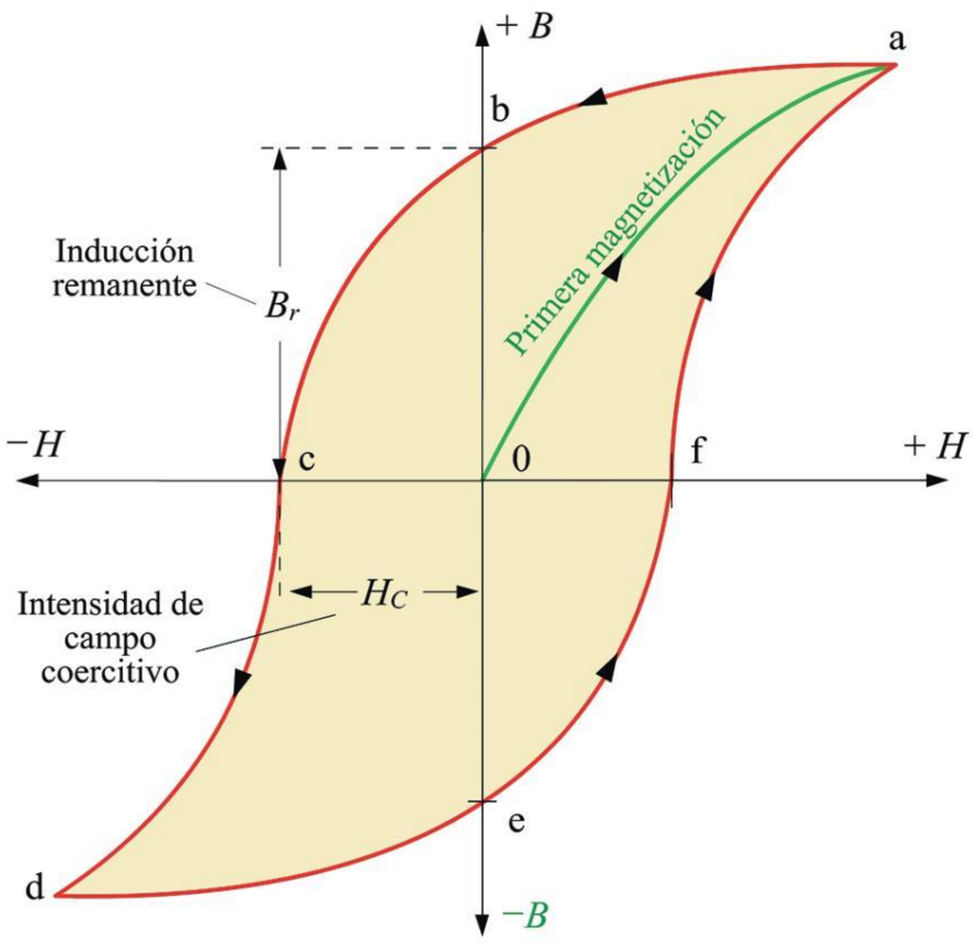


Figura 10.22. Ciclo de histéresis.

Las pérdidas que se originan en los materiales ferromagnéticos debido a la histéresis son proporcionales al área del ciclo. Si nos fijamos en el ciclo, esta área aumenta en gran manera cuando el campo coercitivo H_c es grande. Por esta razón, cuando se eligen materiales ferromagnéticos para la construcción de aparatos que van a funcionar con corriente alterna, se procura que posean un campo coercitivo lo más pequeño posible.

Sin embargo, para la fabricación de imanes permanentes se eligen materiales que posean un campo coercitivo lo más grande posible.

Las pérdidas por histéresis en materiales sometidos a campos producidos por corrientes alternas aumentan con la frecuencia (cuantos más ciclos de histéresis se den por segundo, más calor se producirá).

También la histéresis se puede explicar mediante la teoría molecular de los imanes: al someter a un trozo de hierro a un campo alterno, las moléculas magnéticas se ven forzadas a girar en uno y otro sentido, por lo que se produce una especie de rozamiento molecular que genera calor. Este calor es más grande cuanto más se resisten las moléculas a cambiar de posición.

10.7. Cálculo de circuitos magnéticos

Se puede decir que un circuito magnético es por donde se establecen las líneas de campo. Para determinar la fuerza magnetomotriz (los amperios-vuelta) que debe aportar una bobina a un circuito magnético para conseguir un determinado nivel de inducción magnética se utiliza la siguiente expresión:

Como:

$$H = \frac{N \cdot I}{L}$$

de aquí se deduce que:

$$N \cdot I = H \cdot L$$

o lo que es lo mismo:

$$\mathcal{F} = H \cdot L$$

Con esta última expresión, y con la ayuda de las curvas de magnetización o de tablas, como la Tabla 10.1, ya podemos resolver algunas cuestiones.

Actividad resuelta 10.8

En la Figura 10.23 se muestran las dimensiones de un circuito magnético fabricado con chapa al silicio. Se necesita obtener un nivel de inducción magnética de 1,3 T. Calcula la corriente que tendrá que recorrer la bobina si esta posee 750 espiras.

© Ediciones Paraninfo

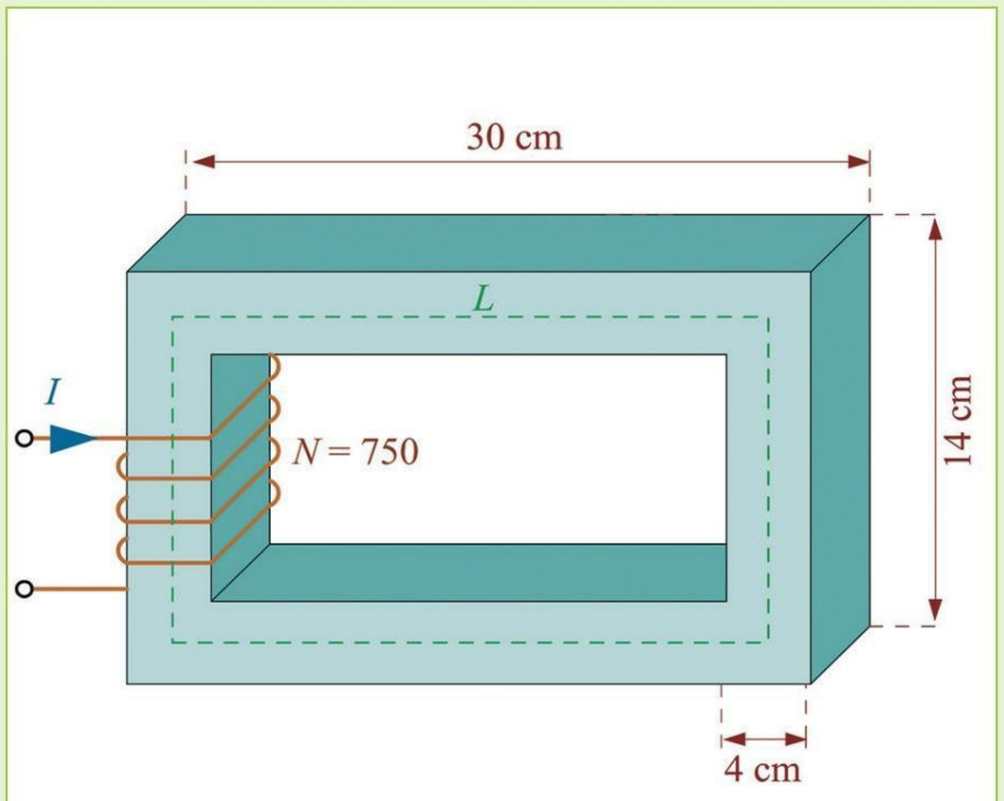


Figura 10.23.

Solución:

Consultando la Tabla 10.1 tenemos que para conseguir una inducción de 1,3 T en chapa al silicio se necesita una intensidad de campo igual a $H = 1.300$ Av.

Según se desprende de la Figura 10.23, la longitud media de las líneas de campo es:

$$L = 26 + 10 + 26 + 10 = 72 \text{ cm} = 0{,}72 \text{ m}$$

La fuerza magnetomotriz necesaria será entonces:

$$\mathcal{F} = H \cdot L = 1.300 \cdot 0{,}72 = 936 \text{ Av}$$

La intensidad de la corriente:

$$I = \frac{\mathcal{F}}{N} = \frac{936}{750} = 1{,}25 \text{ A}$$

En el caso de que el circuito magnético esté compuesto por diferentes partes, se suman las fuerzas magnetomotrices de cada una de las diferentes partes del circuito magnético.

Actividad resuelta 10.9

El circuito magnético de la Figura 10.24 está fabricado con hierro forjado. Se desea obtener en el entrehierro (espacio sin hierro, donde las líneas de campo se tienen que establecer con gran dificultad por el aire) una inducción magnética de 0,9 T. Suponiendo que todo el flujo se conduce por dicho entrehierro y que no se dispersa, determina la intensidad de corriente que habrá que proporcionar a la bobina de 500 espiras.

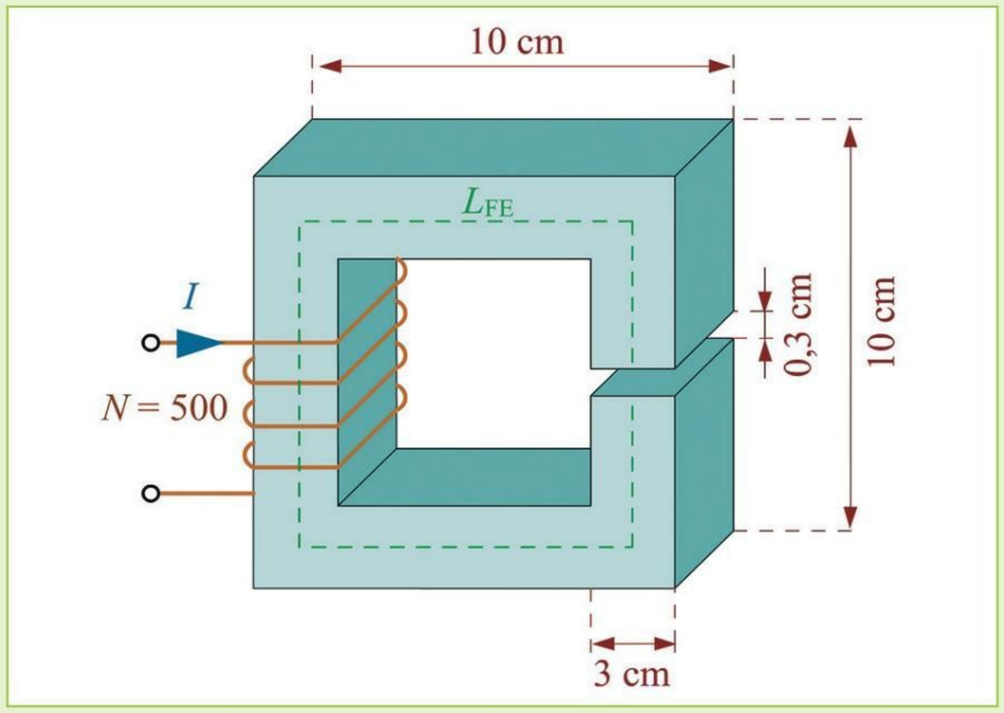


Figura 10.24.

Solución:

La intensidad de campo necesaria para conseguir una inducción de 0,9 T en la parte del circuito magnético formado por el hierro forjado es, según la Tabla 10.1, de 400 Av/m.

La longitud media del circuito formado por hierro es:

$$L_{Fe} = 7 + 7 + 7 + 6{,}7 = 27{,}7 \text{ cm} = 0{,}277 \text{ m}$$

La fuerza magnetomotriz que necesita el hierro es:

$$\mathcal{F}_{Fe} = H_{Fe} \cdot L_{Fe} = 400 \cdot 0{,}277 = 111 \text{ Av}$$

La intensidad de campo en el aire o entrehierro la calculamos aplicando el concepto de permeabilidad y recordando que la permeabilidad del aire es $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$.

$$H = \frac{B}{\mu_0} = \frac{0{,}9}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} = 716.197 \text{ Av/m}$$

Teniendo en cuenta que la longitud en el entrehierro es 0,3 cm (0,003 m), la fuerza magnetomotriz que necesita este tramo del circuito magnético es:

$$\mathcal{F}_{aire} = H \cdot L = 716.197 \cdot 0{,}003 = 2.149 \text{ Av}$$

La fuerza magnetomotriz necesaria para todo el circuito magnético será, por tanto:

$$\mathcal{F} = \mathcal{F}_{Fe} + \mathcal{F}_{aire} = 111 + 2.149 = 2.260 \text{ Av}$$

La intensidad de la bobina de 500 espiras es:

$$I = \frac{\mathcal{F}}{N} = \frac{2.260}{500} = 4{,}52 \text{ A}$$

Actividad propuesta 10.1

El núcleo toroidal de la Figura 10.25 es de chapa al silicio. Calcula el valor de la fuerza magnetomotriz que deberá poseer una bobina arrollada a lo largo de dicho núcleo para obtener una inducción magnética de 1,1 T

© Ediciones Paraninfo

en el entrehierro. Calcula también el flujo magnético, la permeabilidad en el núcleo de chapa y la reluctancia en el núcleo y el entrehierro.

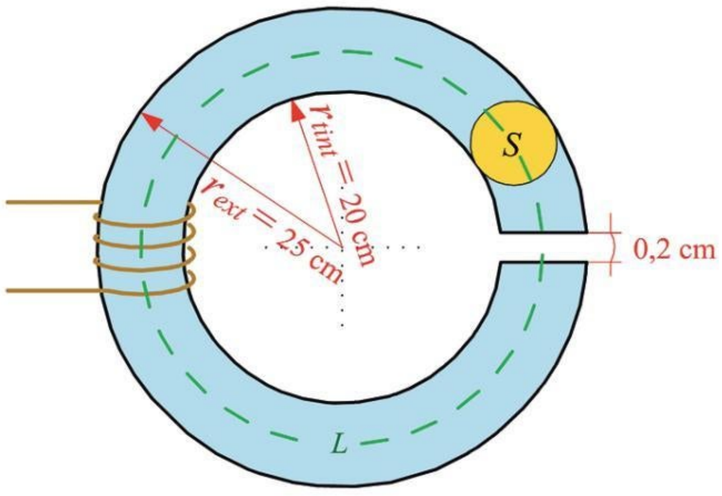


Figura 10.25.

La solución a esta Actividad propuesta la puedes encontrar dentro del MATERIAL WEB elaborado para este texto.

10.8. Electroimanes

Un electroimán consiste en un núcleo de hierro rodeado de una bobina, que se imanta a voluntad cuando hacemos pasar una corriente eléctrica, y se desimanta en el momento en que interrumpimos esta corriente (Figura 10.26).

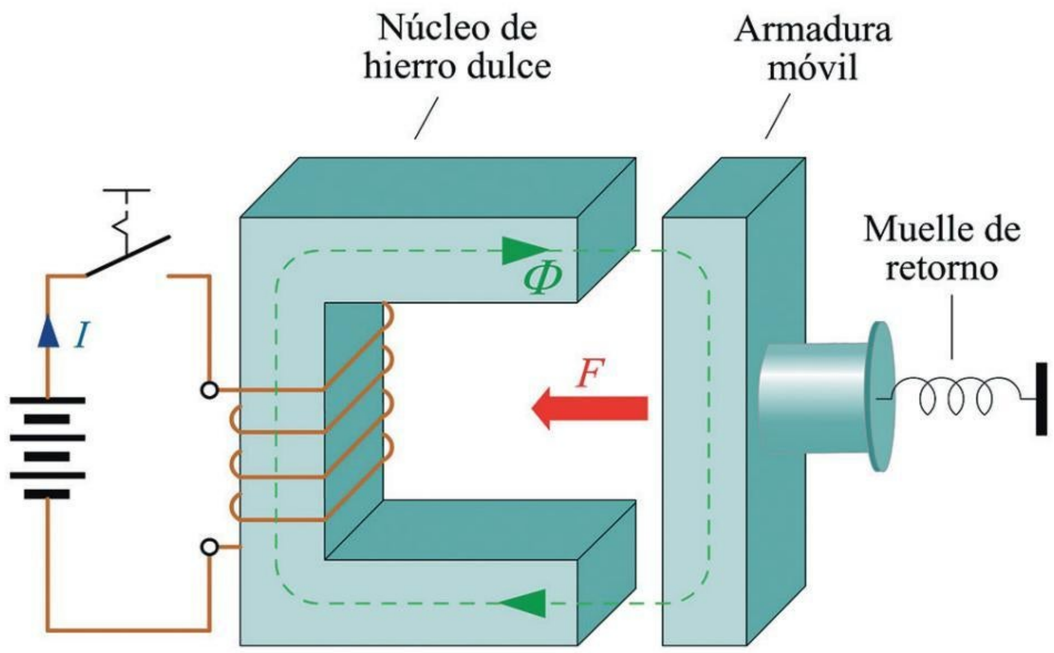


Figura 10.26.

La fuerza con la que atrae un electroimán a una pieza de hierro móvil (armadura) a través del aire o entrehierro se puede calcular con la ayuda de la siguiente expresión:

$$F = 40.000 \cdot B^2 \cdot S$$

F = Fuerza de atracción en Kp.

B = Inducción en el núcleo en T.

S = Superficie de contacto entre el núcleo y el hierro móvil en m^2.

Actividad resuelta 10.10

Determina la fuerza con la que atraerá el electroimán de la Figura 10.27 a la armadura de hierro si la inducción que aparece en el núcleo es de 1,5 T.

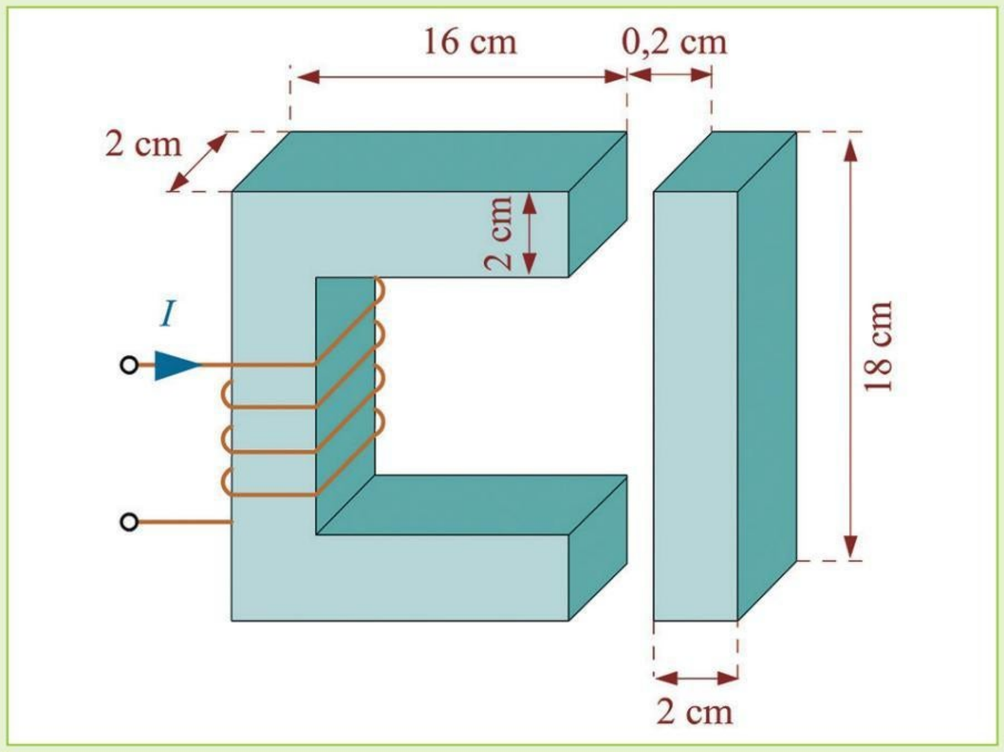


Figura 10.27.

Solución:

La superficie de atracción de uno de los polos es:

$$S = 2 \cdot 2 = 4 \text{ cm}^2$$

Como vamos a calcular la fuerza de atracción de los dos polos, la superficie será entonces:

$$S = 2 \cdot 4 = 8 \text{ cm}^2 = 0{,}0008 \text{ m}^2$$

La fuerza de atracción del electroimán es:

$$F = 40.000 \cdot B^2 \cdot S = 40.000 \cdot 1{,}5^2 \cdot 0{,}0008 = 72 \text{ Kp}$$

Actividad resuelta 10.11

Se desea conseguir que el electroimán de la Figura 10.27 desarrolle una fuerza de atracción de 2,88 Kp. Teniendo en cuenta que el núcleo está fabricado con hierro forjado y que la bobina posee 344 espiras, calcula la intensidad de corriente eléctrica para conseguirlo.

Solución:

Determinaremos primero la inducción magnética que se tiene que dar en el entrehierro:

$F = 40.000 \cdot B^2 \cdot S$; despejando:

$$B = \sqrt{\frac{F}{40.000 \cdot S}} = \sqrt{\frac{2{,}88}{40.000 \cdot 0{,}0008}} = 0{,}3 \text{ T}$$

© Ediciones Paraninfo

Consultando en la Tabla 10.1, tenemos que para conseguir 0,3 T en chapa normal necesitamos aplicar una intensidad de campo igual a 120 Av/m.

La longitud media del núcleo de chapa es:

$$L = 16 + 16 + 16 + 16 = 64 \text{ cm} = 0{,}64 \text{ m}$$

La fuerza magnetomotriz para chapa es:

$$\mathcal{F} = H \cdot L = 120 \cdot 0{,}64 = 77 \text{ Av}$$

La intensidad de campo en el aire es:

$$H = \frac{B}{\mu_0} = \frac{0{,}3}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} = 238.732 \text{ Av/m}$$

La longitud media del entrehierro es:

$$L = 0{,}2 + 0{,}2 = 0{,}4 \text{ cm} = 0{,}004 \text{ m}$$

La fuerza magnetomotriz para el entrehierro es:

$$\mathcal{F} = H \cdot L = 238.732 \cdot 0{,}004 = 955 \text{ Av}$$

La fuerza magnetomotriz para todo el circuito es:

$$\mathcal{F} = 77 + 955 = 1.032 \text{ Av}$$

Dado que la bobina es de 344 espiras, la intensidad con la que habrá que alimentarla es:

$$I = \frac{\mathcal{F}}{N} = \frac{1.032}{344} = 3 \text{ A}$$

10.8.1. Aplicaciones prácticas de los electroimanes

Según como se disponga el núcleo de los electroimanes, estos pueden ser de culata o de núcleo móvil (Figura 10.28). En los electroimanes el núcleo suele ser de un material ferromagnético con un bajo campo coercitivo, de tal forma que solo se imanta cuando las bobinas son recorridas por una corriente eléctrica. En los dos tipos de electroimanes, la parte móvil es atraída hacia el núcleo mientras alimentamos la bobina con corriente eléctrica.

Las aplicaciones de los electroimanes son muy variadas. Seguidamente, exponemos algunas de las más relevantes:

Frenos magnéticos: se aplican sobre todo en ascensores, montacargas y grúas. Las zapatas de frenado se abren mediante un electroimán cuando existe una situación normal, es decir, cuando hay tensión en la red. Si por causa de una avería desaparece el suministro de energía eléctrica, las zapatas se cierran sobre la superficie de un tambor, con lo que frenan el sistema e impiden la caída al vacío de la carga.

Electroválvulas: la válvula abre o cierra el circuito hidráulico o neumático según sea o no alimentada la bobina del electroimán que lleva incorporado. La aplicación de las electroválvulas está muy extendida en todo tipo de aplicaciones industriales, donde la automatización de los fluidos tiene una gran importancia (Figura 10.29)

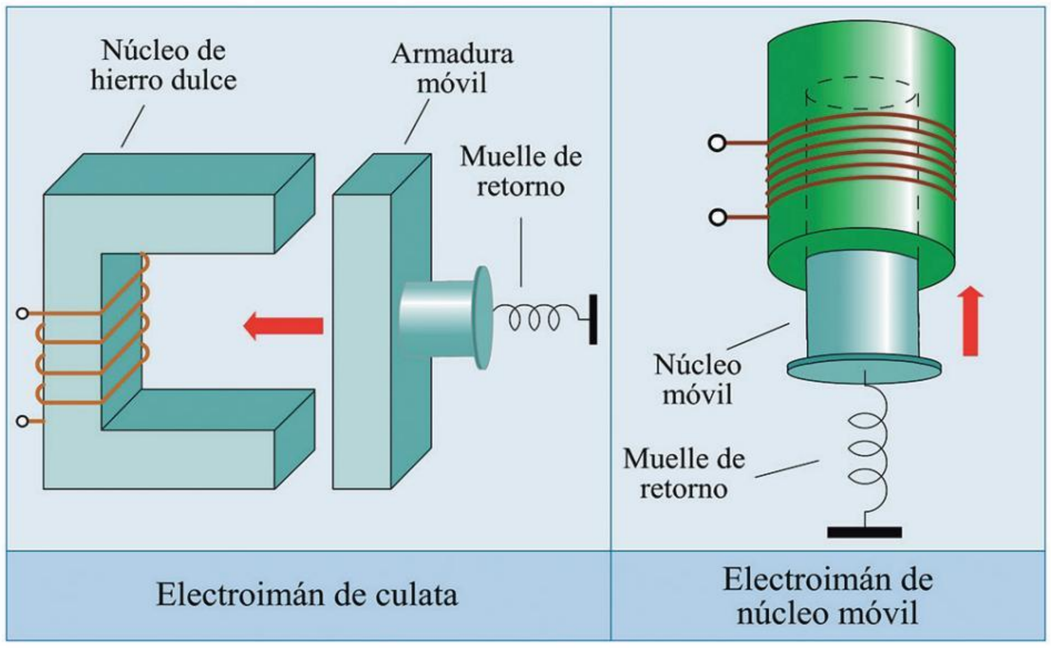


Figura 10.28. Tipos de electroimanes.

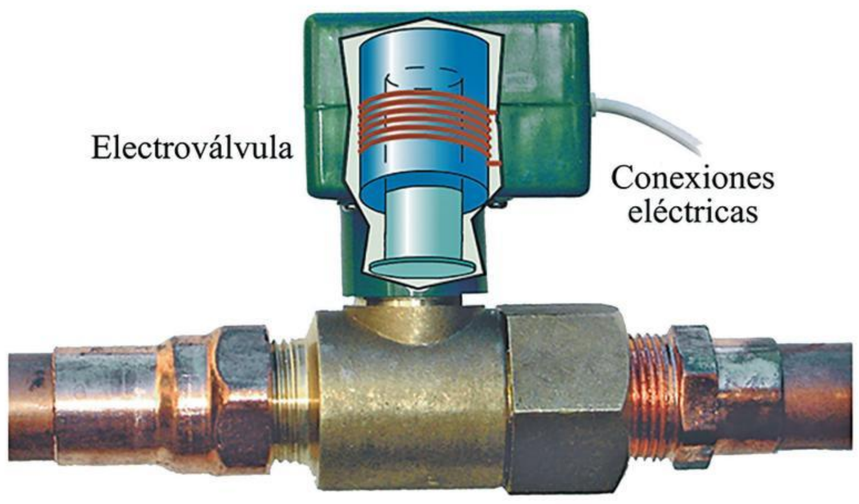


Figura 10.29. Electroválvula.

Por ejemplo, las lavadoras automáticas tienen una electroválvula para abrir el circuito de admisión de agua.

Timbres: los timbres se utilizan para producir señales acústicas (Figura 10.30).

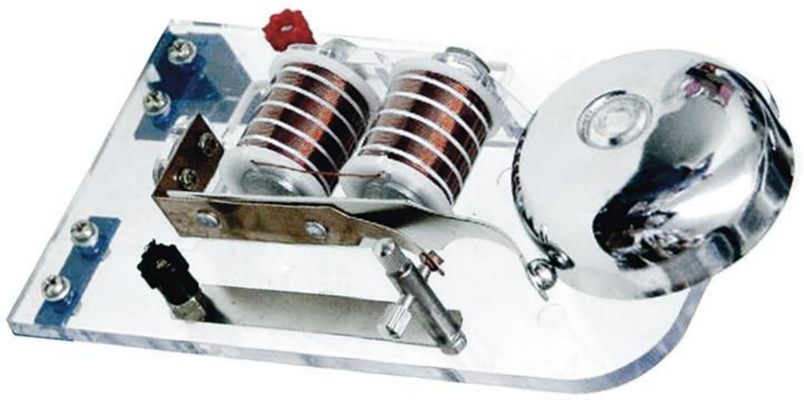


Figura 10.30. Timbre.

Sistemas que separan los materiales magnéticos de los no magnéticos: se utilizan para separar el acero y el hierro del carbón, piedras o minerales, así como para separar los residuos de acero de la arena de moldeo y las virutas y limaduras de los talleres mecánicos.

Relés y contactores: el contactor se podría definir como un interruptor de múltiples contactos que se puede accionar a distancia. El funcionamiento de este dispositivo es

© Ediciones Paraninfo

como sigue (Figura 10.31). Cuando cerramos el interruptor simple, la bobina es atravesada por la corriente eléctrica y genera un campo magnético que hace que el núcleo atraiga a la armadura, arrastrando consigo a los contactos móviles. El resultado es que estos contactos cambian de posición y se cierran.

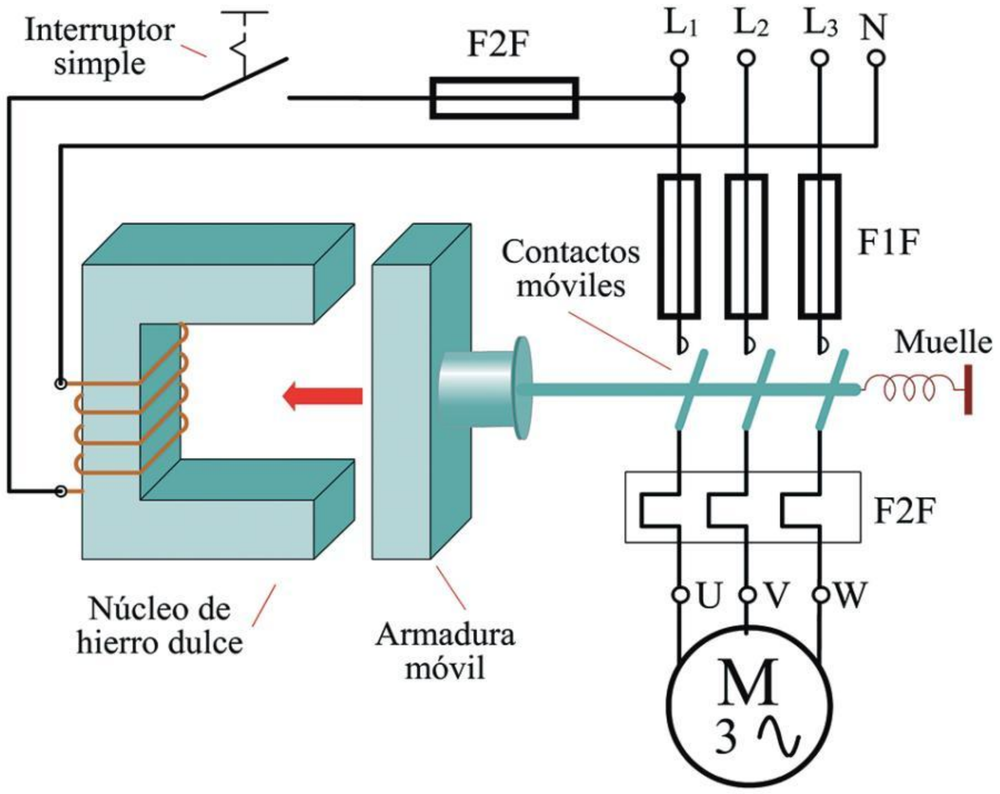
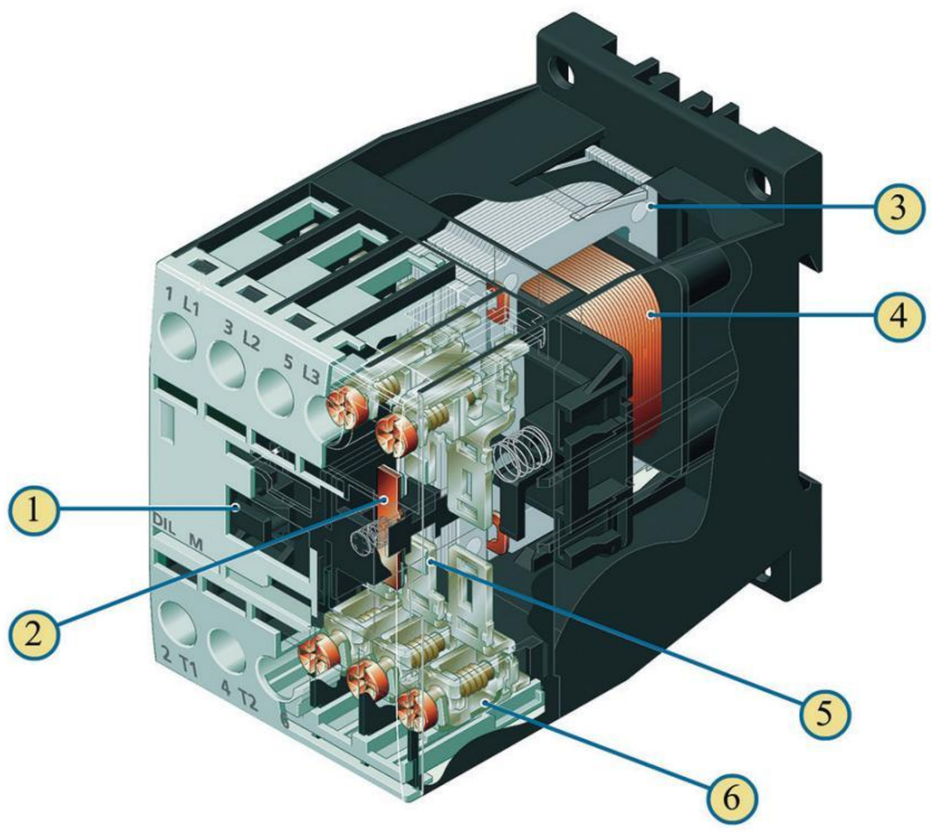


Figura 10.31. Contactor accionando un motor eléctrico trifásico.

La corriente eléctrica que necesita la bobina para crear el campo magnético necesario para que la armadura atraiga hacia sí al núcleo es muy pequeña en relación con la corriente que va a circular por los contactos principales que alimentan al motor. En la Figura 10.32 se muestran las partes de un contactor de estas características y en la Figura 10.33 la constitución de un relé.



1. Acoplamiento para contacto auxiliar
2. Contacto fijo
3. Núcleo del electroimán
4. Bobina
5. Contacto móvil
6. Bornes de contacto

Figura 10.32. Partes de un contactor. (Cortesía de Moeller.)

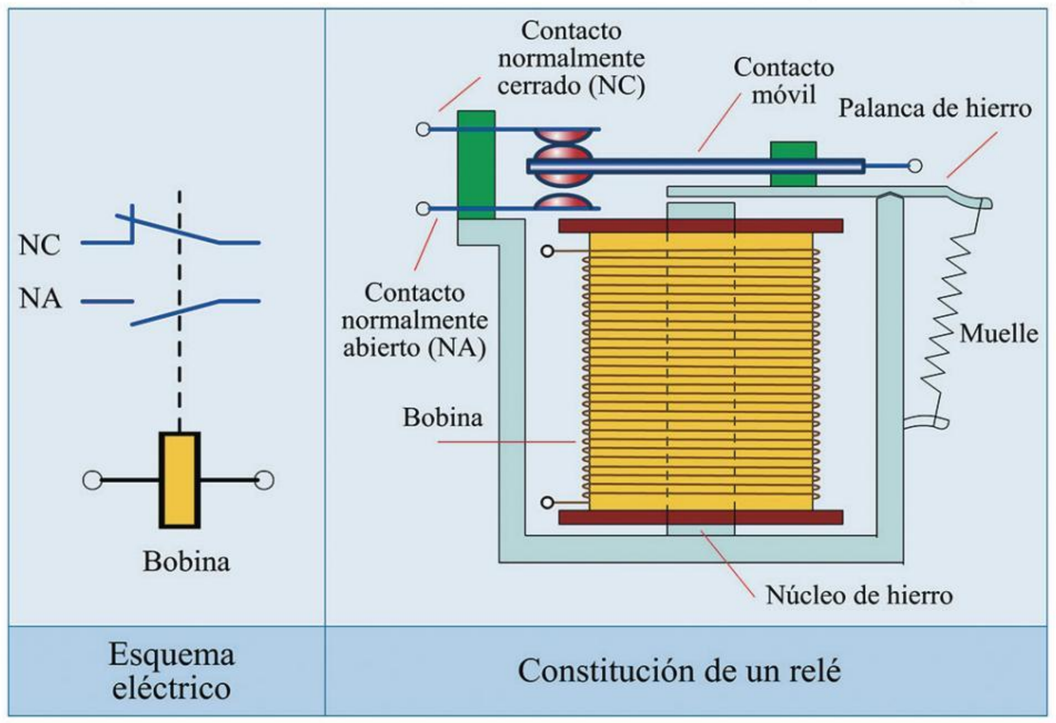


Figura 10.33. Relé.

Nuevos materiales magnéticos: en la actualidad se investiga en la creación de nuevos materiales ferromagnéticos por diferentes procedimientos de laboratorio con el objeto de darles a estos ciertas características que los hagan útiles para el desarrollo de aplicaciones especiales. Como, por ejemplo:

- Dispositivos que poseen una propiedad conocida como «magnetorresistencia». Es decir, materiales en los que la resistencia eléctrica varía cuando son sometidos a la acción de un campo magnético. Esto puede tener aplicaciones como: elementos sensibles o detectores de campos magnéticos, detectores de proximidad magnéticos, etc. Así, por ejemplo, la cabeza lectora del disco duro de un ordenador personal está compuesta por un conjunto de elementos con propiedades magnetorresistivas, de tal forma que su resistencia eléctrica depende del campo magnético que las atraviese. Dado que las unidades de información (bits) se almacenan en el disco duro como si de un pequeño imán se tratase, al pasar la cabeza lectora magnetorresistiva por encima de un bit, esta varía su resistencia y puede enviar la información leída al procesador (Figura 10.34).

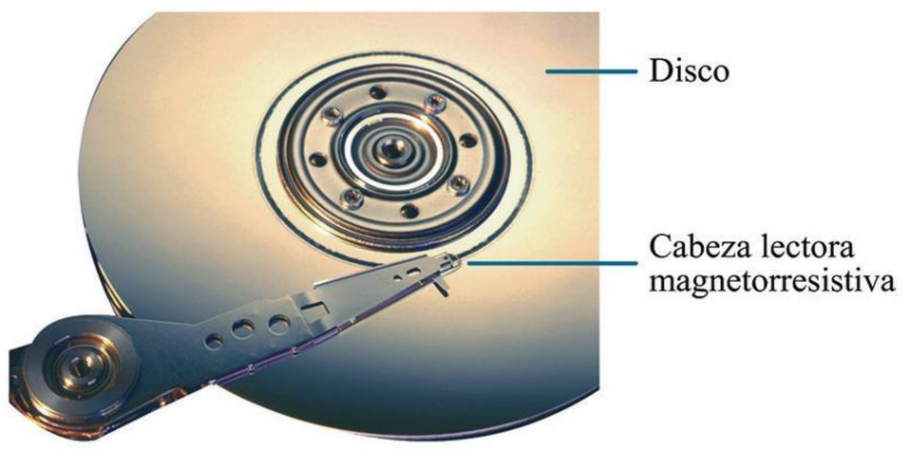


Figura 10.34. Disco duro para PC con magnetorresistencia.

- Etiquetado magnético para evitar el robo de artículos en grandes almacenes.

© Ediciones Paraninfo

Comprobación práctica en el laboratorio

10.1. Propiedades magnéticas de los imanes y electroimanes. Consigue los materiales necesarios para la observación del espectro magnético de imanes e electroimanes, así como la comprobación de las propiedades magnéticas más significativas (atracción y repulsión entre imanes, polaridad de los campos magnéticos generados por conductores y bobinas, etc.). Comprueba también cómo se multiplican las líneas de campo al introducir en una bobina con núcleo de aire una sustancia ferromagnética.

10.2. Dispositivos electromagnéticos. Consigue diferentes dispositivos que funcionen gracias al electromagnetismo, como, por ejemplo, un contactor, una electroválvula, un timbre, un interruptor automático, etc. Analiza las partes que los constituyen e intenta comprobar y explicar su funcionamiento.

© Ediciones Paraninfo

Actividades de comprobación

10.1. ¿Qué es lo que puede causar la pérdida de las propiedades magnéticas en un imán permanente?

a) Corrientes eléctricas elevadas.

b) Golpes y excesos de la temperatura.

c) Disminución de la temperatura.

10.2. ¿Cómo se consigue aumentar el nivel de inducción magnética en una bobina con núcleo de aire?

a) Introduciendo una sustancia ferromagnética en el núcleo.

b) Solo es posible aumentar la inducción magnética aumentando la intensidad por la bobina.

10.3. ¿Cómo es la permeabilidad de los materiales ferromagnéticos?

a) Es un valor constante.

b) Depende de la inducción magnética alcanzada por los materiales.

10.4. Para la construcción de núcleos de electroimanes, transformadores y motores empleamos preferentemente:

a) Acero.

b) Hierro.

10.5. Si un material ferromagnético posee una permeabilidad relativa de 100, calcula su permeabilidad absoluta.

10.6. Un circuito magnético con núcleo de hierro forjado posee una longitud de 10 cm y una sección transversal de 3 cm^2. La bobina tiene 100 espiras y es alimentada por una corriente de 1 A. Con la ayuda de la Tabla 10.1, averigua: H, B, Φ, $\Re$ y $\mathcal{F}$.

10.7. Un núcleo de acero con una inducción de 1,2 T posee una permeabilidad de $4 \cdot 10^{-3}$ H/m. La longitud de la bobina es de 25 cm y la superficie recta del núcleo es de 5 cm^2. Calcula el flujo magnético, la intensidad de campo y la fuerza magnetomotriz.

10.8. El núcleo rectangular de la Figura 10.35 es de chapa al silicio con una sección transversal de 25 cm^2. La bobina posee 500 espiras y es atravesada por una corriente de 10 A. Con la ayuda de los datos presentados en su correspondiente curva de magnetización (Tabla 10.1), determina B, Φ y $\mathcal{F}$.

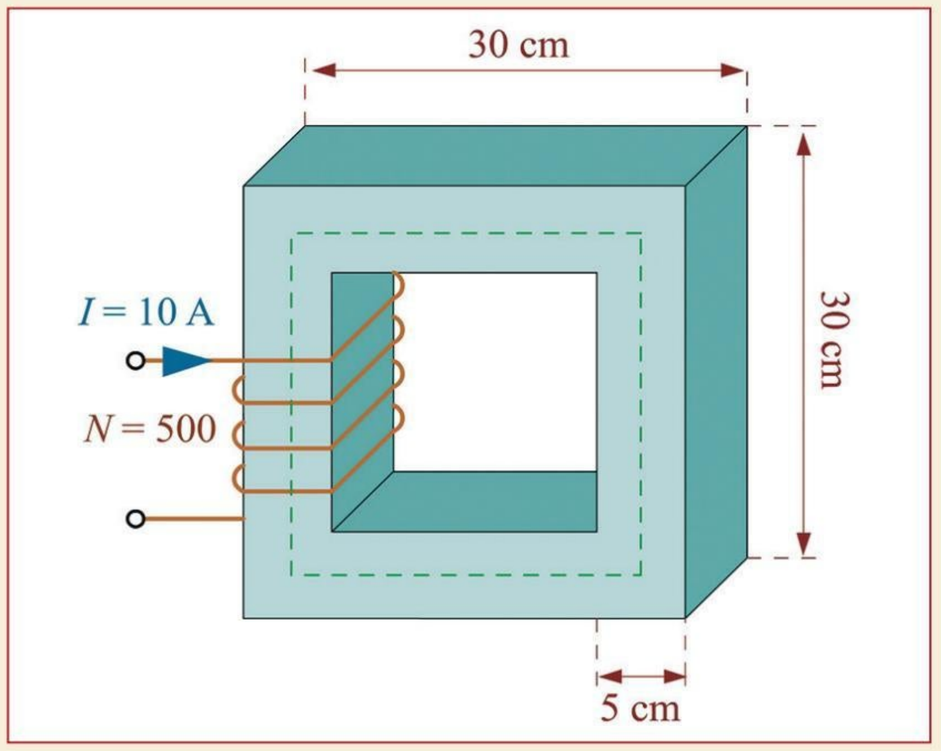


Figura 10.35.

10.9. ¿Cuántos amperios habrá que hacer pasar por la bobina de la Actividad de comprobación anterior para que exista un flujo magnético de 4 mWb?

10.10. El circuito magnético de la Figura 10.36 está fabricado con chapa magnética normal. Se desea obtener en el entrehierro una inducción magnética de 1,1 T. Suponiendo que todo el flujo se conduce por dicho entrehierro y que no se dispersa, determina el número de espiras con las que habrá que fabricar la bobina si se quiere suministrar una corriente de 2 A.

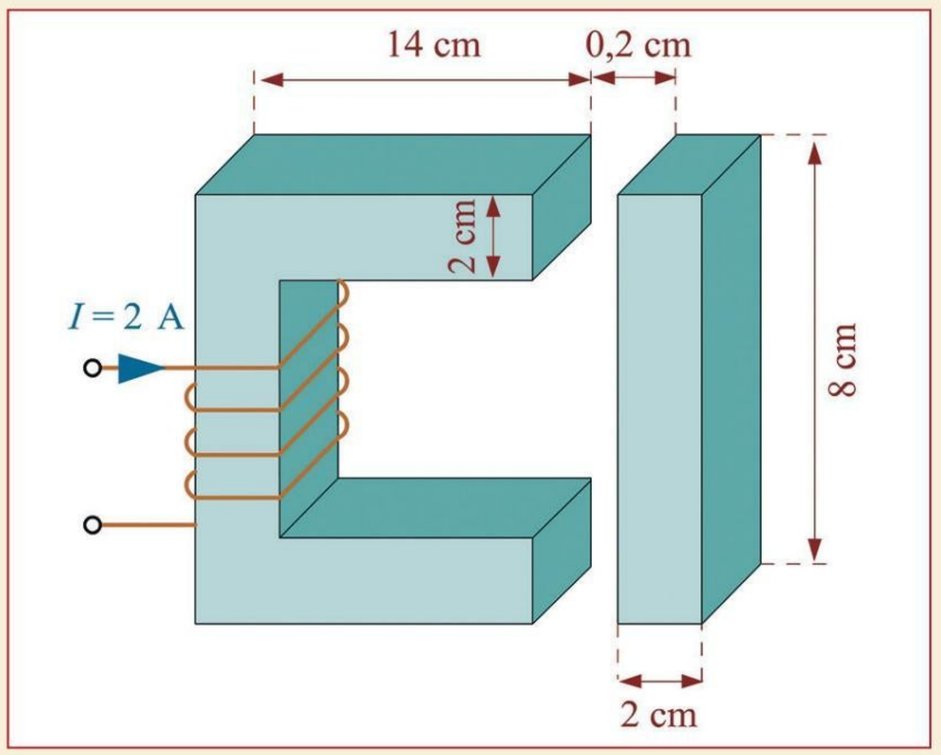


Figura 10.36.

10.11. Determina la fuerza con la que atraerá un electroimán a la armadura de hierro si la inducción que aparece en el núcleo es de 1,3 T y la superficie total de contacto entre el núcleo y el hierro móvil es de 4 cm^2.

© Ediciones Paraninfo

10.12. Se desea conseguir que el electroimán de un contactor desarrolle una fuerza de atracción al bloque de contactos móviles de 2 Kp. Teniendo en cuenta que el núcleo está fabricado con hierro forjado, que la bobina posee 1.000 espiras y que las dimensiones y forma del circuito magnético de dicho electroimán son las que se muestran en la Figura 10.37, calcula la intensidad de corriente eléctrica para conseguirlo.

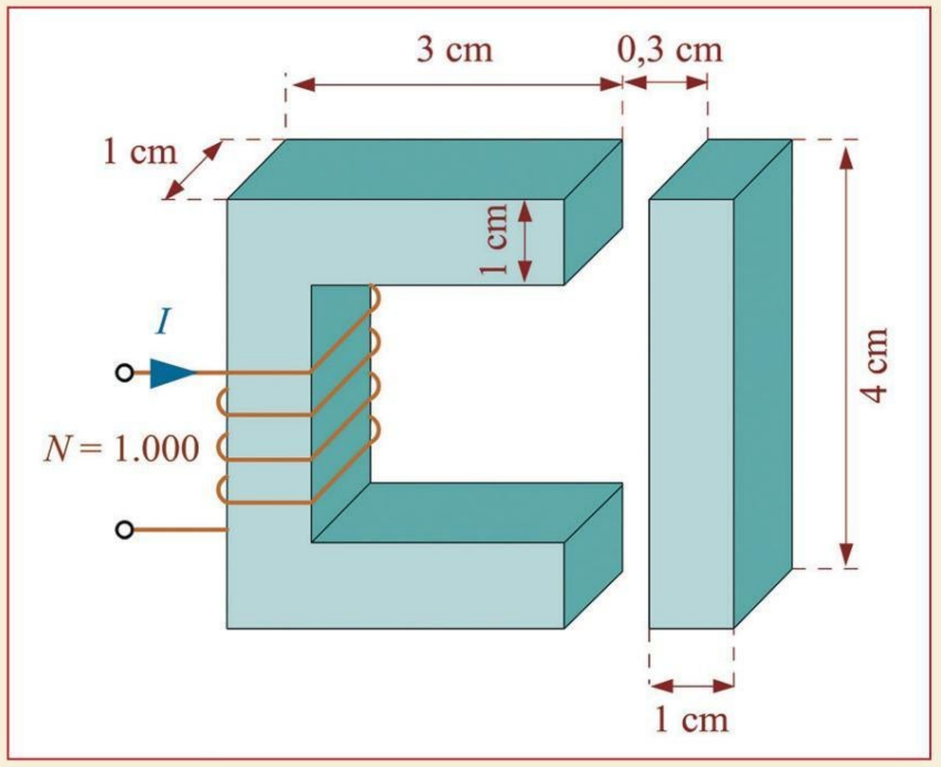


Figura 10.37.

Actividades de evaluación resueltas

A continuación se dan los enunciados de una serie de actividades de evaluación. Estas actividades las podrás encontrar resueltas accediendo al MATERIAL WEB creado para este texto.

10.1. El circuito magnético de la Figura 10.38 está constituido por acero de fundición de 10 cm^2 de sección transversal. Se sabe que l_m = 0,2 m, l_0 = 3 mm y que no existe flujo de dispersión. A partir de los datos de la curva de magnetización de la Tabla 10.2:

a) Calcula el valor de la fuerza magnetomotriz de la bobina para establecer un flujo de 1,5 mWb.

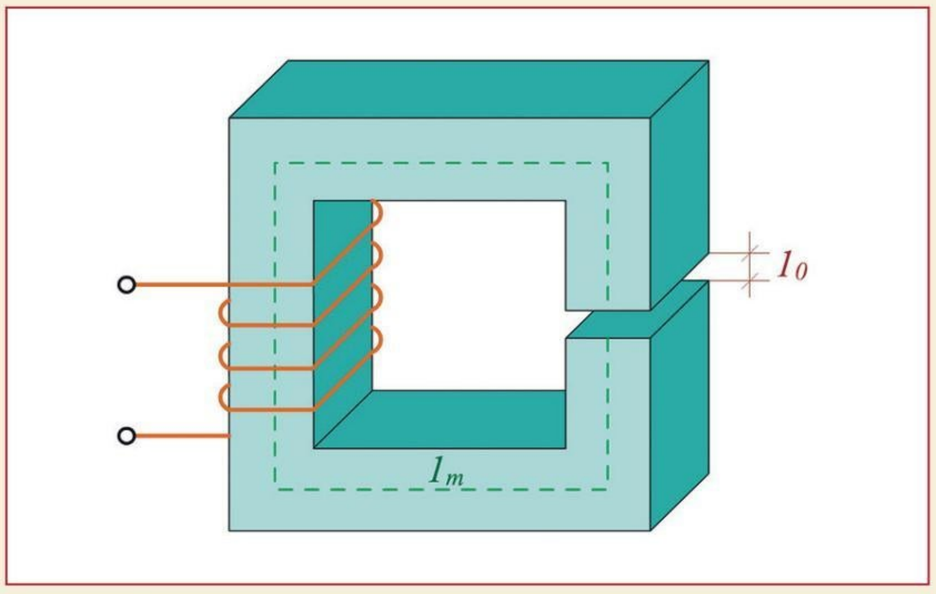


Figura 10.38.

b) Calcula el valor necesario de la fuerza magnetomotriz de la bobina para establecer el mismo flujo de 1,5 mWb, si el entrehierro de longitud l_0 se sustituyera por acero de fundición.

Comprueba el valor obtenido con el apartado (a). (Dato: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Hm^{-1}).

Tabla 10.2. Magnetización de acero de fundición

B(T)	0,5	0,75	1	1,25	1,5	1,7
H(AV/m)	400	605	920	1.500	2.900	5.750

10.2. Un anillo toroidal de 40 cm^2 de sección dispone de un entrehierro de 5 mm, el resto del circuito magnético tiene una longitud media de 1 m y una permeabilidad relativa de 600. Calcula:

a) La fuerza magnetomotriz necesaria para producir un flujo magnético de $6 \cdot 10^{-4}$ Wb.

b) La inducción magnética (*B*) en el núcleo magnético.

c) La intensidad de campo magnético (*H*) en el núcleo magnético y en el entrehierro.

d) El número de vueltas que debe disponer la bobina si la intensidad de corriente que circula por ella es de 1,5 A.

(Dato: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Hm^{-1}).

10.3. Un circuito magnético con núcleo de hierro forjado posee una longitud de 10 cm y una sección transversal de 3 cm^2. La bobina tiene 100 espiras y es alimentada por una corriente de 1 A. Con ayuda de la Tabla 10.3, calcula:

a) La intensidad de campo magnético (*H*) en el núcleo de hierro.

b) La inducción magnética (*B*) en el núcleo de hierro.

c) El flujo magnético (Φ) en el núcleo de hierro.

d) La reluctancia (*R*) del circuito magnético.

(Dato: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Hm).

© Ediciones Paraninfo

Tabla 10.3.

B(T)	*H*(AV/m)
0,1	80
0,3	120
0,5	160
0,7	230
0,9	400
1,1	650
1,3	1.000
1,5	2.400
1,6	5.300
1,7	7.000
1,8	11.000
1,9	17.000

10.4. La Figura 10.39 muestra un arrollamiento de 500 vueltas alrededor de un núcleo de sección 3 cm^2, permeabilidad relativa 400 y radio medio 6 cm. Se desea establecer un flujo magnético de $5 \cdot 10^{-4}$ Wb en el circuito magnético.

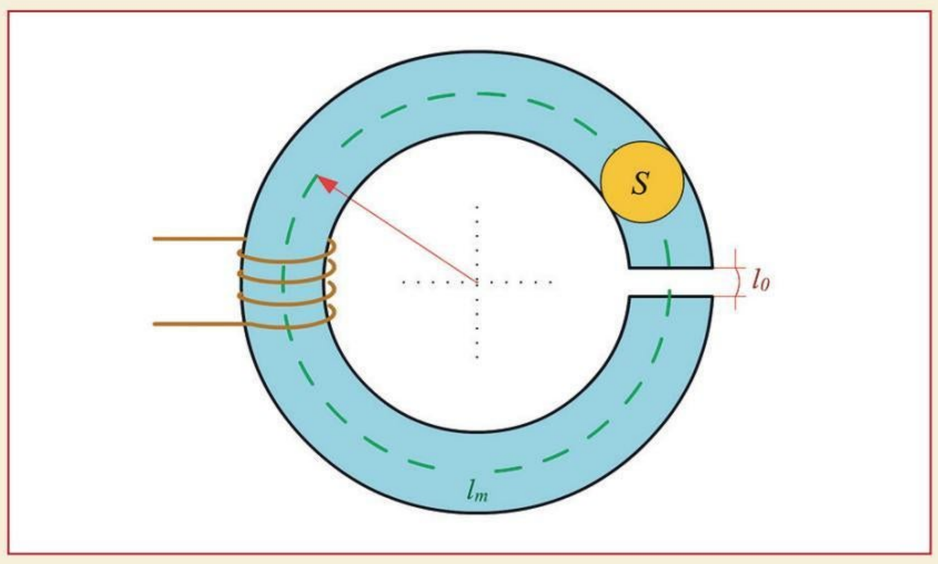


Figura 10.39.

Calcula:

a) Las reluctancias del núcleo y del entrehierro.

b) La corriente necesaria en el hilo del solenoide.

c) La fuerza magnetomotriz en el núcleo y en el entrehierro.

d) El módulo de inducción magnética *B* en el entrehierro.

(Datos: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Hm^{-1}, longitud del entrehierro = = 0,5 cm).

10.5. El núcleo ferromagnético de la Figura 10.40 tiene una longitud media de 75 cm y 50 cm^2 de sección, presentando un entrehierro al aire de l_0 = 3 mm. La curva de magnetización del hierro vale:

$$B = \frac{1{,}5H}{100 + H}$$, (*B* en teslas y *H* en A/m).

Por medio de las bobinas A y B se consigue en el entrehierro un flujo de 4 mWb, en el sentido señalado, cuando la bobina A, de 1.000 espiras, absorbe 3 A y la B, 4 A. Calcula:

a) La permeabilidad y reluctancia del hierro.

b) La intensidad del campo e inducción en el entrehierro.

c) El número de espiras de la bobina B.

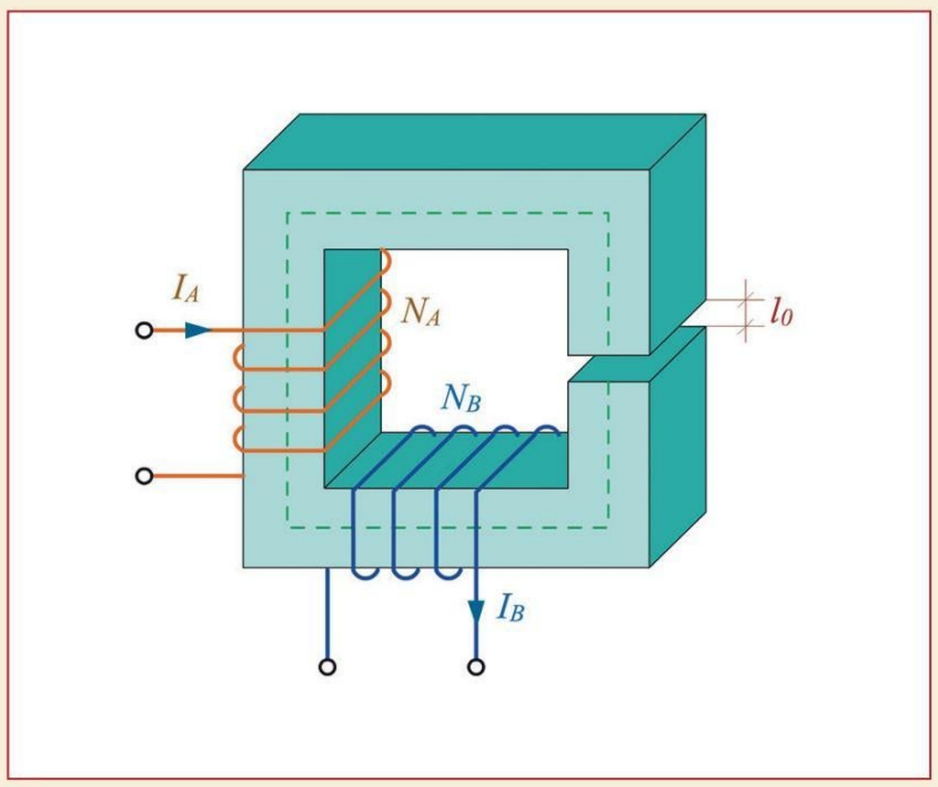


Figura 10.40.

Actividades de ampliación

10.1. Con el fin de conseguir una mayor profundización en la materia, se han incluido los enunciados de una serie de ***«actividades de evaluación propuestas de ampliación (10)»*** para esta unidad que podrás encontrar dentro del MATERIAL WEB elaborado para este texto. Selecciona alguna de estas actividades y encuentra su solución.

© Ediciones Paraninfo

10.2. Busca información en relación con el etiquetado magnético para evitar el robo de artículos en comercios, y resume los aspectos más relevantes de esta tecnología.

A modo de ejemplo, a continuación se expone un resumen de uno de los métodos más utilizados para sistemas antihurto mediante el uso de etiquetas adhesivas acustomagnéticas (AM).

Los sistemas antihurtos acustomagnéticos AM utilizan una etiquetas acustomagnéticas (Figura 10.41) que se adhieren al artículo a proteger.



Figura 10.41. Etiquetas acustomagnéticas.

Cuando una de estas etiquetas pasa por caja, un sistema electrónico desactiva la etiqueta y la deja inactiva para su posterior detección (Figura 10.42).



Figura 10.42. Desactivador de etiquetas acustomagnéticas.

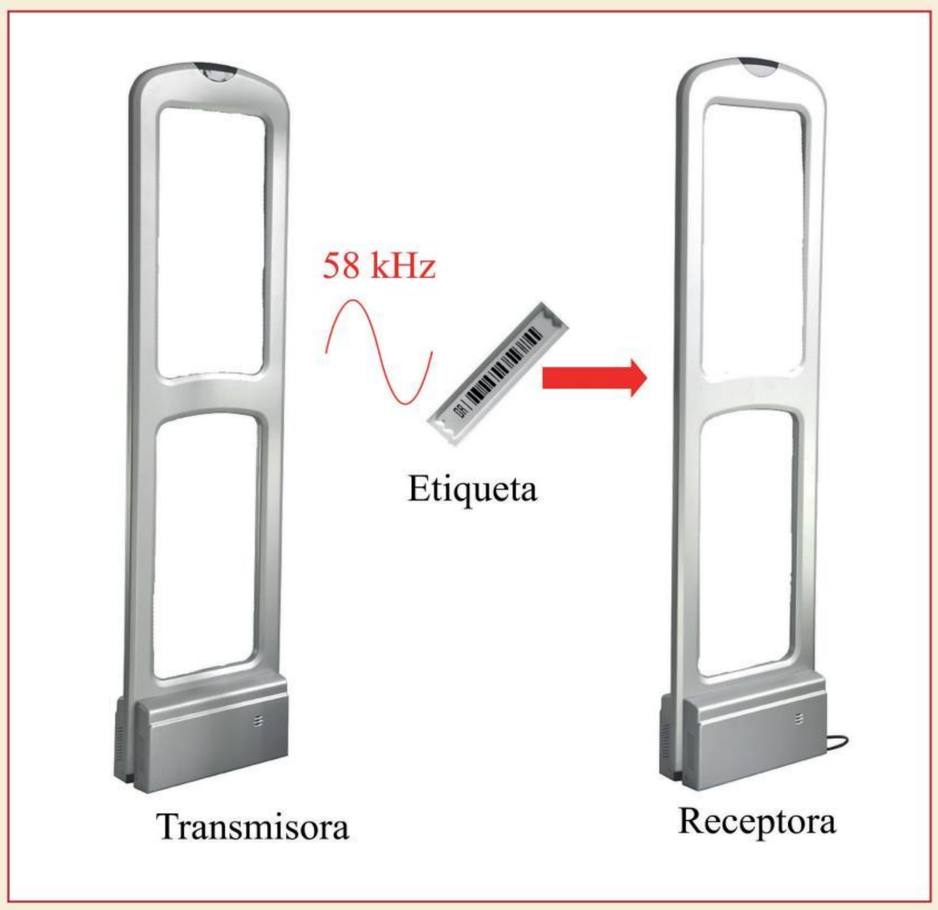


Figura 10.43. Puertas de seguridad con antenas de detección.

En caso de que la etiqueta no esté desactivada, al salir del comercio por la puerta de seguridad, unas antenas la detectan y activan la alarma (Figura 10.43).

Las etiquetas se construyen con diferentes capas, algunas de ellas con material ferromagnético y que aprovechan la propiedad física **magnetostricción.** Esta propiedad consiste en que ciertos materiales se estiran y encogen cuando se encuentran inmersos en un campo magnético alterno. Esto produce una serie de movimientos microscópicos que hace que las láminas de material ferromagnético que poseen las etiquetas de seguridad vibren cuando quedan sometidas a un campo alterno de una determinada frecuencia (Figura 10.44).

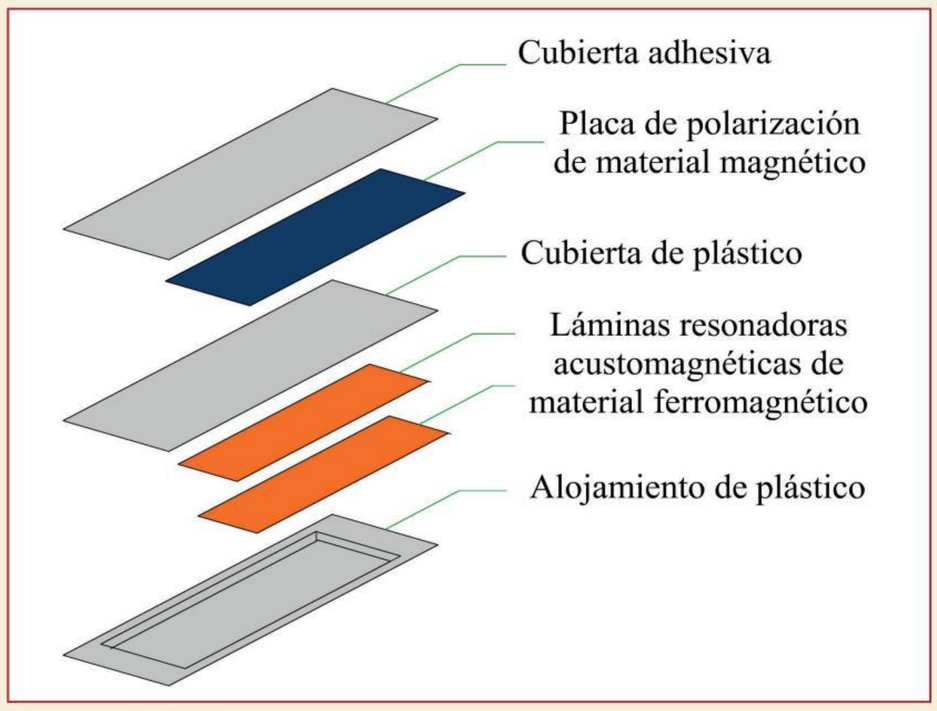


Figura 10.44. Estructura de etiqueta acustomagnética.

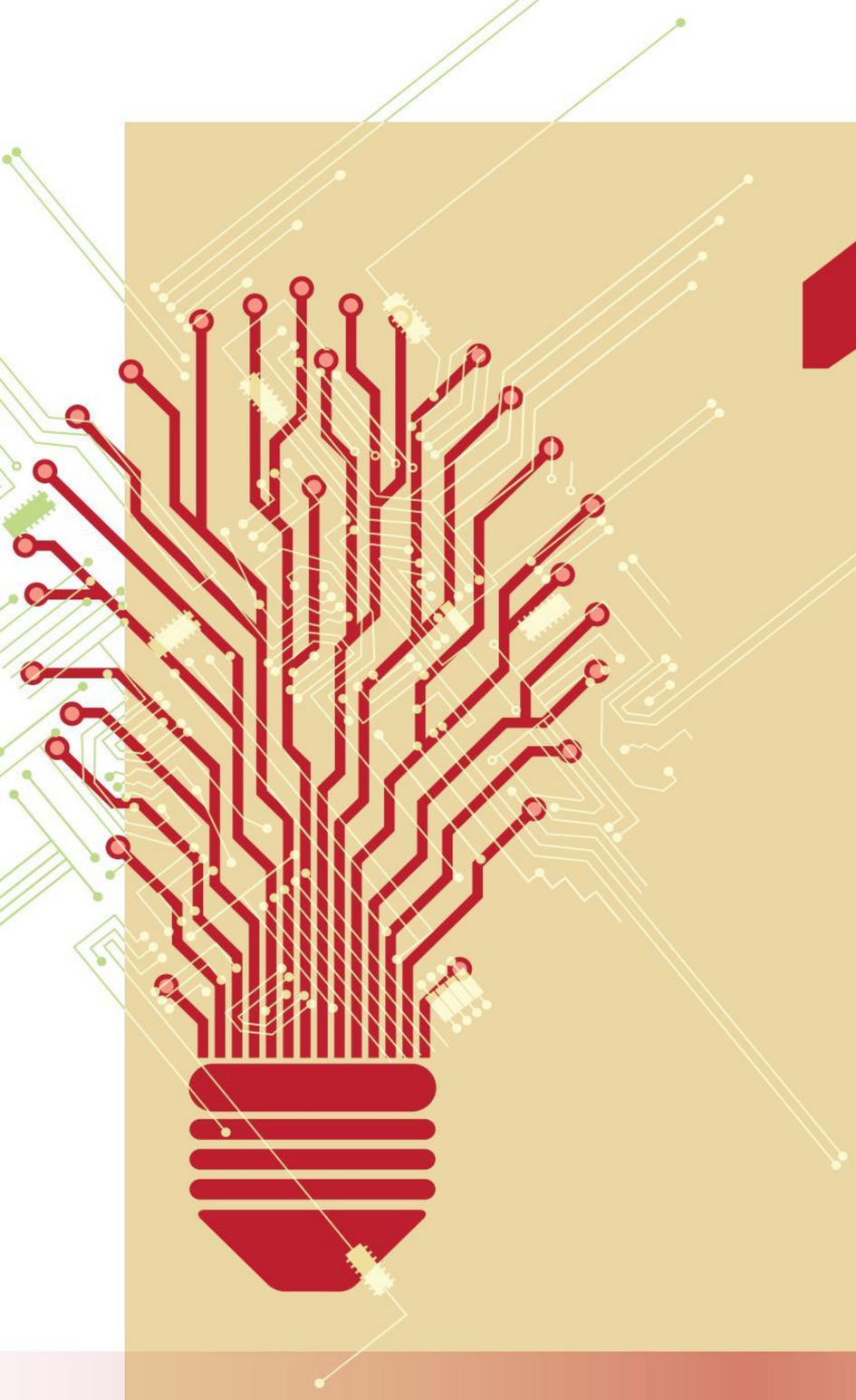
La láminas ferromagnéticas de las etiquetas se cortan a unas dimensiones precisas para que entren en vibración a una frecuencia de resonancia precisa de 58 kHz. Cuando las láminas vibran a esta frecuencia, estas emiten un eco magnético que puede ser detectado por el receptor situado en una antena ubicada en las puertas de seguridad.

Las etiquetas vienen activadas de fábrica, por la placa polarizadora que está imantada. Al pasar la etiqueta por el pago en caja, la lectura del código de barras del producto activa el desactivador AM, que emite un pulso magnético de baja frecuencia que desmagnetiza la placa polarizadora y deja la etiqueta inactiva.

Al salir del comercio se pasa por la puerta de seguridad dispuesta de antenas. Esta puerta dispone de una antena transmisora y otra receptora. La antena transmisora emite pulsos magnéticos de 58 kHz del orden de 100 pulsos por segundo.

Si la etiqueta se ha desactivado al pasar por caja, al estar el polarizador desimantado no entra en resonancia y la antena receptora no lo detecta. En el caso que la etiqueta esté activada, esta entrará en resonancia con los 58 kHz de la antena emisora y emitirá un eco magnético con cada pulso. Estos ecos son captados por la antena receptora que activará la alarma.

© Ediciones Paraninfo



11 Interacción entre la corriente eléctrica y un campo magnético

Contenidos

- **11.1.** Inducción electromagnética
- **11.2.** Corrientes parásitas o de Foucault
- **11.3.** Autoinducción. Bobinas
- **11.4.** Fuerza sobre una corriente eléctrica en el seno de un campo magnético

Cuando movemos un conductor dentro de un campo magnético se produce en el conductor una separación de cargas eléctricas que da lugar a una f.e.m.; a este fenómeno se lo conoce por el nombre de inducción electromagnética.

Gracias al fenómeno de la inducción electromagnética, descubierto por Faraday en 1832, es posible la generación de grandes cantidades de energía eléctrica mediante los alternadores (generadores de C.A.). Aprovechando este fenómeno también funcionan las dinamos (generadores de C.C.), los transformadores y muchos más dispositivos que estudiaremos con más detalle más adelante.

En un generador eléctrico se produce una f.e.m. cuando se mueven conductores eléctricos en el seno de un campo magnético. Pues bien, los motores funcionan con el principio inverso:

Cuando un conductor está inmerso en el seno de un campo magnético y por él hacemos circular una corriente eléctrica, aparecen unas fuerzas de carácter electromagnético que tienden a desplazarlo.

Objetivos

- Describir los procesos que se dan en la inducción electromagnética y aplicarlos al principio de funcionamiento de los generadores electromagnéticos, transformadores, etcétera.
- Detectar los efectos que producen las corrientes parásitas o de Foucault en los núcleos de hierro sometidos a campos variables, y encontrar las fórmulas para evitarlos.
- Apreciar los efectos de autoinducción que se producen en las bobinas.
- Analizar los fenómenos que se dan en la apertura y el cierre de un circuito con bobina.
- Comprender la importancia del coeficiente de autoinducción de una bobina.
- Describir la fuerza que se desarrolla en un conductor recorrido por corriente eléctrica cuando está en el seno de un campo magnético, y relacionarlo con el principio de funcionamiento del motor eléctrico y de los aparatos de medida analógicos.

11.1. Inducción electromagnética

Cuando nos referimos a la inducción electromagnética estamos hablando de «producción de electricidad por acción magnética»; es decir, «cuando se mueve un conductor eléctrico en el seno de un campo magnético aparece una fuerza electromotriz que se muestra como una tensión eléctrica en los extremos de dicho conductor» (Figura 11.1).

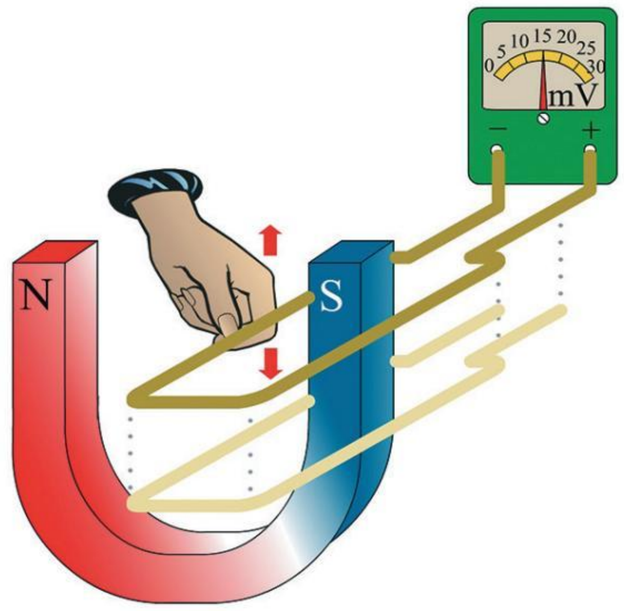


Figura 11.1. Al mover el conductor en el campo magnético del imán se genera una f. e. m.

Así, por ejemplo, para producir C.C. se utiliza la dinamo (Figura 11.2). Los conductores eléctricos del rotor producen una fuerza electromotriz al moverse dentro del campo magnético del estator. Si el circuito está cerrado, aparece una corriente eléctrica que se extrae del rotor mediante un anillo metálico partido (colector de delgas) sobre los que se apoyan unos contactos deslizantes (escobillas de grafito).

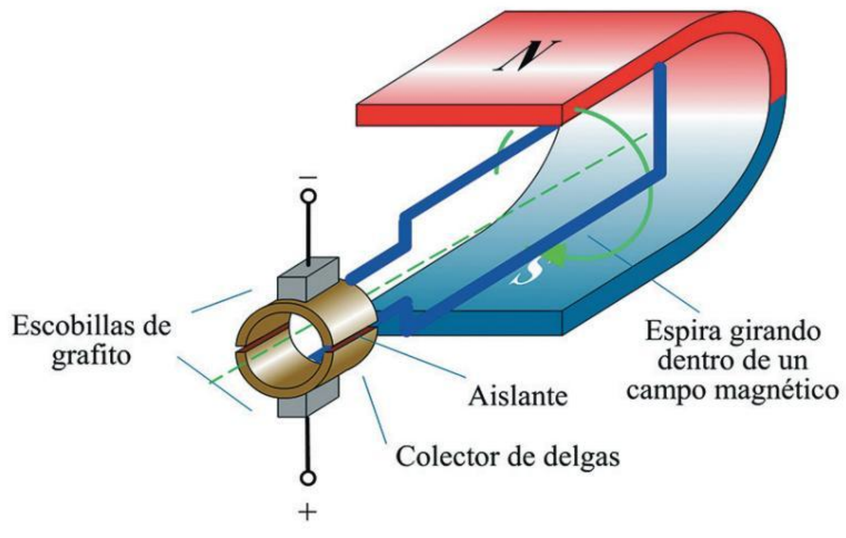


Figura 11.2. Dinamo elemental.

Para producir C.A. se utiliza el alternador (Figura 11.3). El campo magnético producido por el electroimán del rotor corta los conductores del estator, lo que hace que en ellos aparezca una fuerza electromotriz inducida en forma de C.A.

En los dos casos se consigue que en los conductores eléctricos aparezca un fuerza electromotriz inducida. En el primero, se mueven los conductores y se deja fijo el campo magnético. En el segundo caso, se mueve el campo magnético y se dejan fijos los conductores.

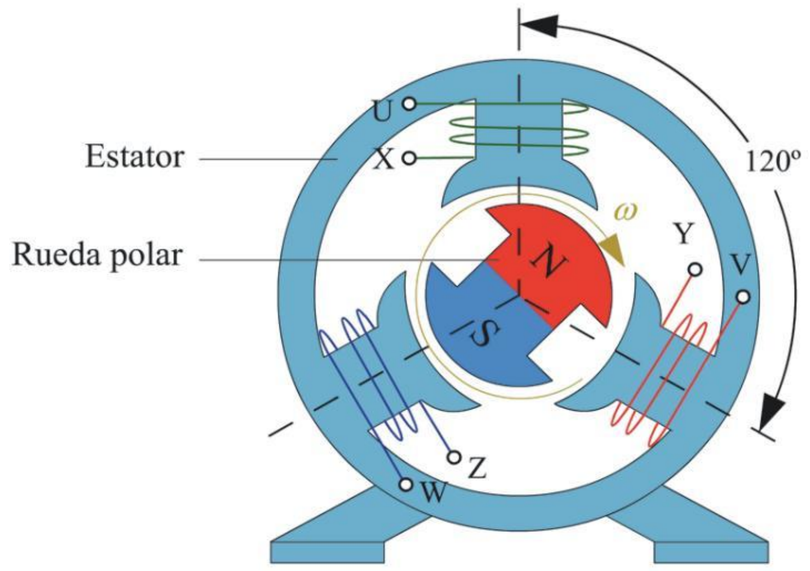


Figura 11.3. Alternador trifásico.

Recordemos que la fuerza electromotriz es la que consigue separar las cargas negativas (átomos con exceso de electrones) de las cargas positivas (átomos con defecto de electrones), creando una diferencia de cargas o tensión eléctrica que es capaz de hacer circular una corriente eléctrica en un circuito cerrado. Cuando movemos el conductor de forma perpendicular a un campo magnético, las cargas eléctricas se separan hacia ambos extremos del conductor, produciéndose una diferencia de potencial entre los mismos, tal como se muestra en la Figura 11.4.

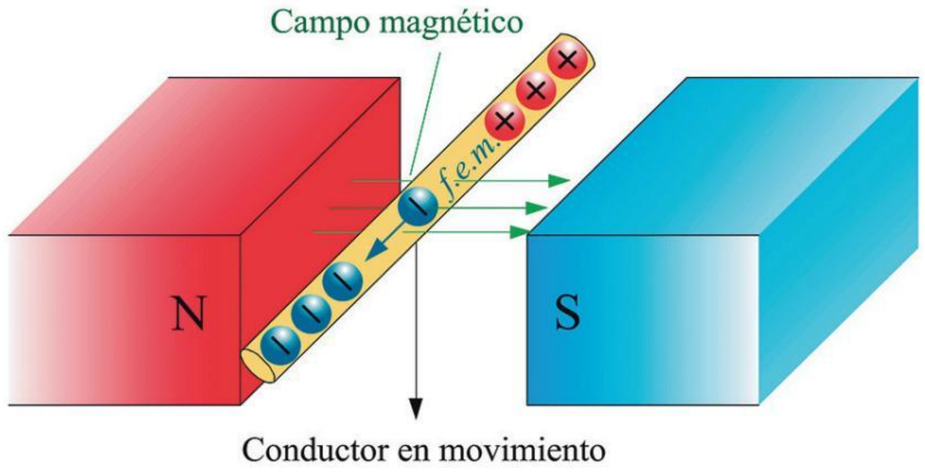


Figura 11.4. F. e. m. inducida en un conductor.

Actividad experimental 11.1

Toma una bobina de unas 500 espiras con núcleo de aire y conéctala a un miliamperímetro de cero central en la escala (aparato de medida muy sensible, donde la aguja indicadora se mueve hacia un lado u otro de la escala dependiendo del sentido de la corriente) (Figura 11.5). Ahora introduce suavemente en su núcleo un imán recto y comprueba la lectura del miliamperímetro. Realiza la experiencia con las siguientes variaciones:

a) Retira el imán del núcleo.

b) Repite la experiencia moviendo más rápido el imán.

c) Repite la experiencia con un imán más potente.

d) Repite la experiencia con una bobina de 2.000 espiras.

e) Repite la experiencia moviendo la bobina en vez del imán.

© Ediciones Paraninfo

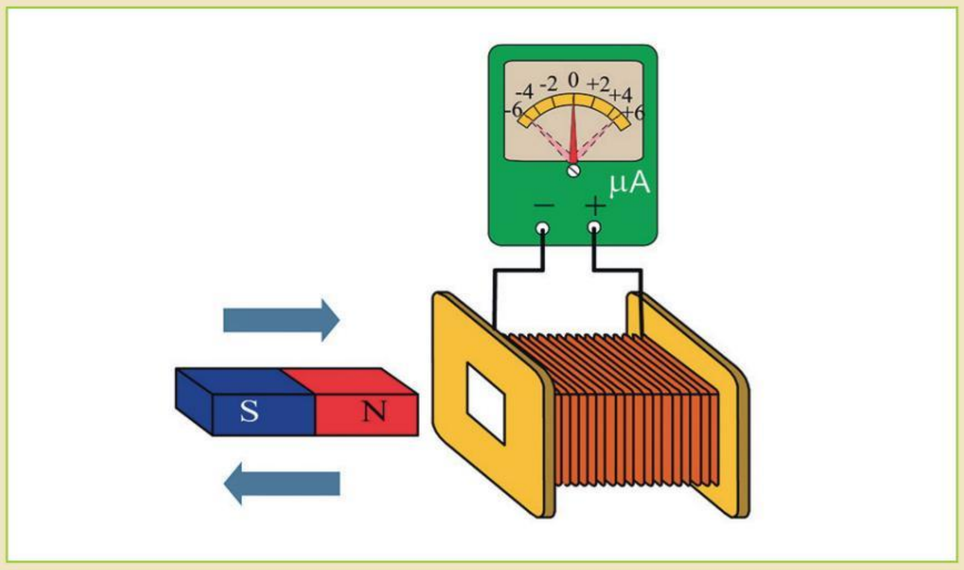


Figura 11.5.

Seguro que al realizar esta experiencia has obtenido las siguientes conclusiones:

- Cuando los conductores eléctricos son sometidos a la acción de un campo magnético variable, se produce una f. e. m. inducida en los mismos que, cuando cerramos el circuito, se convierte en una corriente eléctrica inducida (si se mueve el imán, la aguja del aparato de medida acusa el paso de una corriente eléctrica; si el imán permanece inmóvil, el miliamperímetro indica cero).
- Esta f. e. m. es mayor cuando:
  - Aumentamos la velocidad con la que movemos el campo magnético, o el conductor.
  - Aumentamos el número de espiras de la bobina.
  - Aumentamos el campo magnético.
- La corriente inducida tiene un sentido cuando se introduce el imán en el núcleo de la bobina y el contrario cuando se extrae este de la misma.

11.1.1. Experiencia de Faraday

Para realizar esta experiencia se necesita un imán, una bobina y un miliamperímetro de cero central (aparato de medida muy sensible, donde la aguja indicadora se mueve hacia un lado u otro de la escala dependiendo del sentido de la corriente). La bobina la suspendemos entre los polos del imán, tal como se muestra en la Figura 11.6, de manera que pueda moverse y cortar las líneas de campo magnético.

Si movemos el conductor de tal manera que corte perpendicularmente a las líneas de campo, se puede observar que la aguja del miliamperímetro se desvía hacia un lado durante el movimiento, indicando el paso de una corriente en la bobina. Si ahora movemos el conductor en sentido contrario, la aguja del miliamperímetro se desvía también hacia el lado contrario.

De aquí se deduce que cuando se mueven conductores, de tal manera que corten perpendicularmente las líneas de un campo magnético, se produce una f. e. m. inducida. Si se cierra el circuito aparece una corriente eléctrica. También observamos que el sentido de esta corriente depende del movimiento relativo de los conductores respecto al campo magnético.

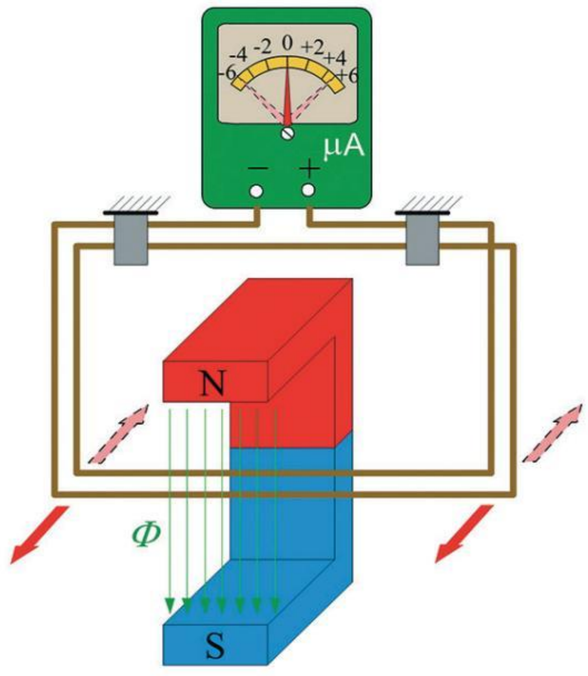


Figura 11.6. Montaje para realizar la experiencia de Faraday.

Si ahora movemos los conductores en sentido paralelo a las líneas de campo (hacia arriba y hacia abajo según la Figura 11.6), se puede observar que el miliamperímetro no detecta el paso de corriente. También podemos observar que cuanto más rápido movamos la bobina, mayores son los valores de la corriente medida.

De aquí se deduce que solo se produce f. e. m. mientras los conductores corten el campo magnético. Además la f. e. m. depende de la velocidad relativa de corte de los conductores respecto al campo magnético, y aumenta con dicha velocidad.

Además se observa que al aumentar el número de espiras de la bobina, también aumenta la f. e. m. inducida. Lo mismo ocurre si aumentamos el nivel de inducción del campo magnético.

En resumen, se puede decir que la f. e. m. media inducida que se produce en una bobina cuando en su movimiento corta perpendicularmente las líneas de un campo magnético regular es igual a:

$$E_{\text{inducida}} = N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

donde N es el número de espiras de la bobina y la expresión $\Delta \Phi / \Delta t$ indica la variación del flujo cortado por la bobina respecto al tiempo, es decir, lo rápido que varía el flujo magnético en los conductores.

Conviene indicar que se puede generar una f. e. m. inducida tanto si se mueven conductores en el seno de un campo magnético fijo, como si lo que se mueve es el campo magnético y se dejan fijos los conductores. También se consigue f. e. m. inducida en los conductores si se les aplica un campo magnético variable, por ejemplo, proveniente de una bobina a la que se le aplica corriente alterna.

© Ediciones Paraninfo

Actividad resuelta 11.1

Una bobina de 100 espiras se mueve cortando perpendicularmente un campo magnético. La variación de flujo experimentado en dicho movimiento es uniforme y va de 2 mWb a 10 mWb en un intervalo de tiempo de 0,5 segundos. Averigua la f.e.m. inducida.

Solución:

$\Delta\Phi$ = variación de flujo = 10 – 2 = 8 mWb

Δt = tiempo en el que varía el flujo = 0,5 s

$$E_{\text{inducida}} = N\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = 100\,\frac{0{,}008}{0{,}5} = 1{,}6\ \text{V}$$

La fórmula de la f.e.m. inducida media se puede expresar de otra forma. Supongamos que un conductor de longitud L que se desplaza perpendicularmente a las líneas de un campo magnético de inducción B a una velocidad v, tal como se muestra en la Figura 11.7.

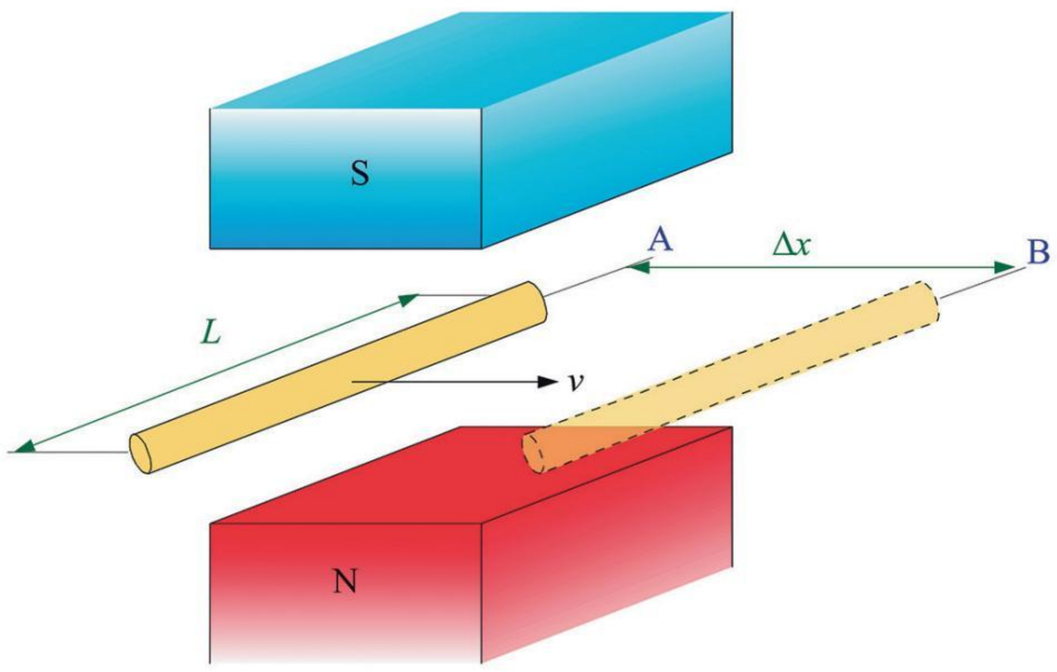


Figura 11.7.

Cuando el conductor se desplace de la posición (A) a la posición (B) habrá barrido un área igual a:

$$S = L \cdot \Delta x$$

y el conductor habrá sido sometido a un cambio de flujo $\Delta\Phi$ en un intervalo de tiempo Δt.

La f.e.m. inducida en el mismo será igual a:

$$E_{\text{inducida}} = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

Por otro lado $\Delta\Phi = B \cdot S = B \cdot L \cdot \Delta x$, sustituyendo en la primera ecuación:

$$E_{\text{inducida}} = B \cdot L = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

Dado que el último término de esta expresión se corresponde con la velocidad del conductor, resulta que:

$$E_{\text{inducida}} = BLv$$

E = f.e.m. media inducida en voltios.
B = Inducción magnética en teslas.
L = Longitud del conductor en metros.
v = Velocidad perpendicular en m/s.

Actividad resuelta 11.2

Un conductor se desplaza a una velocidad lineal de 5 m/s en el seno de un campo magnético fijo de 1,2 teslas de inducción. Halla el valor de la f.e.m. inducida en el conductor si posee una longitud de 0,5 m.

Solución:

$$E = BLv = 1{,}2 \cdot 0{,}5 \cdot 5 = 3\ \text{V}$$

11.1.2. Sentido de la f.e.m. inducida. Ley de Lenz

La ley de Lenz indica que «el sentido de la corriente inducida en un conductor es tal que tiende a oponerse a la causa que la produjo» (principio general de acción y reacción).

Este efecto se puede comprobar experimentalmente de la siguiente manera. Si instalamos una dinamo o alternador acoplado a la rueda de una bicicleta estática y nos ponemos a pedalear, podremos comprobar que resulta bastante fácil mover los pedales. Si ahora conectamos a la dinamo una lámpara de 40 W, sentiremos una mayor resistencia al movimiento de los pedales, la cual aumenta todavía más si conectamos una lámpara de 100 W.

Lo que hemos comprobado experimentalmente es que cuando los conductores de la dinamo se mueven en el seno de un campo magnético, si el circuito está cerrado, aparece una corriente eléctrica que alimenta la lámpara. Esta corriente produce, a su vez, un campo magnético de polaridad tal que tiende a oponerse a las variaciones del campo magnético inductor. Así, por ejemplo, si este campo magnético tendiese a crecer, la corriente inducida en el conductor generaría un campo magnético de sentido contrario que tendería a contrarrestar dicho aumento. En el caso de la dinamo de la bicicleta, lo que se observa es que cuando aumenta la corriente por los conductores se aprecia una cierta resistencia al movimiento de estos.

Para determinar el sentido de la corriente inducida en un conductor que se desplaza perpendicularmente en el seno de

© Ediciones Paraninfo

un campo magnético resulta un tanto compleja la aplicación directa de la ley de Lenz. Un método mucho más sencillo es aplicar la **regla de Fleming de la mano derecha.**

Para aplicar esta regla se utilizan los tres dedos de la mano derecha, tal como se indica en la Figura 11.8: el **pulgar** se coloca en ángulo recto con respecto al resto de la mano indicando el sentido de desplazamiento del conductor (**mo**vimiento). El **índice** se coloca perpendicular al pulgar, indicando el sentido del flujo magnético (**ca**mpo). El **corazón** se coloca en un plano perpendicular al formado por el pulgar y el índice y nos indica el sentido que toma la corriente inducida (sentido convencional de la corriente) al mover el conductor en el seno del campo magnético (**co**rriente).

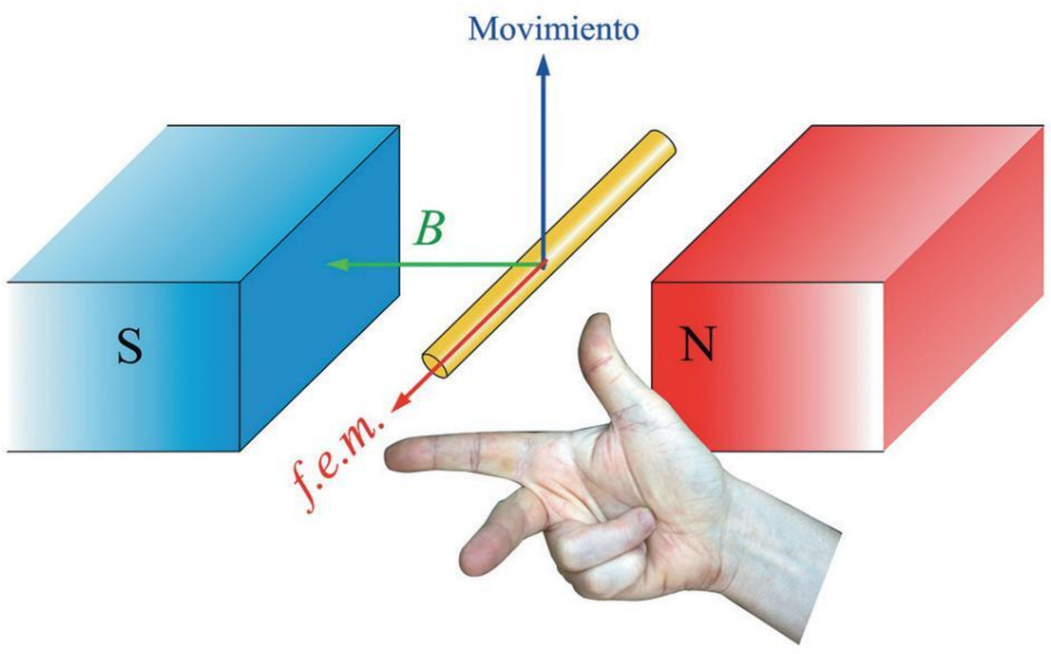


Figura 11.8. Regla de la mano derecha para determinar el sentido de la f. e. m. inducida.

Una forma sencilla de no olvidarse de esta regla es aplicando la siguiente regla nemotécnica: **mo-ca-co** que significa **mo**vimiento, **ca**mpo, **co**rriente (Figura 11.9).

Gracias a esta sencilla regla podremos responder a estas sencillas preguntas:

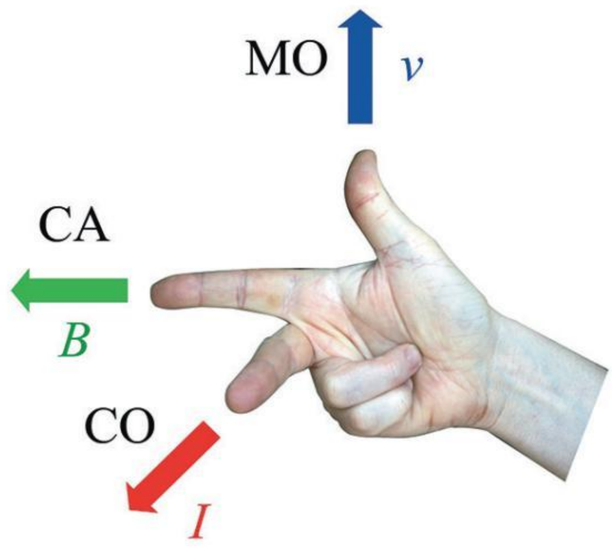


Figura 11.9. Regla de la mano derecha.

¿Qué ocurre si invertimos el sentido de giro de una dinamo? Al moverse los conductores en sentido contrario al anterior, la corriente también se invierte, lo que da como resultado una inversión en la polaridad de los bornes de salida del generador.

¿Qué ocurre si invertimos la polaridad del campo magnético inductor de una dinamo? Si aplicamos la regla de la mano derecha observaremos que al invertir el campo también se invierte el sentido de la corriente.

Actividad resuelta 11.3

Determina el sentido de la corriente en el conductor eléctrico de la Figura 11.10.

Solución:

Al aplicar la regla de la mano derecha se mantiene el sentido de la corriente, como se indica en la Figura 11.8.

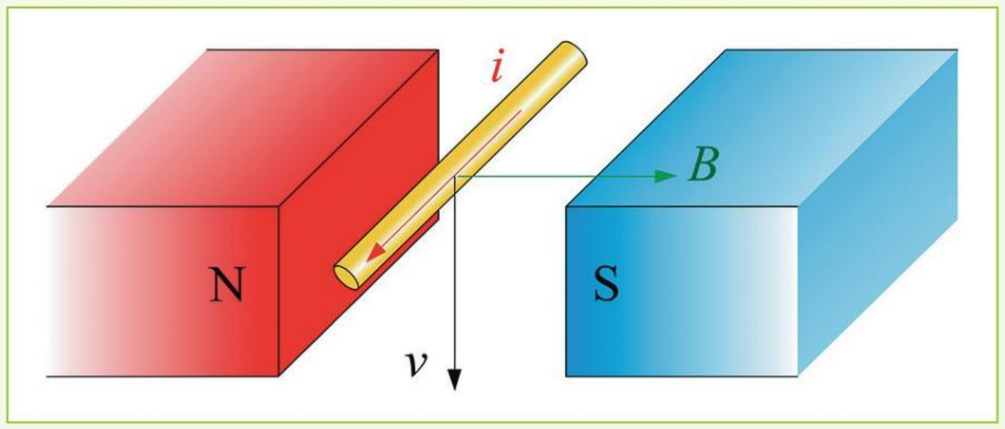


Figura 11.10.

11.1.3. Fuerza electromotriz inducida en un circuito próximo

Los campos magnéticos variables que desarrollan los conductores cuando son recorridos por corrientes variables pueden inducir fuerzas electromotrices al atravesar otros conductores que se encuentren en su proximidad.

Para entender este fenómeno podemos realizar una sencilla experiencia, que consiste en colocar dos bobinas muy cerca una de otra, tal como se muestra en la Figura 11.11. En los extremos de la bobina B conectamos un galvanómetro de cero central. A su vez, en la bobina A conectamos primeramente un generador de C.C. Al cerrar el interruptor en la bobina A, se puede observar cómo el galvanómetro acusa el paso de una pequeña corriente por la bobina B que persiste solo durante un pequeño periodo de tiempo. Si a continuación abrimos el interruptor podremos comprobar que el galvanómetro vuelve a detectar el paso de corriente, pero ahora en sentido contrario.

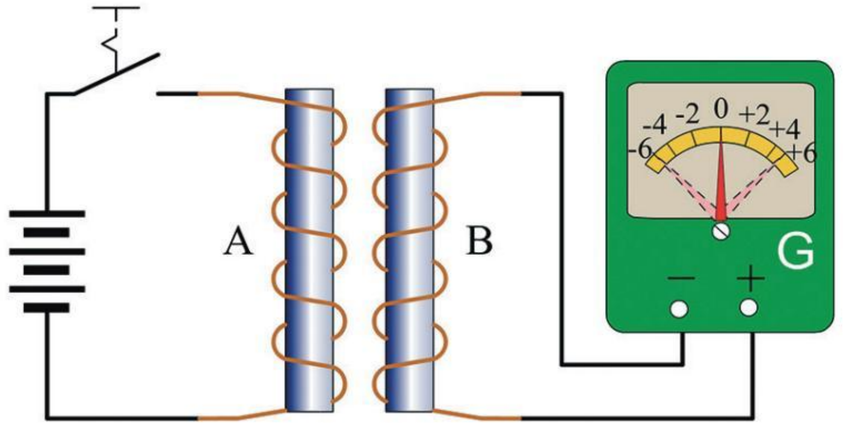


Figura 11.11. Comprobación experimental de la f. e. m. inducida en un circuito próximo.

© Ediciones Paraninfo

La explicación de este fenómeno la tenemos que encontrar en la inducción electromagnética.

Al cerrar el interruptor, por la bobina A aparece una corriente que tiende a crecer desde cero hasta su valor nominal, lo que origina en la bobina un campo magnético variable y creciente. Al estar la bobina B muy próxima a la A, dicho campo magnético la atraviesa, con lo que se produce el principio de inducción electromagnética (conductores sometidos a la acción de un campo magnético variable) que da como resultado una fuerza electromotriz y una corriente eléctrica en la bobina B. Esta corriente solo se produce mientras el campo magnético sea variable, es decir, mientras la corriente por la bobina A esté creciendo, hecho que ocurre solo durante un pequeño periodo de tiempo.

Al abrir el interruptor el proceso se repite, pero a la inversa. La corriente por la bobina A tiende a desaparecer, lo mismo que el campo magnético. En la bobina B aparece una f. e. m. de inducción, mientras el campo magnético sea variable (en este caso decreciente). El galvanómetro acusa el paso de una corriente eléctrica. Pero, en este caso de sentido contrario al anterior, hecho que se explica fácilmente con la ley de Lenz.

Si ahora sustituimos el generador de C.C. por uno de C.A. y el galvanómetro por un voltímetro de C.A., al cerrar el interruptor podremos observar que el voltímetro conectado a la bobina B indica una determinada tensión. Si ahora sustituimos la bobina B por una de más espiras, se puede observar que la tensión de salida aumenta.

La explicación de esta experiencia hay que volver a buscarla en la inducción electromagnética. Ahora la bobina A es recorrida por una corriente variable, lo que produce, a su vez, un campo variable que atraviesa en todo momento a la bobina B. En consecuencia, en esta bobina se produce constantemente una f. e. m. de inducción. Si aumentamos el número de espiras en la bobina B, la fuerza electromotriz inducida aumenta.

Gracias a este principio funcionan los transformadores eléctricos, que estudiaremos más adelante. Además, con él podemos dar explicación a muchos fenómenos que aparecen en torno a las corrientes y campos magnéticos variables. Así, por ejemplo, se puede entender que es peligroso aproximarse demasiado a elementos conductores que estén en las cercanías de líneas de transporte de alta tensión, ya que los fuertes campos magnéticos variables producidos por sus conductores se establecen en un determinado radio de acción e inducen una elevada f. e. m. en todos los conductores que atraviesa. Para evitar accidentes conviene conectar a tierra todos los elementos metálicos que se encuentren en las proximidades de dichas redes.

11.1.4. Aplicaciones prácticas de la inducción electromagnética

La principal aplicación de la inducción electromagnética es, sin duda, la producción de energía eléctrica en grandes cantidades mediante los alternadores. Además, gracias a este fenómeno funcionan los transformadores eléctricos.

Existen muchas más aplicaciones, como, por ejemplo, los relés diferenciales, la pinza amperimétrica, los hornos de inducción, etcétera.

El alternador

Por ejemplo, en un alternador trifásico con un par de polos en el rotor, una rueda polar con un fuerte campo magnético gira a 3.000 revoluciones por minuto (50 vueltas por segundo) e induce en las tres bobinas del estator una tensión alterna trifásica de 50 Hz que se transporta y distribuye hasta los centros de consumo.

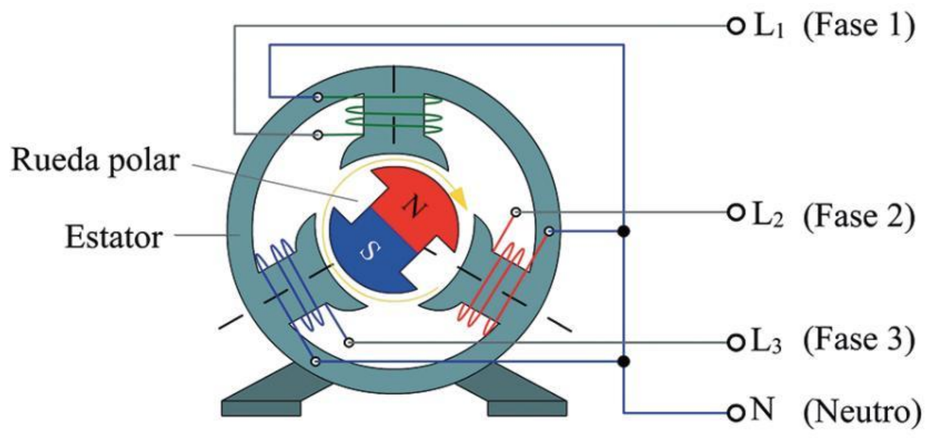


Figura 11.12. Alternador trifásico.

El transformador

Un transformador posee dos bobinados, uno primario y otro secundario, que se arrollan sobre un núcleo magnético común, formado por chapas magnéticas apiladas (Figura 11.13). Al conectar el bobinado primario, de N_1 espiras, a una tensión alterna U_1, se produce en el núcleo magnético un flujo variable (Φ). Este flujo variable se cierra por todo el núcleo magnético y corta los conductores del bobinado secundario, por lo que se induce una fuerza electromotriz en el secundario que dependerá del número de espiras del mismo.

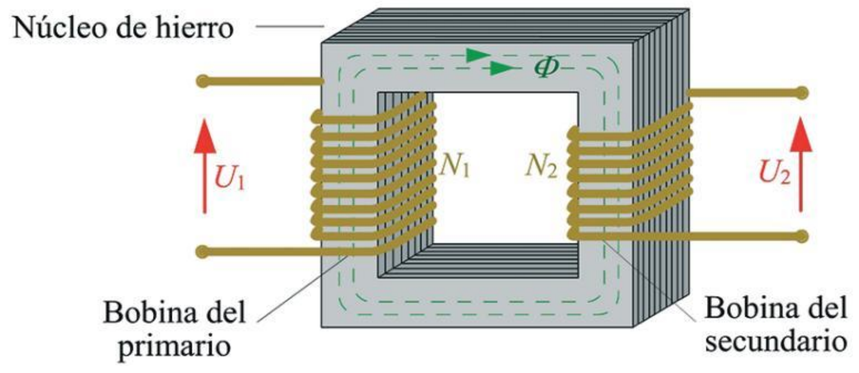


Figura 11.13. Transformador eléctrico.

En el caso de que el número de espiras del secundario sea mayor que el del primario, la tensión del secundario también

© Ediciones Paraninfo

será mayor. El mismo razonamiento se puede hacer para un transformador reductor.

Cargador inalámbrico para teléfono móvil

El cargador inalámbrico es capaz de cargar la batería de un teléfono móvil sin tener que conectar el cable del cargador. Para ello utiliza un cargador inalámbrico conectado a la red eléctrica (transmisor), que genera un campo magnético alterno de alta frecuencia. El teléfono debe venir equipado con un receptor de carga inalámbrica. El campo magnético del transmisor induce una tensión eléctrica en la bobina receptora que alimenta al cargador interno del teléfono sin necesidad de cables (Figura 11.14).

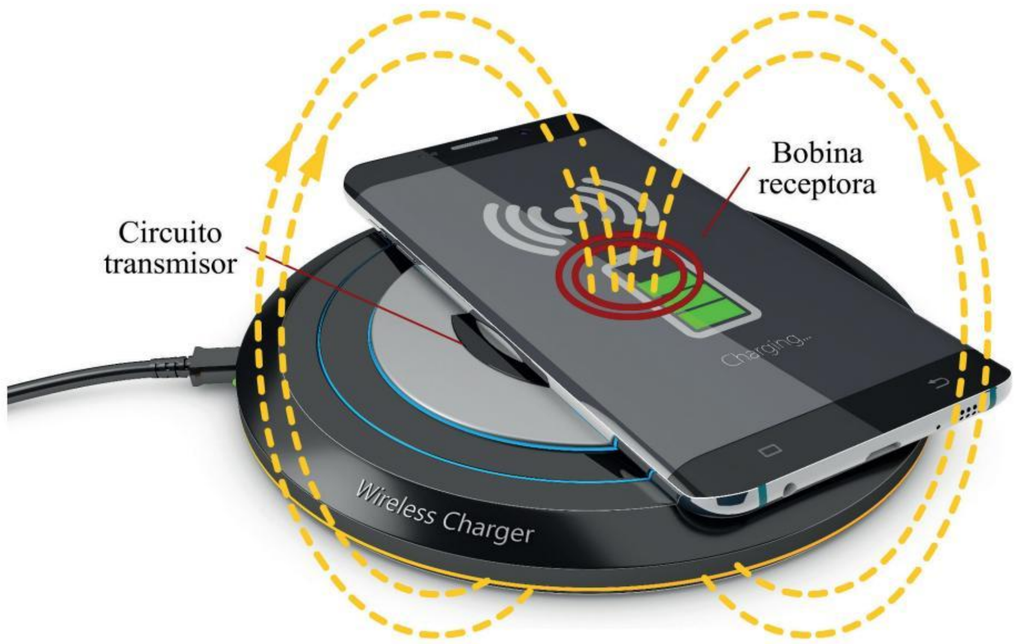


Figura 11.14. Carga inalámbrica para teléfono móvil.

Sistemas de transmisión y recepción de señales de radio, vídeo y telefonía móvil

Todos estos sistemas consiguen transmitir la información gracias a la producción de campos magnéticos de alta frecuencia (del orden de kHz y MHz para sistemas de radio y de algunos GHz para la telefonía móvil). Estas señales electromagnéticas se recogen con facilidad a larga distancia por los receptores gracias al principio de inducción electromagnética. Cuanto mayor sea la frecuencia, la señal podrá transmitirse a más distancia sin que su intensidad de origen sea muy elevada, tal como ocurre con la telefonía móvil que emplea señales en torno a los 2 GHz ($2 \cdot 10^9$ Hz) de frecuencia.

En la Figura 11.15 se muestra de forma simplificada cómo sería el sistema de emisión y recepción de un sistema de comunicación por radio.

En este caso la emisora se encarga de recoger la información a transmitir (señales de audio transformadas en señales eléctricas de una determinada frecuencia) y mediante circuitos de modulación adecuados genera una señal de alta frecuencia que es aplicada a la antena mediante un transformador.

Cuando la corriente alterna de alta frecuencia recorre el conductor de la antena, se produce un campo electromagnético variable de la misma frecuencia. Esto hace que se produzca, a su vez, una onda electromagnética que se radia en todas las direcciones.

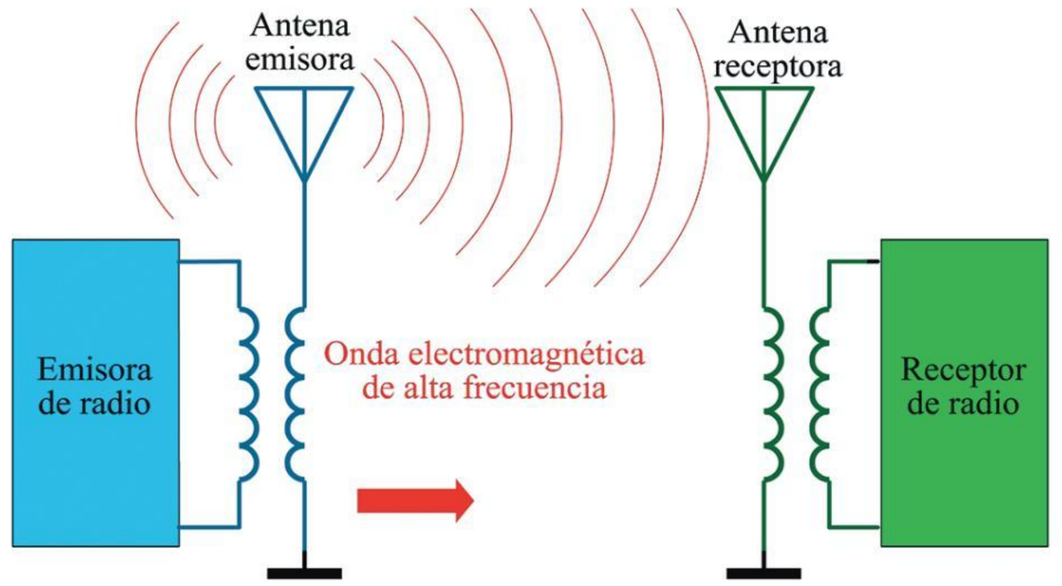


Figura 11.15. Sistema de comunicación por radio.

Si estas ondas electromagnéticas lanzadas al espacio cortan el conductor de una antena receptora, se induce en esta una fuerza electromotriz (similar al proceso que se da en un transformador) que reproduce la señal eléctrica emitida por el conjunto de emisora y antena de emisión. Por supuesto, cuanto más alejados nos encontremos de la antena de emisión, más pequeña será la señal recibida. Esta señal suele ser del orden de los microvoltios.

Pinza amperimétrica

Con una pinza amperimétrica se pueden medir intensidades de corriente de un conductor sin tener que realizar contactos eléctricos. Para realizar la medida basta con abrazar con la pinza el conductor eléctrico aislado; la medida aparece directamente en un amperímetro de aguja o digital (Figura 11.16).



Figura 11.16. Pinza amperimétrica.

Este aparato es de gran utilidad para los equipos de reparación y mantenimiento de las instalaciones eléctricas. Su funcionamiento es como sigue. Al conductor al que se le va a realizar la medida se lo abraza con el circuito magnético de

© Ediciones Paraninfo

la pinza. Para corrientes alternas, dicho conductor produce un campo magnético circular a su alrededor, también alterno, que se conduce con facilidad por el circuito magnético de la pinza. En el otro extremo de esta existe una bobina conectada al instrumento de medida, donde se induce una f. e. m. por ser cortada por el campo alterno. Esta f. e. m. es proporcional a la intensidad de corriente que atraviesa el conductor, por lo que las lecturas del instrumento indicador se pueden traducir fácilmente a amperios.

Un fenómeno parecido al que acabamos de explicar ocurre con las líneas de transporte y distribución de la energía eléctrica. Cuando los conductores de una línea de alta tensión están demasiado próximos a otros conductores (líneas paralelas auxiliares desactivadas), los primeros pueden inducir en estos otros una tensión muy elevada por inducción electromagnética (siempre que la línea sea de C.A.). Esto puede ser muy peligroso, por lo que siempre se recomienda conectar estas líneas a tierra antes de efectuar una manipulación, aunque se esté muy seguro de que están desconectadas.

Interruptor diferencial

El interruptor diferencial es un dispositivo que interrumpe el circuito en el caso de que exista un fallo de aislamiento, desconectando el circuito general. De esta forma se elimina el peligro de electrocución para las personas.

¿Cómo funciona el interruptor diferencial? (véase la Figura 11.17).

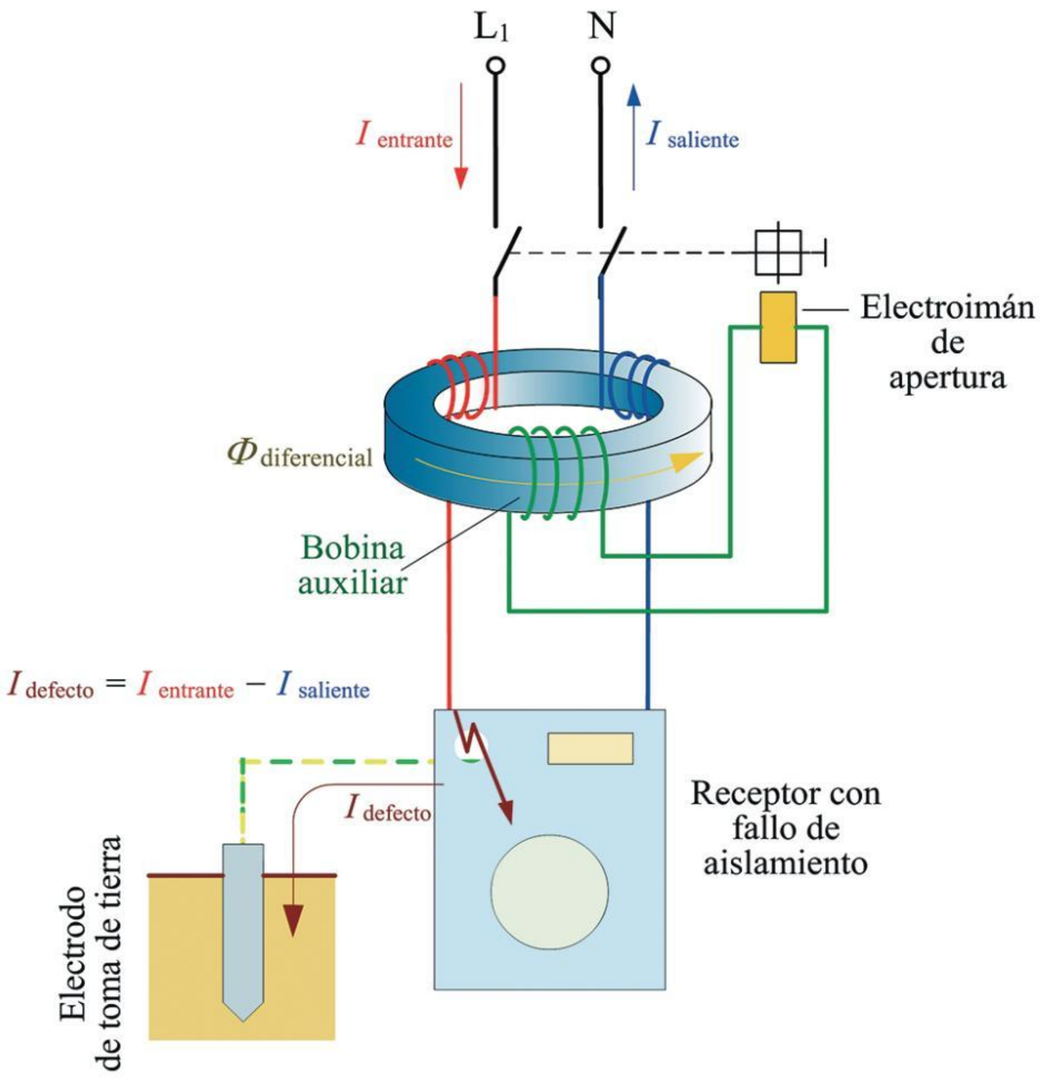


Figura 11.17. Funcionamiento del interruptor diferencial.

En condiciones normales, la corriente que entra por uno de los conductores es igual a la que sale por el otro ($I_{entrante} = I_{saliente}$). Mientras se cumpla esta condición el interruptor diferencial permanecerá con sus contactos cerrados. Ahora bien, cuando aparece un defecto de aislamiento, existe una parte de la corriente eléctrica que se deriva por tierra (corriente de fuga o corriente de defecto), lo que hace que la intensidad de entrada sea diferente a la de salida. El interruptor diferencial está dotado de un sistema de detección que capta la diferencia ($I_{defecto} = I_{entrante} - I_{saliente}$) y produce la apertura de sus contactos. De esta forma, en el momento en que aparece una corriente de derivación, el interruptor desconecta el circuito, con lo que evita los posibles peligros de la corriente de defecto.

El sistema de detección mencionado funciona gracias a la inducción electromagnética. Cuando los flujos magnéticos alternos de entrada y salida generados por las corrientes de entrada y salida no son iguales, se produce en el núcleo toroidal un flujo diferencial ($\Phi_{diferencial} = \Phi_{entrada} - \Phi_{salida}$) que hace posible que en una bobina auxiliar se induzca una pequeña tensión (como si se tratase del secundario de un transformador), que al ser aplicada a un electroimán produce la apertura de los contactos del interruptor. En la Figura 11.18 se muestran las partes de un interruptor diferencial comercial.

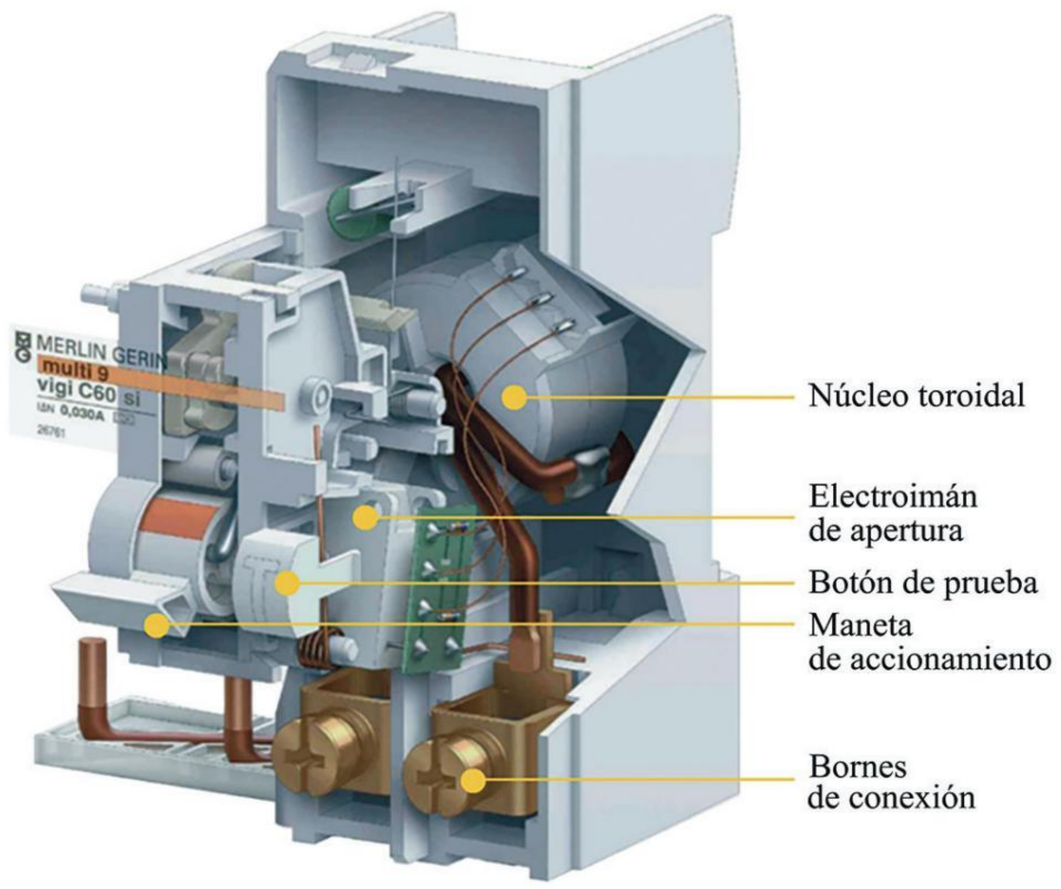


Figura 11.18. Interruptor diferencial. (Cortesía de Merlin Gerin.)

¿Qué es la sensibilidad del interruptor diferencial?

Para que el interruptor diferencial se dispare, se necesita una determinada intensidad de defecto. Los valores de la sensibilidad están normalizados y son los siguientes:

- Alta sensibilidad ($I_d = 30$ mA).
- Media sensibilidad ($I_d = 300$ mA).
- Baja sensibilidad ($I_d = 500$ mA).

© Ediciones Paraninfo

11.2. Corrientes parásitas o de Foucault

Si observamos detenidamente los núcleos magnéticos de transformadores, motores y electroimanes de C.A., podremos observar que estos están construidos con chapa magnética. Esto se hace así para evitar el efecto perjudicial de las corrientes parásitas o de Foucault.

Este efecto aparece sobre todo cuando se utilizan corrientes alternas. Cuando estas corrientes variables recorren los bobinados de electroimanes, transformadores, motores o generadores, el núcleo de hierro queda sometido a la acción de un campo magnético variable. Dado que el metal del núcleo es un buen conductor de la corriente eléctrica, se genera en él una f. e. m. inducida. Esta f. e. m. produce, a su vez, unas corrientes de circulación por el hierro, llamadas corrientes parásitas o de Foucault, que se cierran, formando cortocircuitos, por las secciones transversales de dicho núcleo (Figura 11.19).

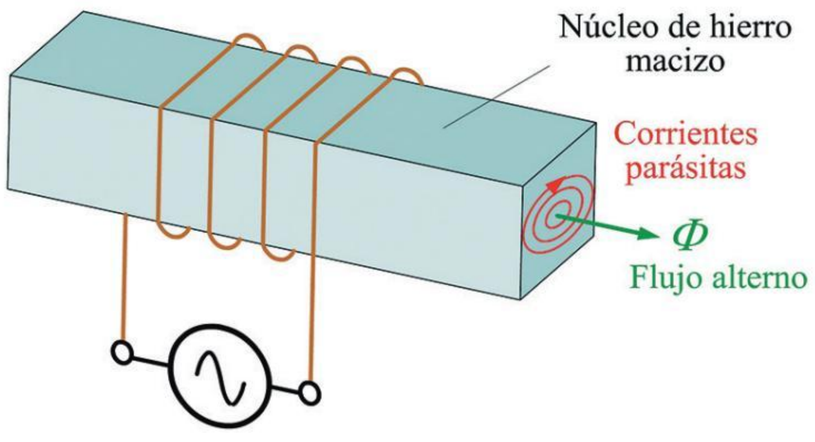


Figura 11.19. Corrientes parásitas en un núcleo de hierro macizo sometido a campos magnéticos variables.

Estas corrientes pueden llegar a alcanzar valores bastante elevados debido a la baja resistencia del hierro. En consecuencia, el núcleo se calienta por efecto Joule.

El calor generado por las corrientes parásitas puede llegar a ser muy elevado, especialmente en núcleos sometidos a flujos magnéticos alternos de considerable frecuencia, como es el caso de todos los transformadores, motores y generadores de corriente alterna.

Este fenómeno reduce considerablemente el rendimiento de las máquinas eléctricas; incluso puede llegar a calentar núcleos de gran sección hasta llegar al rojo vivo.

La forma de minimizar al máximo estas corrientes consiste en dividir longitudinalmente el núcleo y aislar eléctricamente cada una de las partes (Figura 11.20), formando un paquete de chapas magnéticas, tal como se muestra en la Figura 11.21. De esta forma se consigue que cada una de estas divisiones o chapas abarque menos flujo, con lo que la f. e. m. inducida se reduce y, con ella, las corrientes parásitas.

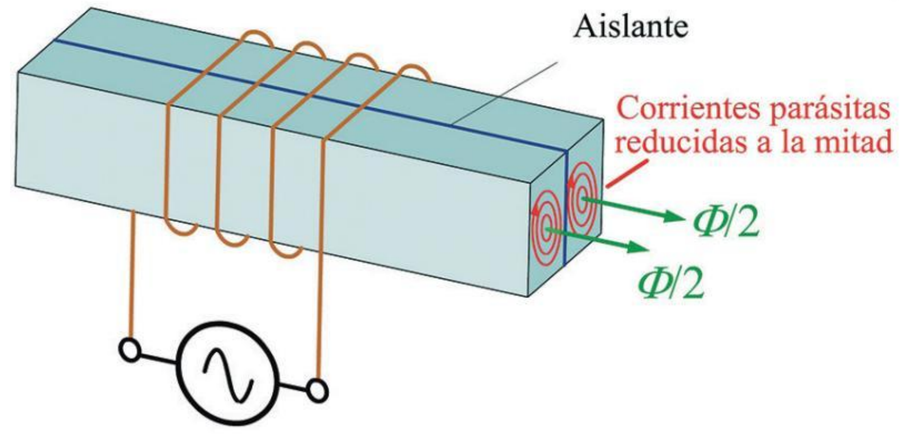


Figura 11.20. Al dividir en dos partes el núcleo de hierro se consigue dividir también el flujo en la misma proporción, por lo que la corriente inducida en cada una de las partes queda igualmente reducida.

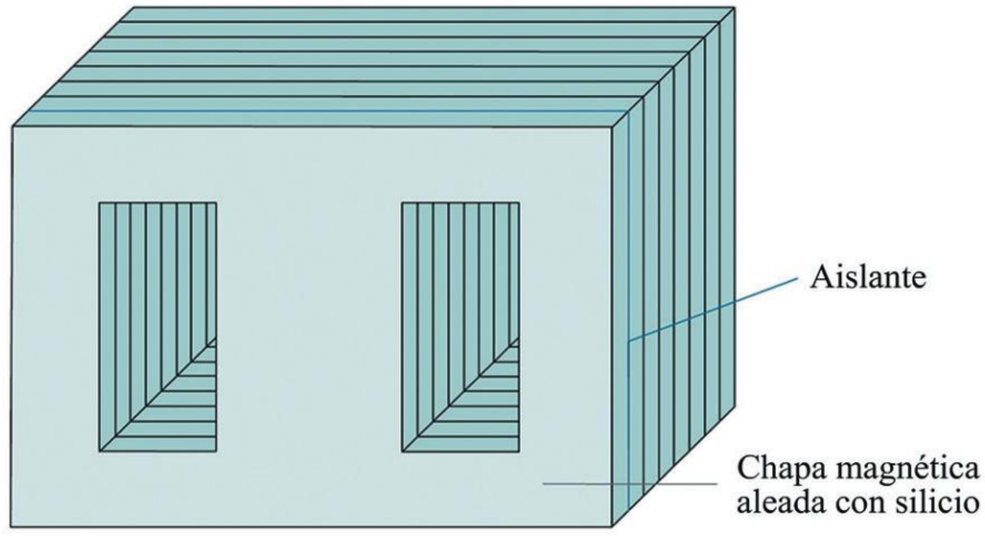


Figura 11.21. Núcleo de un transformador formado por chapas magnéticas apiladas.

Las chapas utilizadas para formar el núcleo son de un espesor de menos de un milímetro y se aíslan eléctricamente entre sí mediante una fina capa de barniz. Además, a estas chapas magnéticas se las alea con silicio en un pequeño porcentaje para elevar la resistividad y, así, reducir considerablemente estas pérdidas.

Cuanto mayor sea la frecuencia de los campos alternos a la que se somete a los núcleos de hierro, más se calentarán estos por efecto de las corrientes parásitas. El empleo de altas frecuencias limita considerablemente el uso de metales conductores en los núcleos de bobinas.

Hornos de inducción

Aprovechando este fenómeno y el de histéresis se pueden construir **hornos eléctricos de inducción para fundir chatarra** (Figura 11.22). El funcionamiento de estos es muy sencillo. La chatarra se deposita en un recipiente al que se somete a la acción de un fuerte campo magnético alterno de frecuencia elevada creado por un electroimán. El calor aparece directamente en los compuestos ferromagnéticos de la chatarra en los que se inducen dichos campos alternos. Los repetidos ciclos de histéresis y las fuertes corrientes parásitas, que circulan por los compuestos metálicos de la chatarra, elevan fuertemente la temperatura de esta hasta fundirla.

© Ediciones Paraninfo

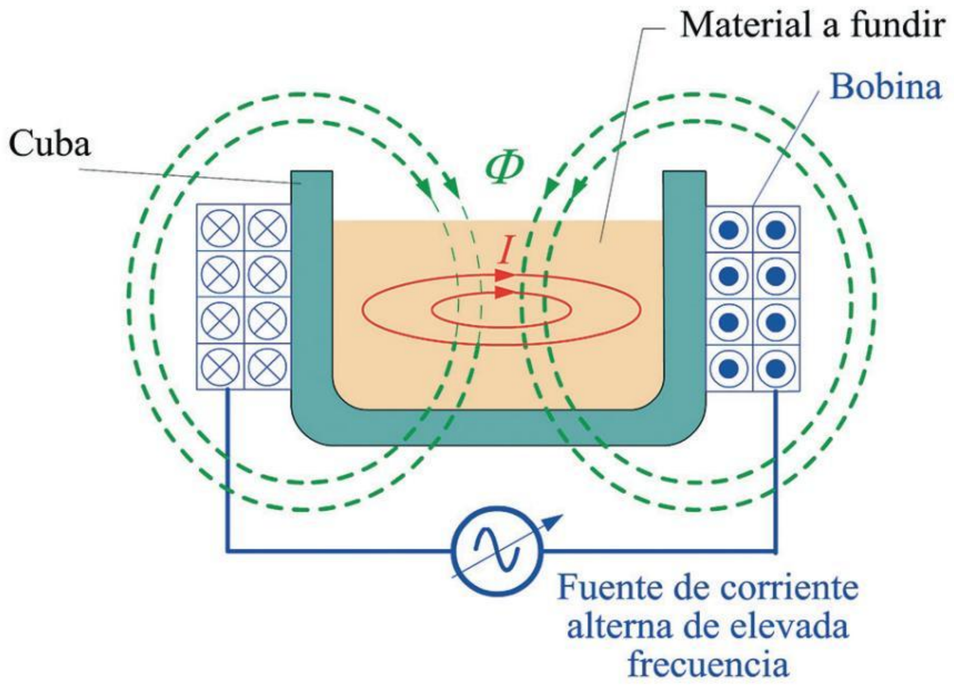


Figura 11.22. Horno de inducción.

Cocinas de inducción

Las modernas cocinas domésticas vitrocerámicas de inducción funcionan mediante un sistema similar. El calor necesario para la cocción de los alimentos aparece directamente en el recipiente metálico que se utiliza, mientras que la placa permanece fría. Para el control de la potencia de estos elementos se regula la frecuencia del campo alterno aplicado (Figura 11.23).

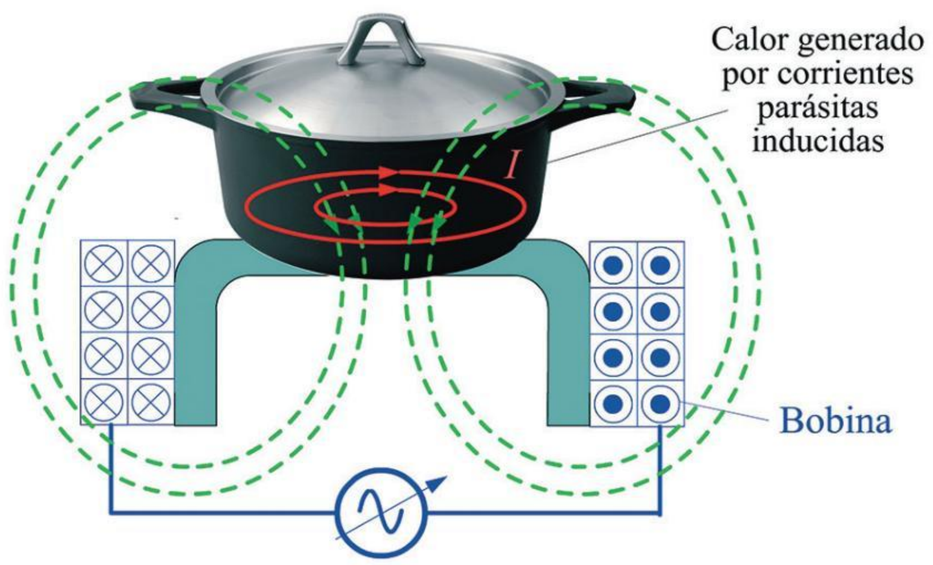


Figura 11.23. Cocina de inducción.

11.3. Autoinducción. Bobinas

Seguro que habrás podido observar en alguna ocasión que al abrir los contactos de un interruptor aparece entre ellos una *chispa de ruptura*. Esta chispa es mucho más fuerte en el caso de que el interruptor corte la corriente que alimenta a una bobina (motores, transformadores, etc.). Estos fenómenos tienen que ver fundamentalmente con la *autoinducción*.

La autoinducción, como el propio término indica, significa inducirse a sí misma f. e. m. Cuando por una bobina circula una corriente eléctrica que es variable, esta genera, a su vez, un campo magnético también variable que corta a los conductores de la propia bobina. Esto origina en ellos una f. e. m. inducida, llamada f. e. m. de autoinducción, que, según la ley de Lenz, tendrá un sentido tal que siempre se opondrá a la causa que la produjo.

Según esto, al cerrar el interruptor de un circuito que alimenta una bobina (Figura 11.24), aparece una corriente eléctrica por la bobina que tiene que aumentar de cero hasta su valor nominal en un tiempo relativamente corto. Esta variación de corriente por la bobina genera en sus conductores un flujo magnético creciente que, al cortarlos, provoca una f. e. m. de autoinducción. El sentido de esta f. e. m. es tal que impide que el flujo se establezca y, por tanto, la intensidad sufre una oposición y se retrasa (la tensión provocada por la autoinducción tiende a restar los efectos de la tensión de la batería). Cuando la intensidad se estabiliza, la f. e. m. de autoinducción desaparece y en la bobina aparece el flujo correspondiente.

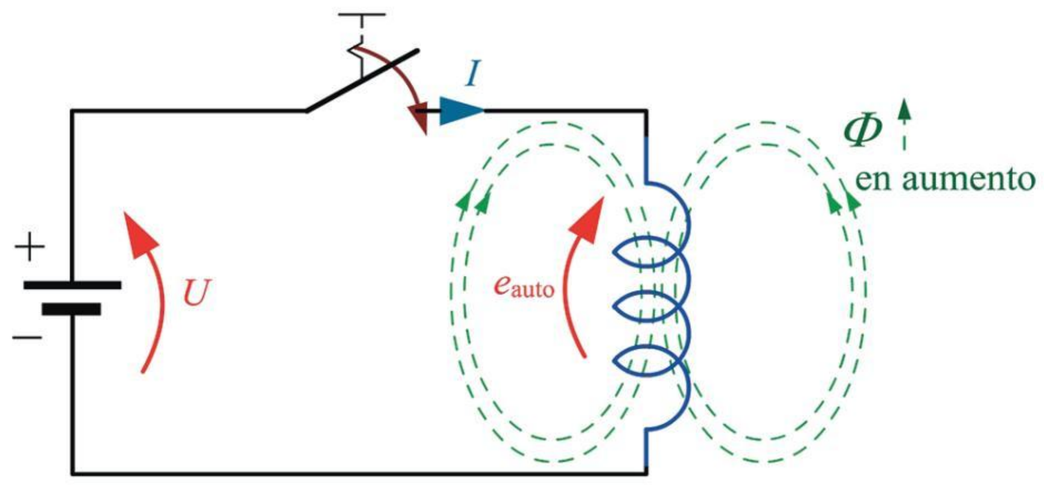


Figura 11.24. Cierre de un circuito con bobina.

Al abrir el interruptor (Figura 11.25), el flujo magnético que abraza a la bobina tiende a desaparecer, lo que origina una f. e. m. de autoinducción de tal sentido que no deja que ni el flujo ni la corriente desaparezcan (la f. e. m. de autoinducción cambia de sentido y tiende a sumarse a la tensión de la batería). La tensión que aparece entre los contactos suele ser tan grande que provoca una chispa de ruptura entre ellos. El valor de la f. e. m. de autoinducción se hace mayor al aumentar la velocidad con que abrimos los contactos del interruptor y cuanto mejor sea la capacidad de la bobina de generar flujo magnético.

Las chispas de ruptura acortan la vida de los contactos de todos los dispositivos que tengan que cortar un circuito en carga, tales como interruptores de maniobra, interruptores automáticos, relés de contactos, contactores, etcétera.

Una forma de alargar la vida de los contactos consiste en reducir la resistencia de contacto al mínimo, para lo cual se recubre de plata la superficie de contacto. A su vez, se procura que el arco formado en la apertura se estire rápidamente con la intención de aumentar el aislamiento entre los contactos; además se consigue enfriar dicho arco en poco tiempo. Esto último se consigue construyendo los dispositivos de apertura con muelles de recuperación.

© Ediciones Paraninfo

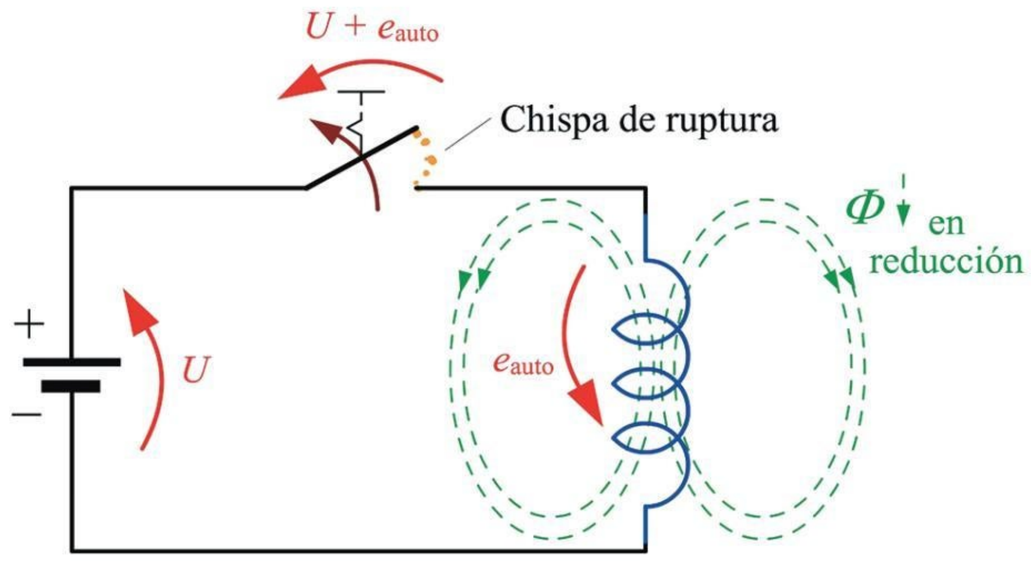


Figura 11.25. Apertura de un circuito con bobina.

En cierta forma, una bobina se puede comparar a un volante de inercia. Cuando el flujo magnético tiende a crecer en la bobina, esta se carga de energía magnética. Al cortar la corriente, el flujo tiende a desaparecer, devolviendo la energía acumulada.

11.3.1. Coeficiente de autoinducción

La f. e. m. de autoinducción de una bobina depende de la rapidez con que cambia el flujo en ella, es decir:

$$e_{auto} = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

Ahora bien, dependiendo de la capacidad de generar flujo de la bobina, esta f. e. m. tendrá un valor u otro. El coeficiente de autoinducción de una bobina nos dice la capacidad que tiene esta de generarse a sí misma f. e. m. de autoinducción.

$$e_{auto} = L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

L = Coeficiente de autoinducción en henrios (H).

En esta expresión se puede apreciar que la f. e. m. de autoinducción aumenta con el coeficiente de autoinducción y con la rapidez con que varía la intensidad de corriente.

El coeficiente de autoinducción de una bobina se puede expresar como la relación entre el flujo magnético generado por la bobina y la intensidad de corriente que ha sido necesario aplicarle. Para un número de espiras N, tendremos que:

$$L = N \frac{\Phi}{I}$$

El coeficiente de autoinducción de una bobina depende de sus características constructivas. Se consiguen bobinas con coeficientes de autoinducción altos con núcleos de alta permeabilidad y gran número de espiras.

Actividad resuelta 11.4

Calcula el valor de la f. e. m. de autoinducción que desarrollará una bobina con un coeficiente de autoinducción de 50 milihenrios si se le aplica una corriente que crece regularmente desde cero hasta 10 A en un tiempo de 0,01 segundos.

Solución:

$$e_{auto} = L \frac{\Delta I}{\Delta t} = 0{,}05 \frac{10}{0{,}01} = 50 \text{ V}$$

Actividad resuelta 11.5

Una bobina que posee 500 espiras produce un flujo magnético de 10 mWb cuando es atravesada por una corriente de 10 amperios. Determina el coeficiente de autoinducción de la bobina.

Solución:

$$L = N \frac{\Phi}{I} = 500 \frac{0{,}01}{10} = 0{,}5 \text{ H}$$

Coeficiente de autoinducción de una bobina con núcleo de aire

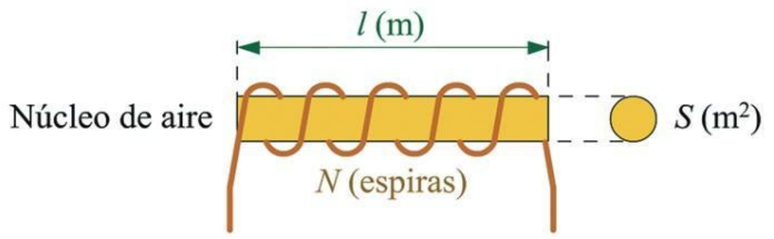


Figura 11.26. Bobina con núcleo de aire.

Para una bobina el flujo magnético que se produce en su interior es igual a:

$$\Phi = B_0 \cdot S$$

Dado que el núcleo es de aire, la inducción magnética en su interior será igual a:

$$B_0 = \mu_0 \cdot H = \mu_0 \cdot \frac{N \cdot I}{l}$$

Sustituyendo estos valores en la expresión conocida del coeficiente de autoinducción de una bobina, tenemos que:

$$L = N \cdot \frac{\Phi}{I} = N \cdot \frac{B_0 \cdot S}{I} = N \cdot \frac{\mu_0 \cdot N \cdot I \cdot S}{l \cdot I} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \quad L = \mu_0 \cdot \frac{N^2 \cdot S}{l}$$

© Ediciones Paraninfo

L = Coeficiente de autoinducción (H).

μ_0 = Permeabilidad del vacío ($4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$).

N = Número de espiras de la bobina.

S = Sección de la bobina (m^2).

l = Longitud de la bobina (m).

Coeficiente de autoinducción de una bobina con núcleo de hierro



Figura 11.27. Bobina con núcleo de hierro.

En este caso la bobina conseguirá un aumento significativo de su coeficiente de autoinducción debido al aumento de la permeabilidad del núcleo. Para un núcleo de hierro con una permeabilidad relativa μ_r, la inducción alcanzada por el núcleo será igual a:

$$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{N \cdot I}{l}$$

Sustituyendo valores en la expresión de permeabilidad, obtenemos el coeficiente de autoinducción de una bobina con núcleo de hierro:

$$L = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{N^2 \cdot S}{l}$$

Actividad propuesta 11.1

Calcula el coeficiente de autoinducción de una bobina con núcleo de aire de la que se conocen los siguientes datos: longitud de la bobina = 10 cm; número de espiras = = 1.000; diámetro de espira = 3 cm.

Actividad propuesta 11.2

La reactancia de un tubo fluorescente posee un núcleo de chapas magnéticas con un coeficiente de permeabilidad relativo de 100 y está bobinada con un número de espiras igual a 2.000. Si las dimensiones de la bobina son las que se muestran en la Figura 11.28, calcula el coeficiente de autoinducción de dicha bobina.

Calcula el valor de la f.e.m. de autoinducción que desarrollará esta bobina si se le aplica una corriente que crece regularmente desde cero hasta 15 A en un tiempo de 0,001 segundos.

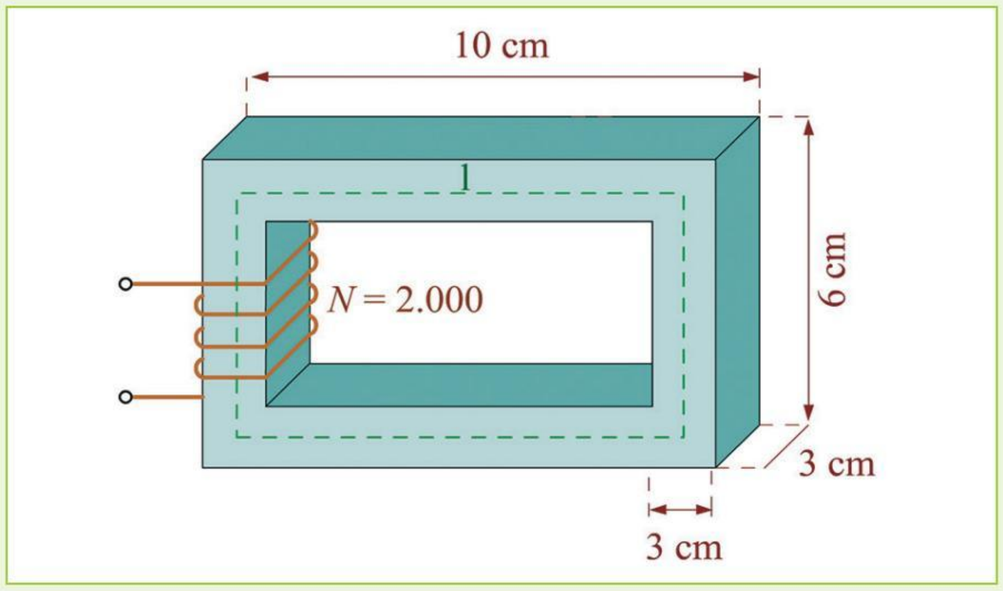


Figura 11.28.

Actividad propuesta 11.3

Sabiendo que la energía E que almacena en julios una bobina ideal (sin resistencia eléctrica en sus conductores) con un coeficiente de autoinducción L cuando se produce una variación de corriente I se puede calcular con la siguiente expresión:

$$E = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2$$

Calcula la energía almacenada en una bobina con 100 mH de coeficiente de autoinducción cuando es atravesada por una intensidad de corriente de 5 A.

La solución a estas Actividades propuestas la puedes encontrar dentro del MATERIAL WEB elaborado para este texto.

11.3.2. Aplicaciones prácticas de la autoinducción

Aprovechando el efecto de la f.e.m. autoinducida en una bobina se pueden construir dispositivos sencillos que consiguen elevar fuertemente la tensión, como por ejemplo:

- Encendido de un motor de explosión.
- Encendido de lámparas fluorescentes.

Encendido de un motor de explosión

Los automóviles de gasolina funcionan con motores de explosión. El sistema eléctrico de los mismos se alimenta mediante una batería de acumuladores de unos 12 V en C.C.

© Ediciones Paraninfo

Para conseguir que la mezcla de gasolina se encienda en el cilindro de explosión es necesario que surja una chispa eléctrica entre las puntas de la bujía. Esto último solo es posible con la utilización de altas tensiones. Como los transformadores no funcionan con la C.C. que suministra la batería se ideó el sistema que se explica a continuación (Figura 11.29).

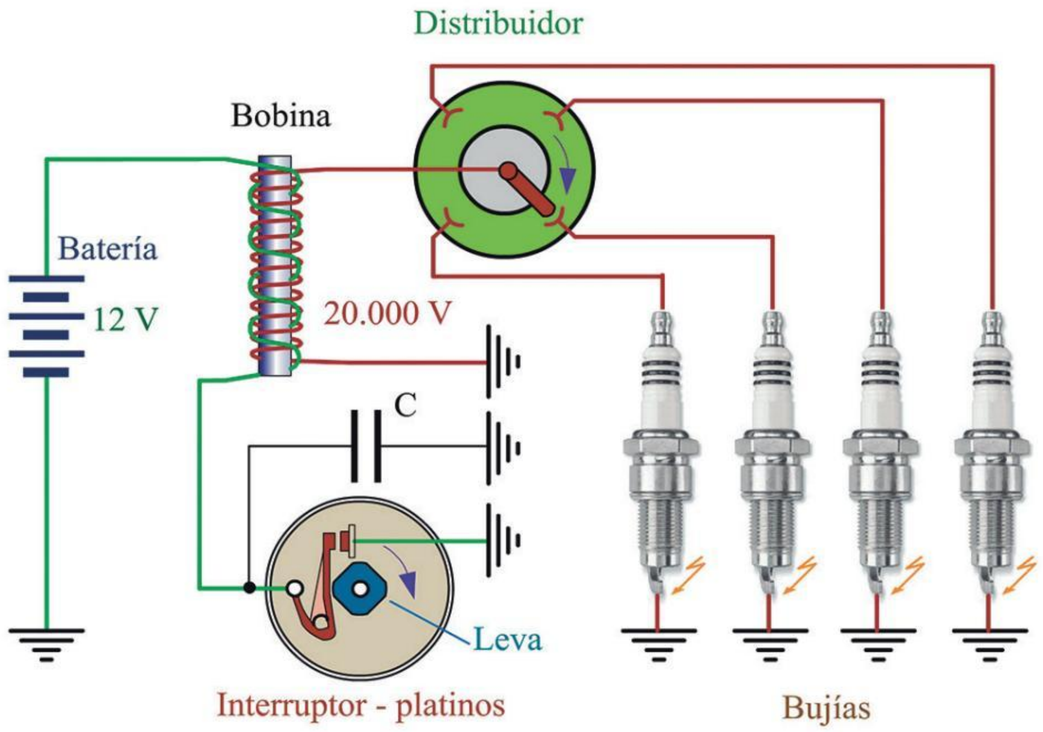


Figura 11.29. Esquema del sistema de encendido de un motor de explosión.

La leva gira arrastrada por el motor de explosión y hace que los contactos del interruptor de contactos de platino se abran rápidamente, cortando bruscamente el circuito que alimenta al primario de la bobina de encendido con núcleo de chapa magnética. Cuanto mayor sea la rapidez con que se abre el circuito, mayor será la f. e. m. de autoinducción que aparece en el primario. El secundario de la bobina posee un gran número de espiras, por lo que, a igualdad de flujo que en el primario, se induce en ella una tensión de miles de voltios. El distribuidor, que es una especie de conmutador rotativo, va poniendo sucesivamente en contacto al secundario con cada una de las bujías del motor de explosión. En el espacio que separa los electrodos de las bujías aparece una descarga en forma de chispa térmica, debido a la alta tensión entre los mismos, que provoca el encendido de la mezcla. El condensador conectado entre los contactos de los platinos sirve para eliminar el arco entre los mismos, evitando así la destrucción prematura de dichos contactos.

Hoy en día los automóviles modernos ya no utilizan este sistema de encendido. Gracias a la electrónica se ha conseguido sustituir el sistema mecánico de los platinos por un sistema electrónico mucho más sofisticado, aunque la bobina de encendido sigue existiendo.

Encendido de lámparas fluorescentes

Las lámparas fluorescentes funcionan gracias al efecto de luminiscencia que se da en ciertos gases nobles cuando son atravesados por una corriente eléctrica. El problema que presentan este tipo de lámparas es que necesitan una tensión muy elevada para que comiencen a fluir las cargas eléctricas por el tubo de descarga. Una vez que el tubo ha sido arrancado se mantiene la corriente eléctrica con una tensión baja.

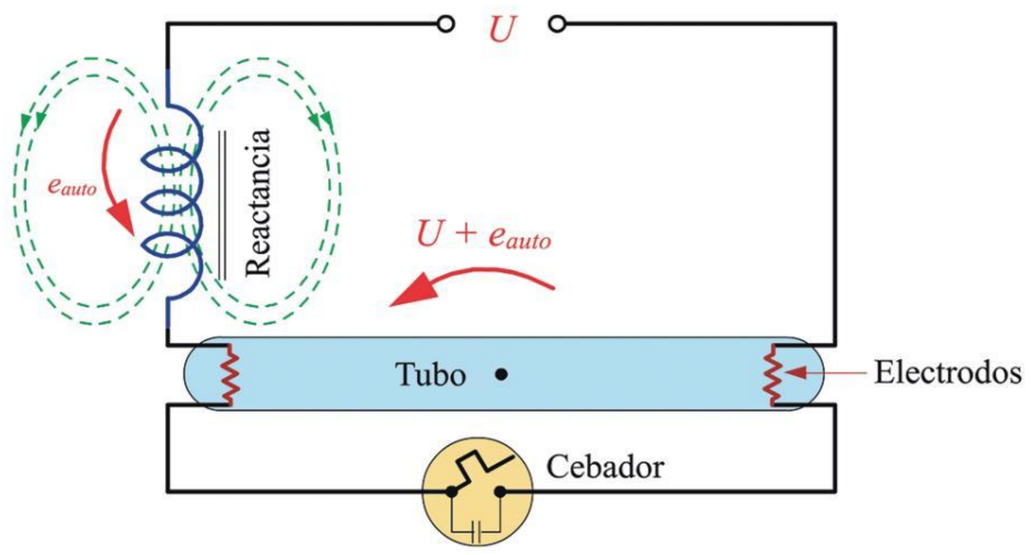


Figura 11.30. Circuito de arranque de un tubo fluorescente.

Para conseguir esta tensión en el arranque se incorpora una bobina de alto coeficiente de autoinducción (reactancia) en serie con el tubo de descarga. Cuando cerramos el interruptor, el cebador cierra sus contactos, permitiendo que los filamentos de los extremos calienten a los electrodos de emisión (esto facilita la emisión electrónica). En muy poco tiempo, el cebador abre bruscamente sus contactos, provocando una fuerte f. e. m. de autoinducción en la bobina. Esta tensión queda aplicada a los extremos del tubo y es suficiente para que se encienda el mismo. Una vez arrancado el tubo, el cebador mantiene sus contactos abiertos (Figura 11.30).

11.4. Fuerza sobre una corriente eléctrica en el seno de un campo magnético

En un generador eléctrico se produce una f. e. m. cuando se mueven conductores eléctricos en el seno de un campo magnético. Pues bien, los motores funcionan con el principio inverso.

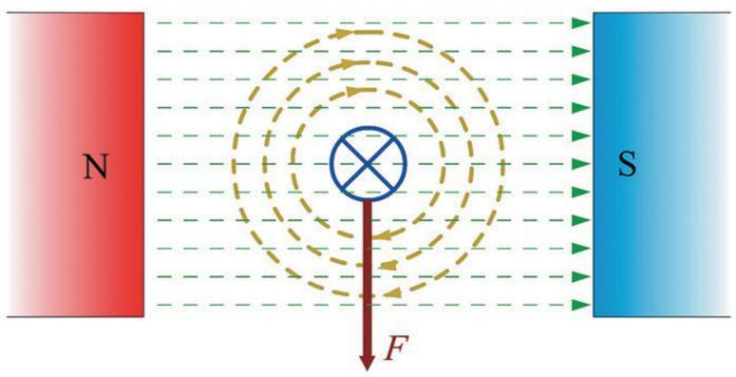


Figura 11.31. Fuerza en un conductor recorrido por una corriente eléctrica cuando está inmerso en un campo magnético.

Cuando un conductor está inmerso en el seno de un campo magnético y por él hacemos circular una corriente eléctrica, aparecen fuerzas de carácter electromagnético que tienden a desplazarlo.

© Ediciones Paraninfo

En la Figura 11.31 se puede ver un conductor eléctrico atravesado por una corriente entrante y sometido a la acción del campo magnético de un imán. La corriente eléctrica del conductor produce a su vez un campo magnético circular que interactúa con el del imán (Figura 11.32) y hace que el conductor se desplace en dirección perpendicular al campo magnético principal (en nuestro ejemplo, las líneas de fuerza del conductor tienden a concentrarse en la parte inferior, lo que provoca una fuerza sobre el conductor que lo empuja hacia abajo).

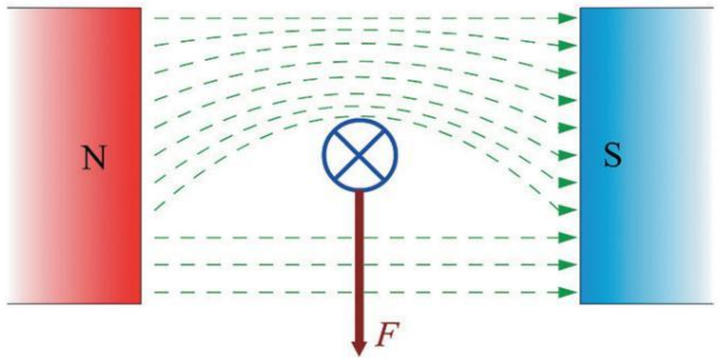


Figura 11.32.

Se observa que, si cambiamos el sentido de la corriente o el del campo, también cambia el sentido de la fuerza (Figura 11.33).

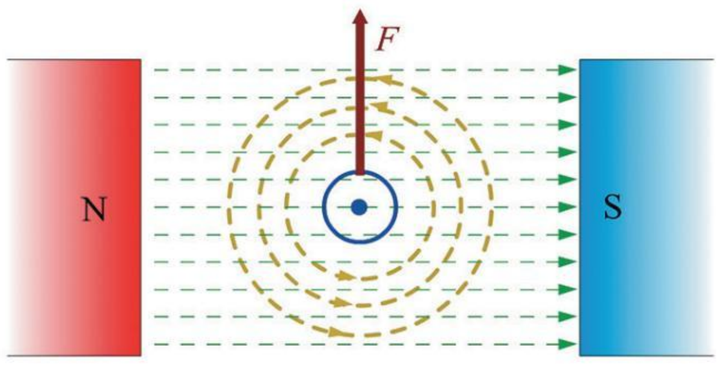


Figura 11.33.

Para determinar el sentido de la fuerza se aplica la regla de Fleming de la mano izquierda (Figura 11.34). Se aplica utilizando el mismo procedimiento que seguimos para la mano derecha, teniendo en cuenta que se utiliza el sentido convencional de la corriente.

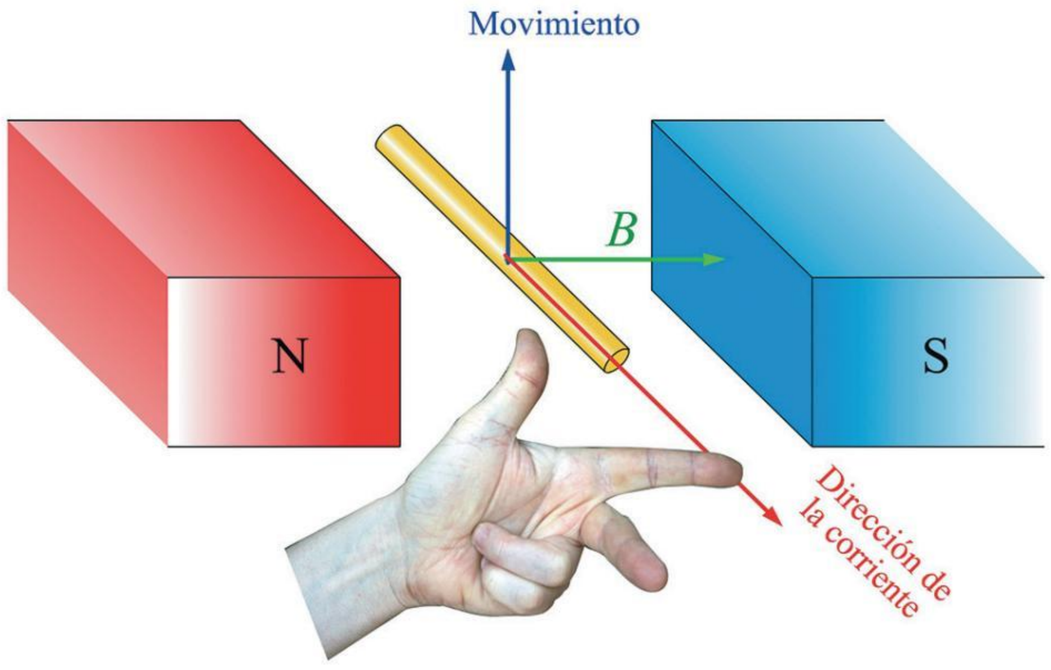


Figura 11.34. Regla de la mano izquierda para determinar el sentido de la fuerza.

El valor de la fuerza aumenta con la intensidad de la corriente, con el valor de la inducción del campo magnético y con la longitud del conductor.

$$F = B \cdot L \cdot I$$

F = Fuerza (N).

B = Inducción (T).

L = Longitud del conductor (m).

I = Intensidad (A).

Actividad resuelta 11.6

El conductor de la Figura 11.35 tiene una longitud de 0,5 metros y está inmerso en un campo magnético de 1,3 teslas de inducción. Averigua el sentido de desplazamiento del conductor, así como la fuerza que desarrollará cuando circule por él una intensidad entrante de 10 A.

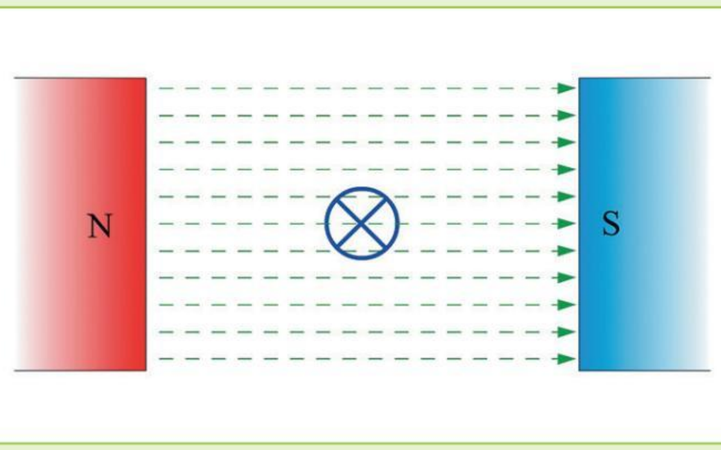


Figura 11.35.

Solución:

Aplicando la regla de la mano izquierda averiguamos que el conductor se desplazará hacia arriba.

$$F = BLI = 1{,}3 \cdot 0{,}5 \cdot 10 = 6{,}5 \text{ N}$$

Gracias a este principio desarrollado por Laplace, Biot y Savart se pueden construir multitud de dispositivos, como, por ejemplo, todo tipo de motores eléctricos, aparatos de medida analógicos, altavoces, etcétera.

En un motor de C.C. se consigue que cada uno de los conductores opuestos de la bobina desarrolle un par de fuerzas que hace girar el motor (Figura 11.36).

En un instrumento de medida de bobina móvil se consigue que el par de fuerzas que desarrollan los conductores de la bobina sea proporcional a la corriente a medir. El equilibrio entre la fuerza antagonista del muelle y dicho par hace que la aguja se desplace por la escala graduada indicando el resultado de la medida (Figura 11.37).

© Ediciones Paraninfo

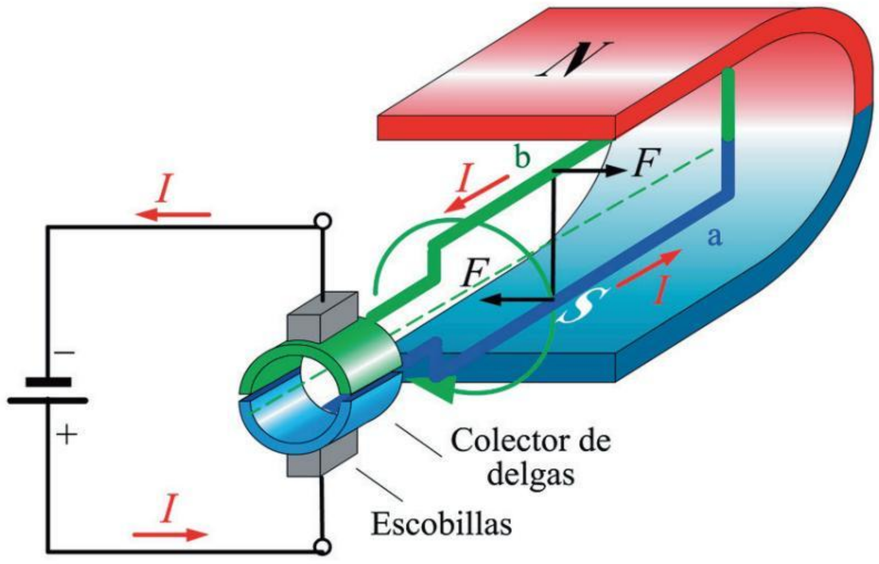


Figura 11.36. Motor de C.C.

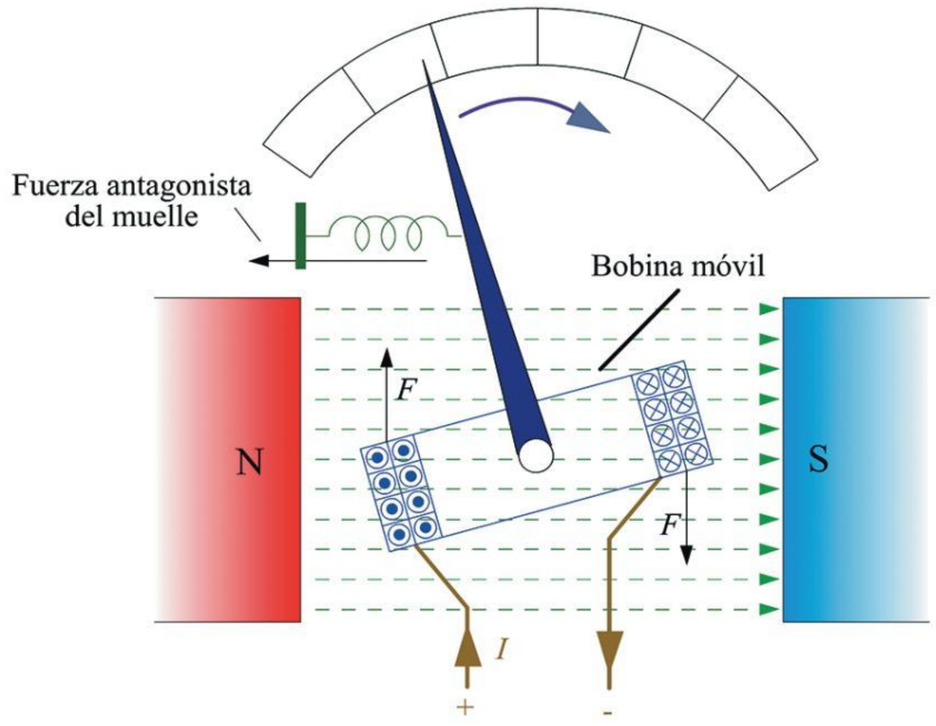


Figura 11.37. Instrumento de medida analógico.

11.4.1. Fuerza entre dos corrientes paralelas

Fue André Marie Ampère el primero en darse cuenta de que, los conductores al ser recorridos por una corriente eléctrica y producir un campo magnético, no solo interactúan ejerciendo fuerzas sobre otros elementos con propiedades magnéticas como imanes, sustancias ferromagnéticas, etc., sino que también lo hacen sobre otros conductores próximos que también estén recorridos por una corriente. En su investigación descubrió que cuando se hace circular una corriente eléctrica entre dos conductores rectos situados a una cierta distancia, estos desarrollan unas fuerzas entre ellos que pueden ser de atracción o repulsión, en función del sentido relativo de ambas corrientes (Figura 11.38).

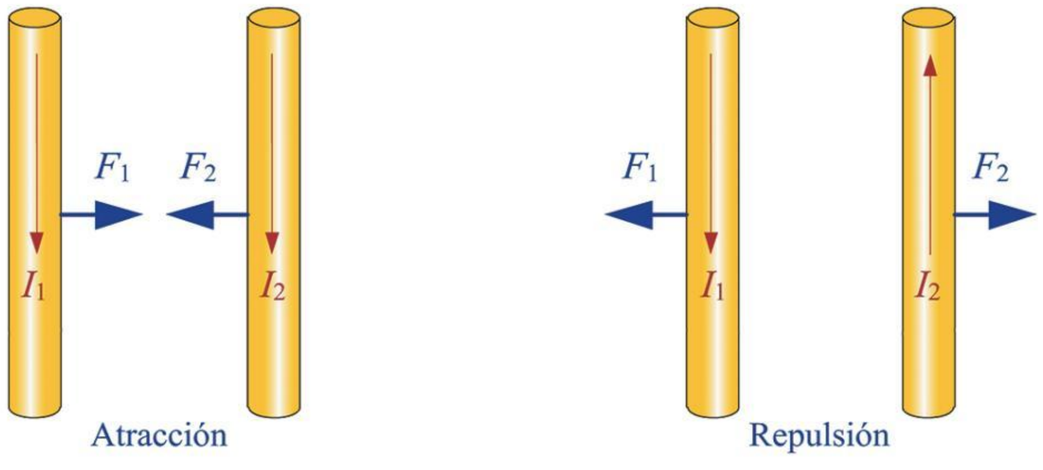


Figura 11.38. Fuerzas entre conductores paralelos.

Para corrientes del mismo sentido, las fuerzas son de atracción y para corrientes de sentido contrario las fuerzas resultan ser de repulsión. Para poder entender este último enunciado basta con aplicar las reglas de Fleming de la mano derecha e izquierda.

Para calcular el valor de estas fuerzas tendremos en cuenta los siguientes aspectos:

En la Figura 11.39 se han situado dos conductores paralelos, de longitud L, separados en el vacío por una distancia d, y que son recorridos por unas intensidades de corriente I_1 e I_2 de sentido contrario.

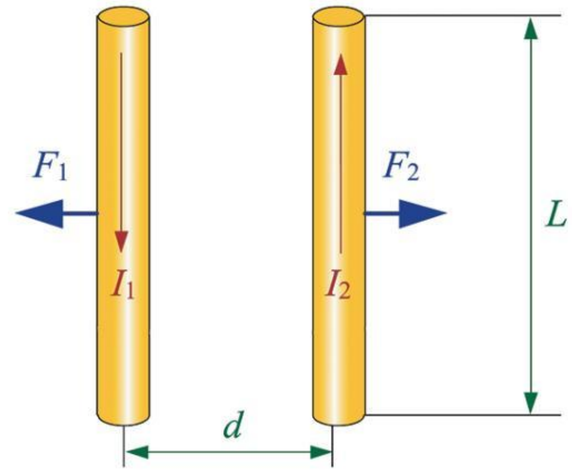


Figura 11.39.

La corriente I_1 produce un campo magnético cuya inducción magnética en un punto situado en el segundo conductor será igual a:

$$B_1 = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I_1}{d}$$

Por otro lado, la corriente I_2 también produce un campo magnético sobre el primer conductor igual a:

$$B_2 = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I_2}{d}$$

Dado que los conductores son recorridos por sus propias corrientes y a su vez están inmersos en el campo magnético producido por el conductor contrario, estos desarrollan una fuerza que será igual a:

$$F_1 = B_1 LI_2 \qquad F_2 = B_2 LI_1$$

Sustituyendo valores en estas últimas ecuaciones tenemos que:

$$F_1 = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I_1 \cdot I_2}{d} \cdot L \qquad F_2 = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I_2 \cdot I_1}{d} \cdot L$$

De donde se concluye que las fuerzas ejercidas por ambos conductores son del mismo valor.

© Ediciones Paraninfo

NOTA

Las fuerzas con las que interactúan los conductores cuando son recorridos por corrientes eléctricas se ponen de manifiesto en instalaciones donde se producen grandes intensidades de cortocircuito. En instalaciones con conductores en forma de pletina de cobre rígida, los esfuerzos dinámicos a los que quedan sometidas las mismas en caso de un cortocircuito elevado puede llegar a doblarlas e incluso a partirlas si no se diseñan adecuadamente. También es posible observar cómo los conductores de una red aérea de alta tensión se balancean después de un cortocircuito.

Actividad resuelta 11.7

Calcula la fuerza con la que se repelen dos conductores paralelos de 50 m de longitud separados por 10 cm, si por ellos fluye una intensidad de corriente de cortocircuito de distinto sentido de 5.000 A.

Solución:

$$F = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I_1 \cdot I_2}{d} \cdot L = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{5.000 \cdot 5.000}{10 \cdot 10^{-2}} \cdot 50 =$$

$$= 2.500 \text{ N}$$

11.4.2. Definición electromagnética de amperio

Si en la expresión obtenida de la fuerza ejercida entre dos corrientes eléctricas, hacemos que ambas corrientes sean igual a un amperio, la longitud de los conductores sea de un metro y la distancia entre ambas sea también de un metro, tendremos que:

$$I_1 = I_2 = 1 \text{ A}$$

$$d = L = 1 \text{ m}$$

$$F = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I_1 \cdot I_2}{d} \cdot L = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{1 \cdot 1}{1} \cdot 1 = 2 \cdot 10^{-7} \text{ N}$$

De aquí se obtiene la definición de amperio, como la intensidad de corriente que al fluir por dos conductores rectos, paralelos, de longitud infinita, de sección despreciable, separados entre sí, por una distancia de un metro en el vacío, que hace que se desarrolle sobre cada uno de los mismos una fuerza igual a $2 \cdot 10^{-7}$ newton por cada metro de longitud de conductor (Figura 11.40).

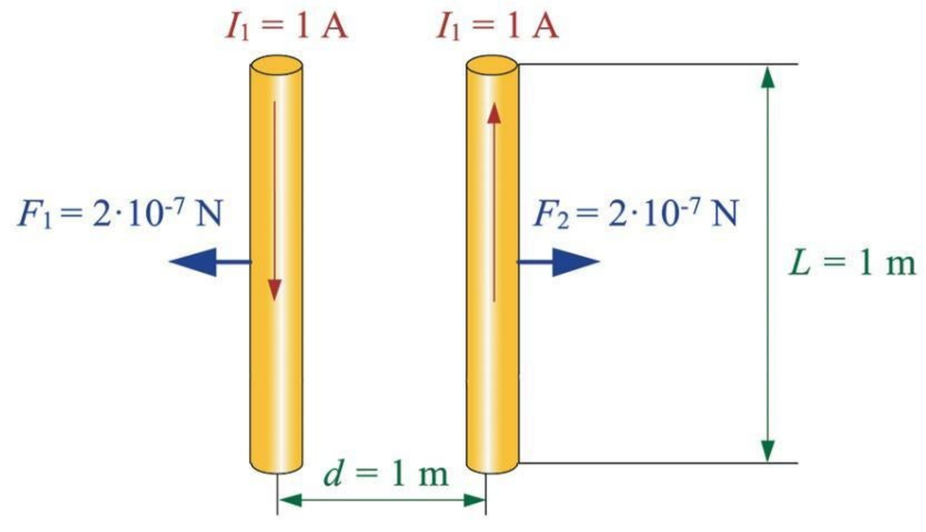


Figura 11.40. Definición de amperio.

© Ediciones Paraninfo

Comprobación práctica en el laboratorio

11.1. **Experiencia de Faraday.** Consigue los elementos necesarios en el laboratorio de Electrotecnia y lleva a cabo la experiencia de Faraday (Figura 11.41).

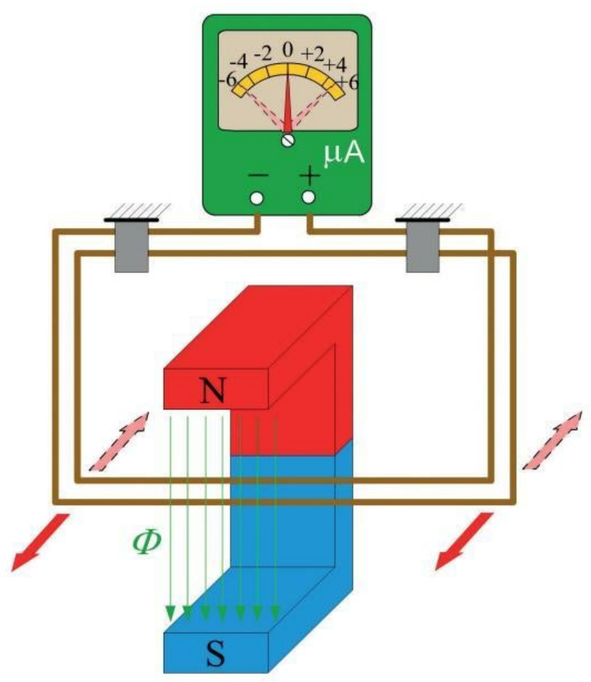


Figura 11.41. Montaje para realizar la experiencia de Faraday.

11.2. **Fuerza electromotriz inducida en circuitos próximos.** Consigue los elementos necesarios en el laboratorio de Electrotecnia y comprueba la fuerza electromotriz inducida en circuitos próximos (Figura 11.42).

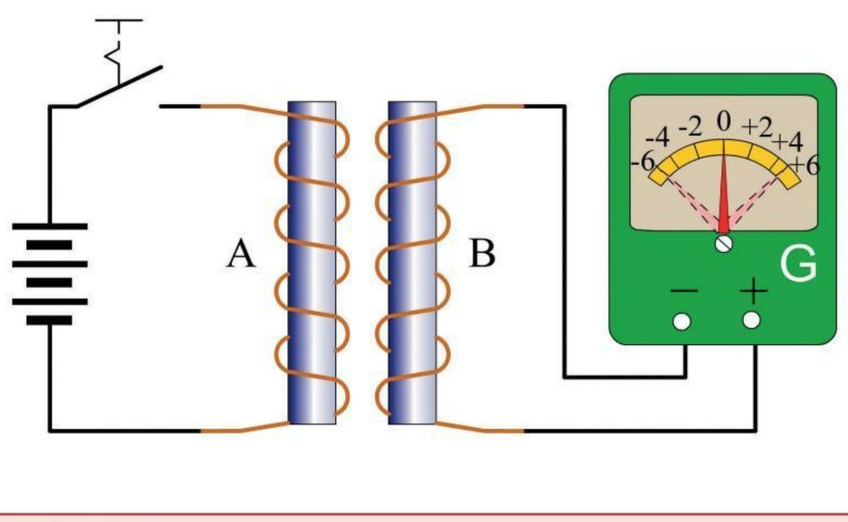


Figura 11.42. Montaje para la comprobación experimental de la f. e. m. inducida en circuitos próximos.

11.3. **Fuerza producida por un conductor.** Suspende una bobina en el seno del campo magnético de un imán. Comprueba que al hacer circular una C.C. por la bobina, en ella aparecen fuerzas que tienden a desplazarla (Figura 11.43).

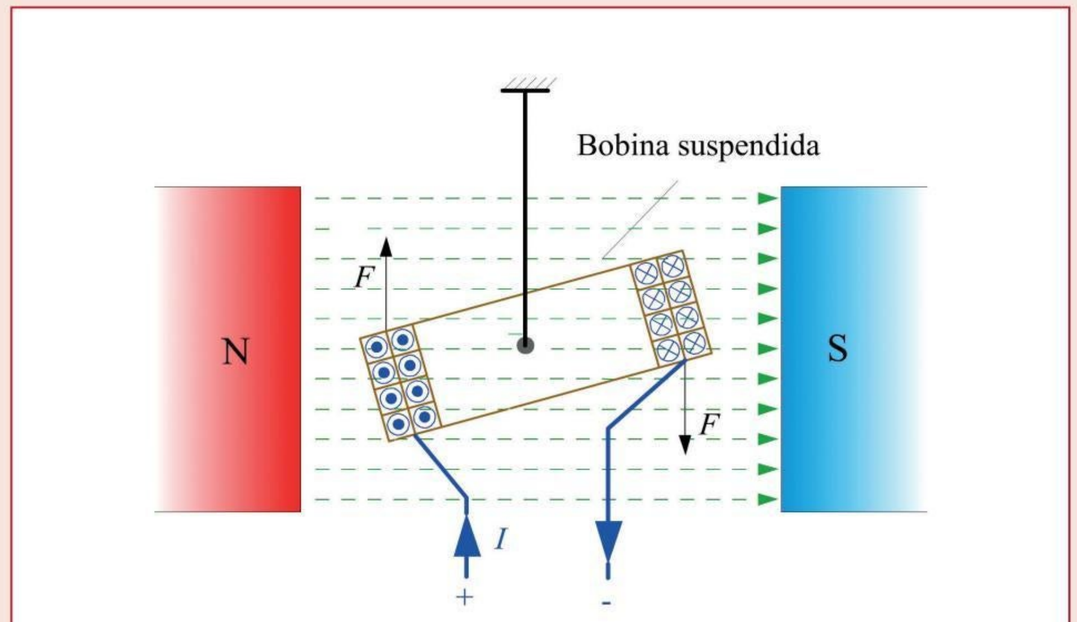


Figura 11.43. Montaje para la comprobación experimental de la fuerza producida por un conductor.

Al finalizar cada una de estas actividades deberás elaborar un informe-memoria sobre la actividad desarrollada, indicando los resultados obtenidos y estructurándolos en los apartados necesarios para una adecuada documentación de las mismas (descripción del proceso seguido, medios utilizados, esquemas y planos utilizados, cálculos, medidas, etc.).

© Ediciones Paraninfo

Actividades de comprobación

11.1. La inducción electromagnética se produce cuando:

a) Se mueven conductores en dirección perpendicular a un campo magnético fijo.

b) Se mueven conductores en dirección paralela a un campo magnético fijo.

c) Se somete a conductores fijos a la acción de un campo magnético variable.

11.2. El valor de la f.e.m. inducida en un conductor aumenta con:

a) Depende exclusivamente de lo intenso que sea el campo magnético.

b) Con la velocidad y el nivel de inducción electromagnética del campo.

c) Lo rápido que varía el flujo que corta el conductor.

11.3. ¿Cuál es el sentido de la corriente en el conductor de la Figura 11.44?

a) Saliente.

b) Entrante.

c) Nula.

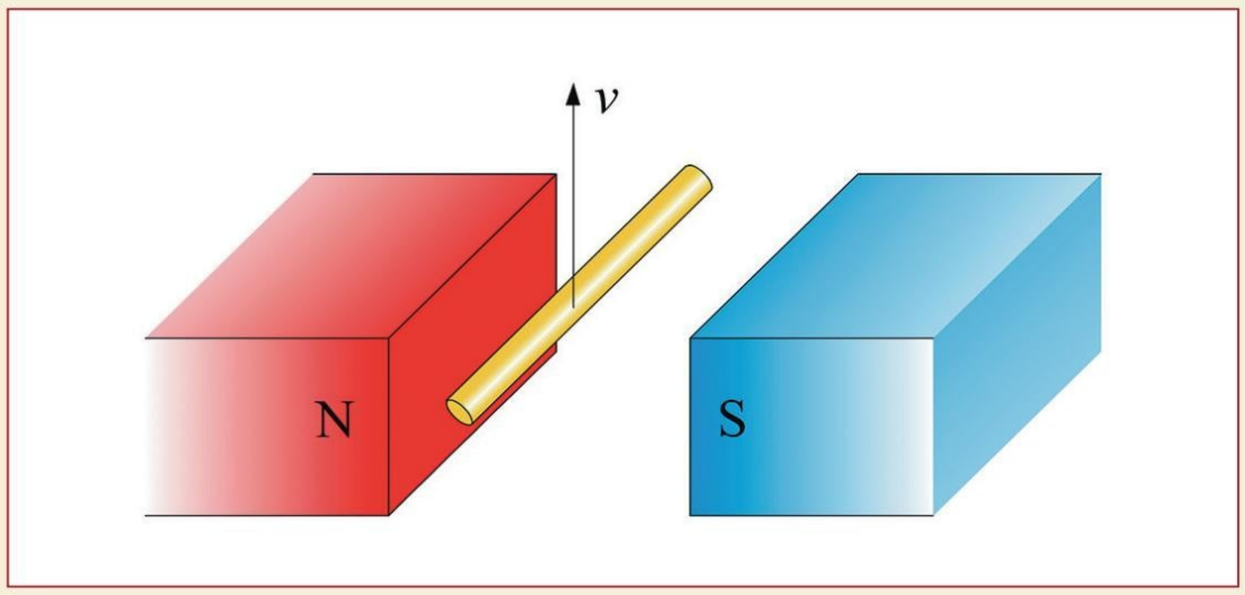


Figura 11.44.

11.4. ¿Cuál es el sentido de la corriente en el conductor de la Figura 11.45?

a) Saliente.

b) Entrante.

c) Nula.

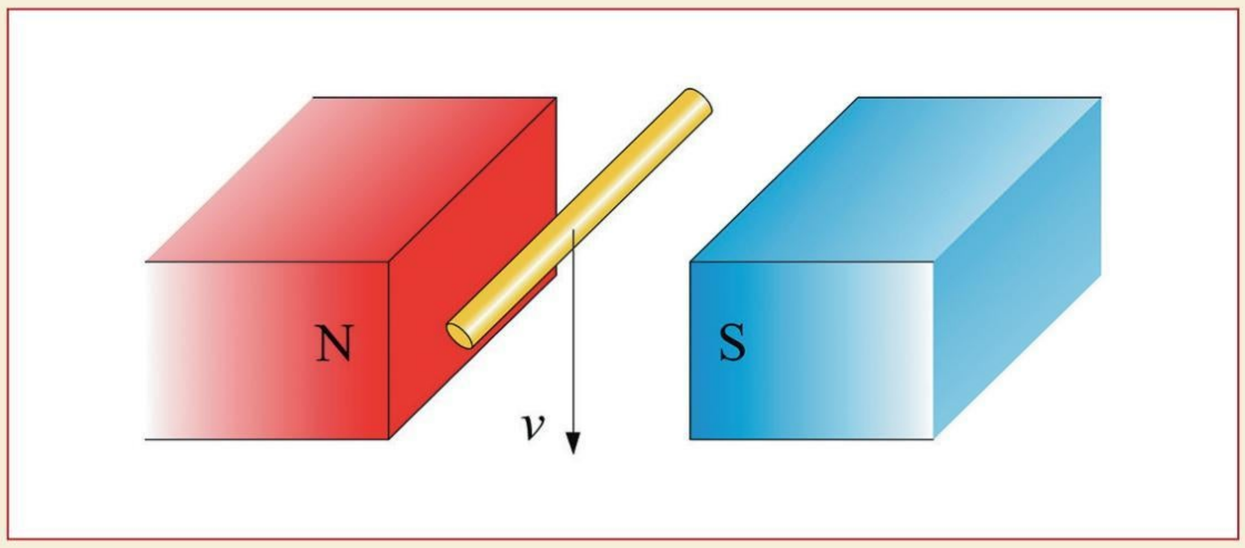


Figura 11.45.

© Ediciones Paraninfo

11.5. ¿Cuál es el sentido de la corriente en el conductor de la Figura 11.46?

a) Saliente.

b) Entrante.

c) Nula.

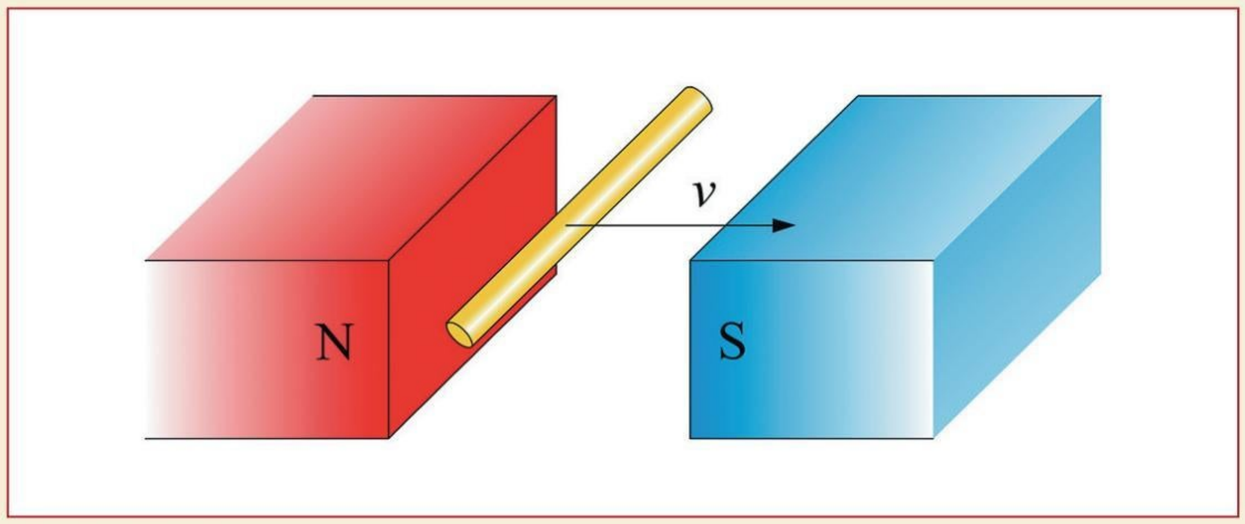


Figura 11.46.

11.6. ¿Qué ocurriría si utilizásemos un transformador diseñado para trabajar a una frecuencia europea de 50 Hz en una red eléctrica americana de 60 Hz?

a) No influiría en su normal funcionamiento.

b) Al aumentar la frecuencia de la corriente se ve potenciado el efecto de las corrientes parásitas y el núcleo del transformador tendería a calentarse algo más de lo habitual.

11.7. Calcula la f. e. m. inducida en una bobina de 300 espiras cuando es sometida a un cambio regular de flujo de 30 mWb a 60 mWb en un tiempo de 20 ms.

11.8. Un conductor recto se mueve perpendicularmente en el seno de un campo magnético de 0,95 teslas a una velocidad de 5 m/s. Determina el valor de la f. e. m. inducida si la longitud del conductor es de 15 cm.

11.9. ¿Cuál será el coeficiente de autoinducción de una bobina que, al ser sometida a un cambio de corriente de 1 A a 10 A en 40 ms, produce una f. e. m. de autoinducción de 220 V?

11.10. ¿En qué dirección y con qué fuerza se desplazará el conductor de la Figura 11.47 cuando sea recorrido por una intensidad de 25 A si la inducción magnética es de 1,6 T y su longitud es de 50 cm?

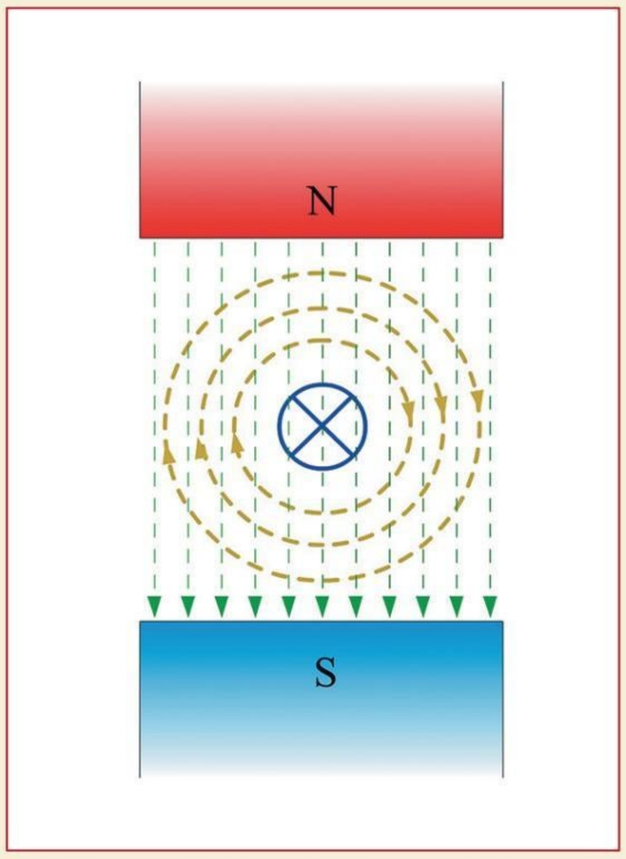


Figura 11.47.

© Ediciones Paraninfo

Actividades de evaluación resueltas

A continuación se dan los enunciados de una serie de actividades de evaluación. Estas actividades las podrás encontrar resueltas accediendo al MATERIAL WEB creado para este texto.

11.1. Por un solenoide de 300 espiras y 15 cm de longitud, circula una corriente eléctrica de 4 A, creándose un flujo magnético de $1{,}4 \cdot 10^{-5}$ Wb. El núcleo de la bobina es de aire. Calcula:

a) El coeficiente de autoinducción de la bobina.

b) La inducción magnética en el centro del solenoide.

c) El valor de la sección transversal del núcleo.

(Dato: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m).

11.2. Una bobina al aire ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m), de estructura toroidal, presenta las siguientes características: radio medio del toroide (15 cm), superficie encerrada por la espira (6 cm^2), número de espiras (1.400), corriente absorbida (6 A). Calcula:

a) La intensidad de campo, la inducción y el flujo total abrazado por la bobina.

b) La inductancia y energía almacenada por la misma.

c) La f. e. m. de autoinducción cuando se interrumpe la corriente linealmente en 3 ms.

Actividades de ampliación

Con el fin de conseguir una mayor profundización en la materia, se han incluido los enunciados de una serie de ***«actividades de evaluación propuestas de ampliación (11)»*** para esta unidad que podrás encontrar dentro del MATERIAL WEB elaborado para este texto. Selecciona alguna de estas actividades y encuentra su solución.

© Ediciones Paraninfo

12 La corriente alterna

Contenidos

- **12.1.** Ventajas de la corriente alterna
- **12.2.** Producción de una corriente alterna
- **12.3.** Valores característicos de la C.A.
- **12.4.** Receptores elementales en corriente alterna

En la actualidad la forma que se ha impuesto para la generación, transporte y consumo de la energía eléctrica es la de la corriente alterna. Este tipo de corriente, frente a la corriente continua, presenta una serie de ventajas que la hacen ideal para la mayoría de las aplicaciones.

Objetivos

- Definir los procesos que se dan en la generación de una corriente alterna.
- Identificar los valores fundamentales de una C.A., así como seleccionar el instrumento de medición adecuado para su medida.
- Manejar adecuadamente el osciloscopio para medir las magnitudes asociadas a una C.A. senoidal.
- Explicar los procesos que se dan en un circuito de C.A. al conectar resistencias, bobinas y condensadores.

12.1. Ventajas de la corriente alterna

En los inicios del desarrollo de los sistemas eléctricos, la electricidad se producía en forma de corriente continua mediante las dinamos. Este tipo de generador resulta bastante más complejo y difícil de mantener que los alternadores, ya que necesitan para extraer la energía eléctrica del rotor (parte del generador en movimiento giratorio) de un colector en forma de anillo metálico subdividido en el que frotan escobillas de grafito. Además la energía no se podía transportar a largas distancias, dado que no existía un sistema práctico que fuese capaz de elevar y reducir la tensión de grandes cantidades de energía (recuerda que para transportar grandes cantidades de energía eléctrica se necesita elevar la tensión para conseguir que la intensidad de la corriente no sea muy grande; así se evita el uso de grandes secciones en los conductores y se reducen las pérdidas por efecto Joule).

Los alternadores han sustituido en su totalidad a las dinamos, ya que, por un lado, evitan el uso de colectores (la energía eléctrica se produce directamente en el estator del generador) y, por otro, producen corriente alterna que se puede elevar y reducir con facilidad gracias a los transformadores eléctricos (estos necesitan de corrientes variables para funcionar).

En cuanto al consumo de energía eléctrica, los motores de C.A. son más sencillos y robustos que los de C.C. y resultan apropiados para la mayoría de las aplicaciones. En aquellos casos en que se hace necesario el uso de la corriente continua (alimentación de aparatos electrónicos, tratamientos electroquímicos, recarga de baterías de acumuladores, motores de C.C.), la conversión de C.A. a C.C. es sencilla y barata gracias a los rectificadores a base de diodos.

12.2. Producción de una corriente alterna

Dado que la C.A. sigue las variaciones de la función senoidal, antes de abordar su estudio, conviene que realices un pequeño repaso a los siguientes conocimientos de matemáticas: funciones trigonométricas (seno, coseno y tangente), ángulos complementarios, la función senoidal, variaciones de las funciones trigonométricas con el ángulo, representación vectorial y operaciones con vectores.

En el MATERIAL WEB que se ha elaborado para este texto se ha incluido un pequeño resumen de los conceptos básicos de trigonometría con algunos ejemplos prácticos que te ayudarán a entender mejor estos contenidos.

En la Figura 12.1 se muestra el aspecto de un alternador elemental. Consta de un campo magnético fijo producido por un imán, dentro del cual se hace girar un conductor eléctrico en forma de espira. Al cortar los conductores en su movimiento giratorio en el campo magnético, se produce en ellos una fuerza electromotriz de inducción que se muestra como una tensión U en los extremos de la espira. Para poder conectar dichos extremos a un receptor eléctrico es necesario utilizar un par de anillos conductores unidos eléctricamente con los extremos y situados en el eje de giro de la espira. Los receptores se conectan a través de unas escobillas fijas de grafito que mediante frotamiento consiguen un aceptable contacto eléctrico con los anillos colectores.

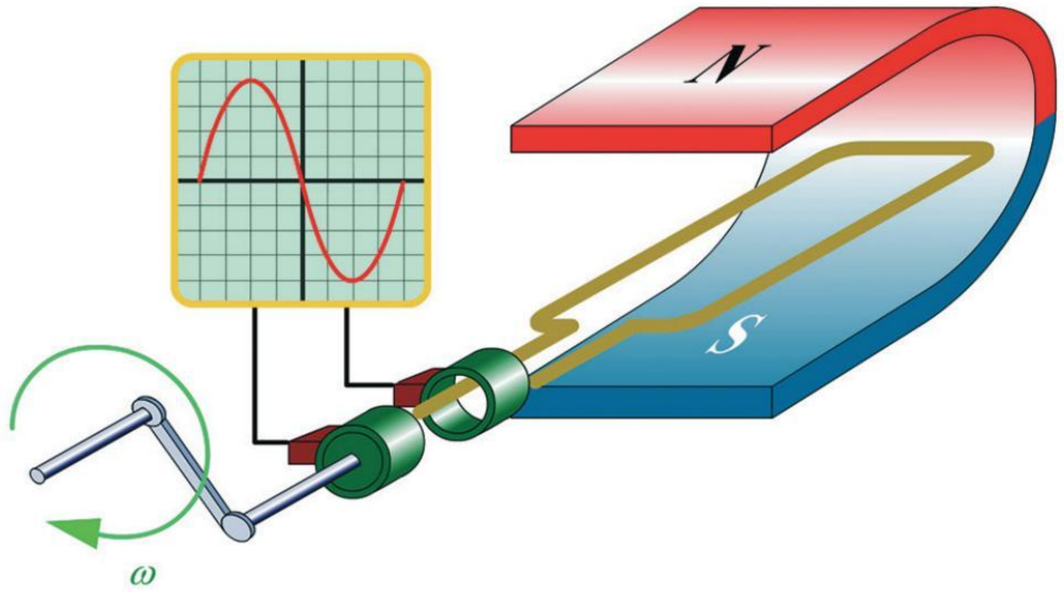


Figura 12.1. Alternador elemental.

Se puede comprobar que la tensión que aparece en los terminales de la espira es variable y posee la forma de una senoide, tal como se muestra en la Figura 12.2.

Una corriente alterna senoidal se caracteriza porque el valor de la corriente y de la tensión en cada instante cambia de valor y de sentido, siguiendo un ciclo repetitivo según la función senoidal.

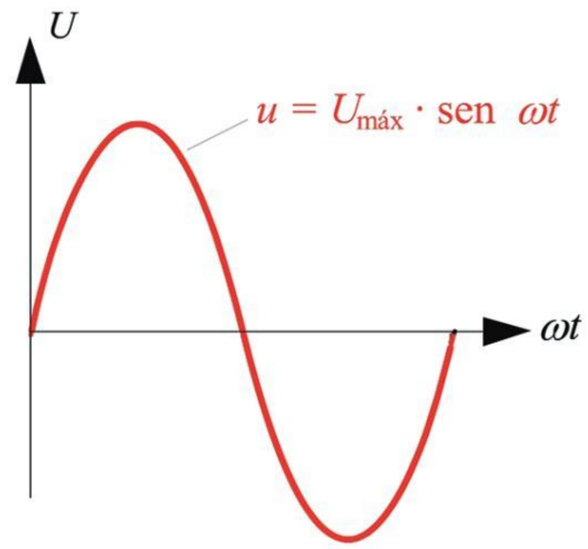


Figura 12.2. Representación de una tensión senoidal.

El valor instantáneo de la tensión es:

$$u = U_{máx} \text{ sen } \omega t$$

© Ediciones Paraninfo

donde:

$U_{máx}$ = Valor más alto que alcanza la tensión.

ω = Velocidad angular que suministra el alternador.

t = Tiempo.

Para poder comprender mejor estas variables vamos a estudiar cómo se consigue generar esta forma de onda senoidal mediante un alternador elemental como el de la Figura 12.1.

La espira gira en el seno de un campo magnético a una cierta velocidad angular ω, que mediremos en radianes por segundo (Figura 12.3).

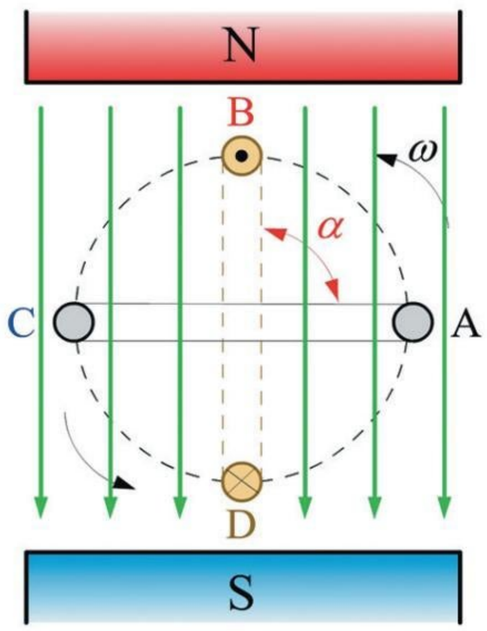


Figura 12.3. Espira que gira dentro de un campo magnético.

$$\omega = \frac{\alpha}{t}$$

La velocidad angular ω nos indica el ángulo α girado por la espira en la unidad de tiempo.

En su giro los conductores de la espira cortan el campo magnético, por lo que aparece en ellos una f. e. m. inducida. Si observamos atentamente las distintas posiciones que toma la espira respecto al campo magnético, podremos comprobar que el corte de esta respecto al campo magnético no siempre es perpendicular. Es más, solo se produce ese caso en los puntos B y D. En los puntos A y C los conductores se mueven paralelamente al campo magnético, por lo que aquí la f. e. m. es cero. Al moverse el conductor entre cualquiera de estos puntos aparece un ángulo de corte que está entre 0º y 90º; ¿qué f. e. m. se produce entonces? (Figura 12.4).

Para poder averiguarlo, tendremos que determinar primero cuál es el **valor de la f. e. m.** inducida en un conductor **cuando se mueve con un ángulo γ respecto a la perpendicular de las líneas de fuerza del campo magnético.**

El conductor de la Figura 12.5 se mueve con una velocidad (v) y un ángulo (γ) respecto a la perpendicular de las líneas de fuerza. Como para producir f. e. m. inducida debemos mover el conductor perpendicularmente, descomponemos (v) en su componente perpendicular (v_p). Al aplicar las reglas trigonométricas obtenemos el siguiente resultado:

$$v_p = v \cos \gamma$$

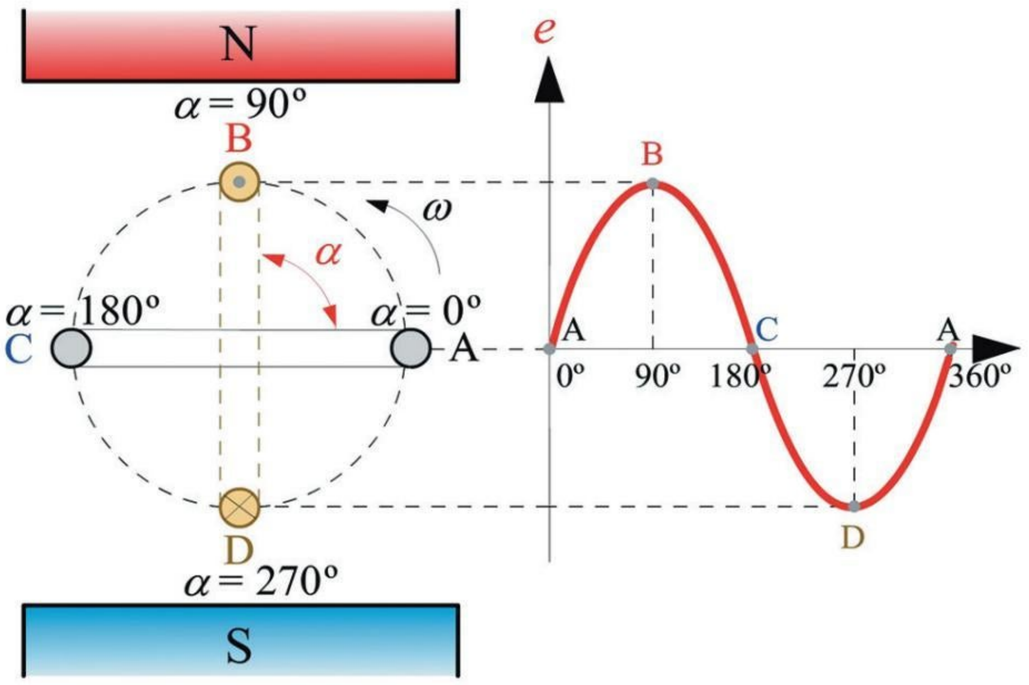


Figura 12.4. Al girar la espira se produce una tensión senoidal.

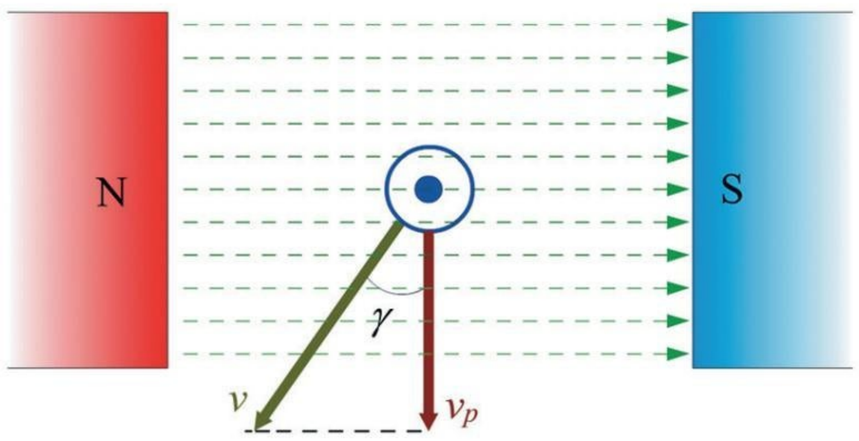


Figura 12.5. F. e. m. inducida en un conductor que se mueve en dirección oblicua al campo magnético.

La f. e. m. inducida tendrá entonces un valor de:

$e = B \cdot L \cdot v_p$, de donde: $e = B \cdot L \cdot v \cos \gamma$.

e = f. e. m. inducida en voltios.

B = Inducción magnética en teslas.

L = Longitud del conductor en metros.

v = Velocidad del conductor en m/s.

$\cos \gamma$ = Coseno del ángulo con el que se mueve el conductor respecto a la perpendicular del campo magnético.

Veamos lo que ocurre ahora cuando el **conductor se mueve en sentido giratorio en el seno de un campo magnético.**

El conductor gira con la velocidad angular ω (Figura 12.6).

© Ediciones Paraninfo

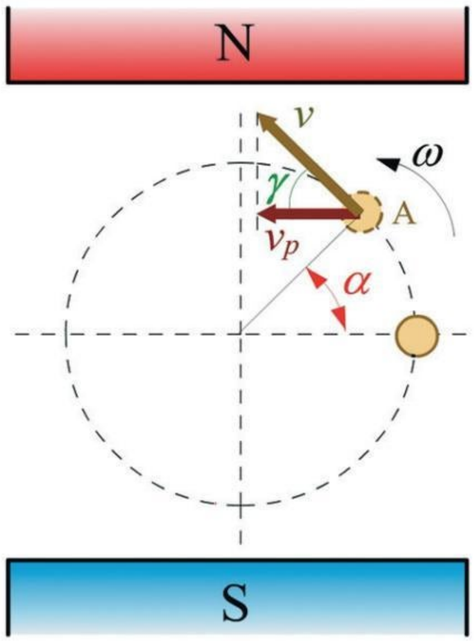


Figura 12.6. F. e. m. de un conductor que gira dentro de un campo magnético.

En el punto A se mueve con una velocidad tangencial (v). Si descomponemos esta velocidad en su componente perpendicular respecto a las líneas de campo, tendremos que:

$$e = B \cdot L \cdot v \cos \gamma$$

Ahora podemos relacionar el ángulo de giro α con el de la componente perpendicular γ, que como son complementarios:

$$\cos \gamma = \text{sen } \alpha$$

de donde se deduce que:

$$e = B \cdot L \cdot v \text{ sen } \alpha$$

y como $\alpha = \omega t$, nos queda que:

$$e = B \cdot L \cdot v \text{ sen } \omega t$$

Los valores de B, L y v suelen ser constantes en un alternador y coinciden con el valor máximo de la f. e. m. De esta forma podemos expresar el valor instantáneo de la f. e. m. en el conductor así:

$$e = E_{máx} \text{ sen } \omega t$$

A ω se la conoce por el nombre de pulsación de la corriente y se expresa en radianes/segundo. La f. e. m. sigue los cambios de la función senoidal, tal como se puede comprobar en la Figura 12.7.

Punto **A:** el conductor se mueve en dirección paralela a las líneas de fuerza, sen 0º = 0 y, por tanto, $e = 0$.

Punto **B:** el conductor se mueve con un ángulo de 45º y la fuerza electromotriz alcanza un valor intermedio: $e = E_{máx}$ sen 45º.

Punto **C:** el ángulo es de 90º; se alcanza el valor máximo de la f. e. m.: $e = E_{máx}$ sen 90º = $E_{máx}$.

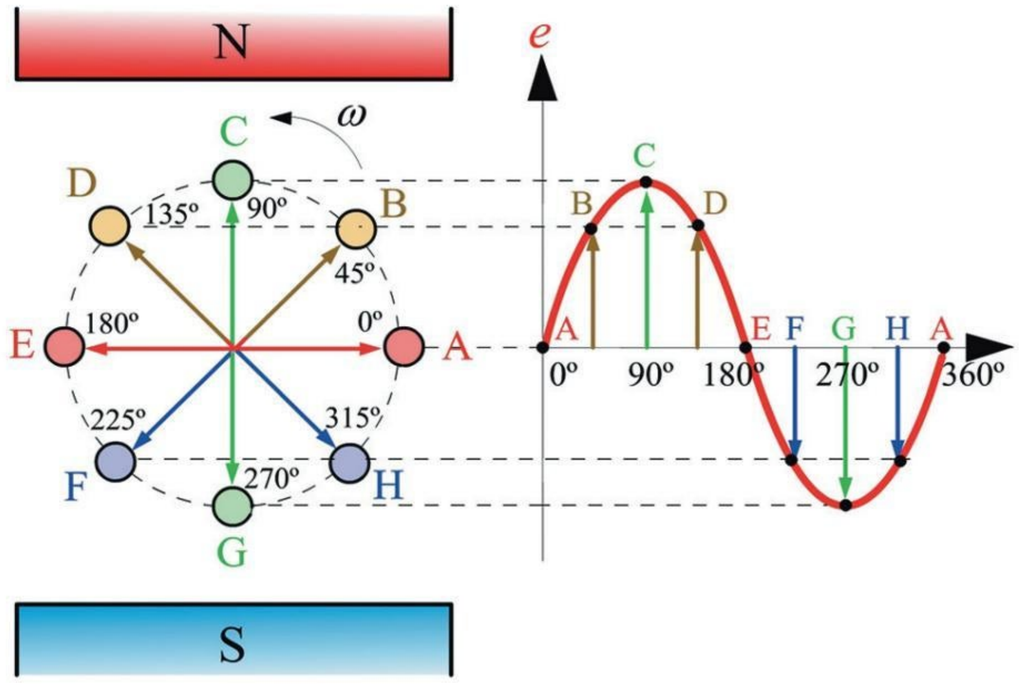


Figura 12.7. Generación de una f. e. m. senoidal.

Punto **D:** el ángulo es de 135º y la f. e. m. alcanza el mismo valor que en el punto B.

Punto **E:** el ángulo es de 180º y el conductor se mueve en dirección paralela a las líneas de fuerza, por lo que $e = 0$.

Punto **F:** se invierte el sentido del movimiento del conductor y, con él, el de la f. e. m. (aplicar la regla de la mano derecha).

Punto **G:** se alcanza el valor máximo negativo: $e = E_{máx}$ sen 270º = $- E_{máx}$.

Punto **A:** se completa una vuelta completa del conductor y con ella se cubre un ciclo completo.

En la práctica y con el fin de eliminar los anillos colectores, los alternadores se construyen de tal forma que lo que se pone en movimiento de giro son las piezas polares que producen el campo magnético inductor. En el estator se sitúan los conductores donde se genera la f. e. m. de inducción cuando son cortados por el campo magnético en movimiento (Figura 12.8).

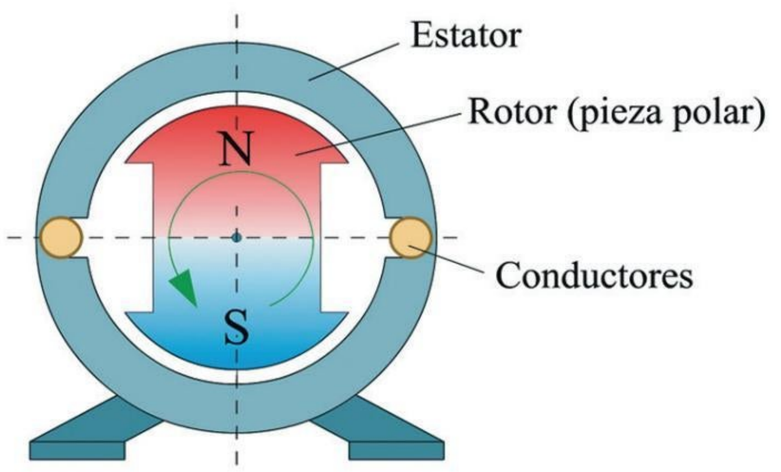


Figura 12.8. Alternador elemental donde los conductores permanecen fijos y el campo magnético es móvil.

© Ediciones Paraninfo

12.3. Valores característicos de la C.A.

Al representar en un gráfico la tensión que aparece en un alternador en función del tiempo o del ángulo de giro, aparece una curva que se conoce con el nombre de senoide. Esto es así porque la tensión queda en función del seno del ángulo α de giro. Para estudiar todos los valores que se dan en una tensión senoidal vamos a tomar como ejemplo una C.A. como la que disponemos en nuestras viviendas, de 230 V y de frecuencia 50 ciclos por segundo. En la Figura 12.9 se muestra el aspecto que presentaría dicha corriente en la pantalla de un osciloscopio.

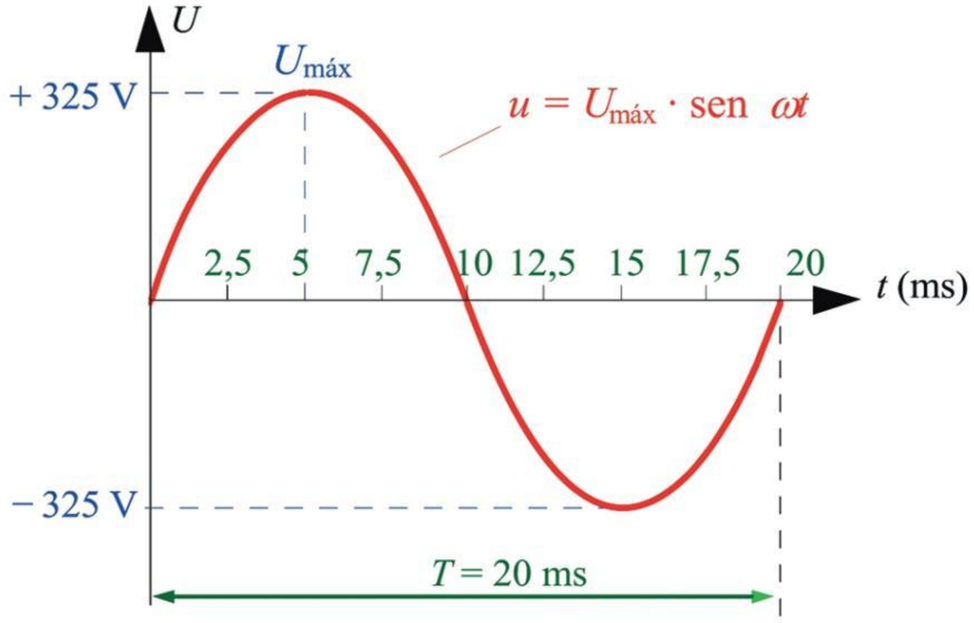


Figura 12.9. Representación de una C.A. senoidal industrial.

12.3.1. Valor instantáneo

Es el valor que toma la tensión en cada instante del tiempo siguiendo la función senoidal:

$$u = U_{máx} \text{ sen } \omega t$$

En el ejemplo de la Figura 12.9 existen todos aquellos valores instantáneos comprendidos entre 0 y 325 V y entre 0 y –325 V.

Actividad resuelta 12.1

¿Cuál sería la tensión instantánea de nuestro ejemplo de la Figura 12.9 para un ángulo de giro de 30° del alternador elemental?

Solución:

Como $\omega t = \alpha$,

$$u = 325 \text{ sen } 30° = 162{,}5 \text{ V}$$

12.3.2. Valor máximo de la tensión

La tensión senoidal alcanza diferentes valores según la posición relativa de los conductores respecto al campo magnético. Varía a cada instante, de tal forma que por cada ciclo es dos veces nula y dos veces máxima (pero de sentido opuesto, $+U_{máx}$ y $-U_{máx}$). Se denomina valor máximo al mayor de todos ellos, y que en el gráfico se da en las crestas de la senoide. En nuestro ejemplo este valor es de 325 V.

12.3.3. Tensión eficaz

Dado que la tensión cambia constantemente (en nuestro ejemplo, desde 0 V a 325 V), se hace necesario determinar un valor intermedio que represente a la tensión para realizar los cálculos y medidas; nos referimos a la tensión eficaz. En nuestro ejemplo, la tensión eficaz es 230 V y es la que mide un voltímetro de C.A. La tensión eficaz también se puede definir como aquella que en las mismas condiciones produce los mismos efectos caloríficos en una resistencia eléctrica que una tensión continua del mismo valor.

Para una C.A. senoidal, se puede demostrar que la tensión eficaz es $\sqrt{2}$ más pequeña que la tensión máxima:

$$U_{ef} = \frac{U_{máx}}{\sqrt{2}}$$

12.3.4. Intensidad eficaz

Al igual que ocurre con la tensión, la intensidad de la corriente también varía según una función senoidal, siendo dos veces nula y dos veces máxima por cada ciclo del alternador. La intensidad eficaz es el valor intermedio que produce los mismos efectos energéticos que una corriente continua del mismo valor. Además es la que indican los amperímetros de C.A. Aplicando la ley de Ohm tendríamos que:

$$I_{ef} = \frac{U_{ef}}{R}, \quad \text{siendo} \quad I_{ef} = \frac{I_{máx}}{\sqrt{2}}$$

Actividad resuelta 12.2

¿Cuál es el valor eficaz de una tensión alterna si su valor máximo es 325 V?

Solución:

$$U_{ef} = \frac{U_{máx}}{\sqrt{2}} = \frac{325}{\sqrt{2}} = 230 \text{ V}$$

Actividad resuelta 12.3

¿Cuál es el valor máximo de una tensión alterna de 125 V?

Solución:

$$U_{máx} = U_{ef} \cdot \sqrt{2} = 125 \cdot \sqrt{2} = 177 \text{ V}$$

© Ediciones Paraninfo

Actividad resuelta 12.4

Conectamos una resistencia de 100 ohmios a una red de C.A. de 230 V. Determina el valor eficaz y máximo de la intensidad de la corriente.

Solución:

Siempre que nos indiquen el valor de la tensión o corriente de una C.A. se refiere al valor eficaz, que en nuestro ejemplo es de 230 V. De esta forma el valor eficaz de la corriente lo calculamos aplicando la ley de Ohm:

$$I_{ef} = \frac{U_{ef}}{R} = \frac{230}{100} = 2{,}3 \text{ A}$$

$$I_{máx} = I_{ef} \cdot \sqrt{2} = 2{,}3 \cdot \sqrt{2} = 3{,}25 \text{ A}$$

El conocimiento de los valores máximos que alcanza la tensión de una C.A. es muy importante, ya que es necesario seleccionar los aislantes adecuados para aparatos y conductores eléctricos que sean capaces de soportar dichos valores máximos.

12.3.5. Valor medio del ciclo completo

Si realizamos la media de todos los valores en un ciclo completo, dado que la mitad son positivos y la otra negativos, obtendremos un resultado de cero. Es por eso por lo que, como un aparato de C.C. mide exclusivamente el valor medio, al realizar una medida con un voltímetro o amperímetro de C.C. en un sistema de C.A. obtendremos una medida de cero.

12.3.6. Ciclo o periodo

En el alternador elemental estudiado al comienzo de esta unidad, se podría decir que cada vuelta que da la espira produce un ciclo. El periodo es el tiempo que transcurre en un ciclo completo. Se representa por la letra T y se mide en segundos.

En el ejemplo de la Figura 12.9 se puede comprobar que el periodo es de 20 milésimas de segundo. Este tiempo es bastante pequeño, y en el caso de que lo produjese nuestro alternador elemental, significaría que tardaría solamente en completar una vuelta 20 ms.

¿Cuántas vueltas dará nuestro alternador elemental en un tiempo de 1 segundo?

Como por cada vuelta se invierten 0,02 segundos, en 1 segundo tendremos:

$$\frac{1}{0{,}02} = 50 \text{ vueltas}$$

En este caso se podría decir que el alternador gira a 50 vueltas por segundo y produce una C.A. senoidal de 50 ciclos por segundo.

12.3.7. Frecuencia

Es el número de ciclos que se producen en un segundo. Se representa por la letra f y se mide en hercios (Hz) o en ciclos/segundo.

De esta definición es fácil deducir que, en el caso del alternador elemental, la frecuencia es de 50 Hz y que coincide con las revoluciones por segundo de la espira. También se deduce que para calcular la frecuencia, conocido el periodo, emplearemos la siguiente expresión:

$$f = \frac{1}{T}$$

Actividad resuelta 12.5

¿Cuál será el valor de la frecuencia de una C.A. senoidal si mediante un osciloscopio determinamos que su periodo es de 0,010 segundos?

Solución:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0{,}010} = 100 \text{ Hz}$$

Actividad resuelta 12.6

Determina el periodo que le corresponde a la frecuencia de la red eléctrica americana si su frecuencia es de 60 Hz.

Solución:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{60} = 0{,}01666 \text{ s} = 16{,}66 \text{ ms}$$

Para medir la frecuencia se utiliza el frecuencímetro.

Actividad resuelta 12.7

En la Figura 12.10 se muestra el esquema de conexiones de un frecuencímetro y un voltímetro de C.A. conectados a la entrada de un cuadro de distribución.

Las lecturas de estos aparatos de medida son 40 Hz y 500 V, respectivamente. Determina el periodo y el valor máximo de la tensión.

© Ediciones Paraninfo

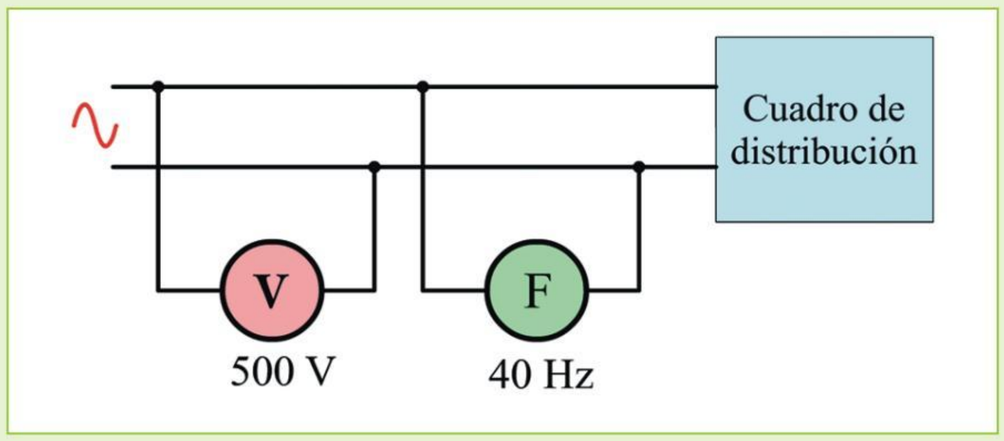


Figura 12.10.

Solución:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{40} = 0{,}025 \text{ s}$$

$$U_{máx} = U_{ef} \cdot \sqrt{2} = 500 \cdot \sqrt{2} = 707 \text{ V}$$

12.3.8. Relación entre la frecuencia y la velocidad angular

La frecuencia está relacionada directamente con la velocidad angular ω a la que gira el alternador. Para que un alternador, con un par de polos, produzca, por ejemplo, una frecuencia de 50 Hz, necesita girar a una velocidad (n) de 50 revoluciones por segundo. La velocidad angular que le correspondería en este caso sería la siguiente:

$$\omega = \frac{\alpha}{t} = \frac{50 \cdot 2\pi}{1} = 100\ \pi \text{ rad/s}$$

Otra forma de verlo sería así: en una revolución se cubre un tiempo igual a un periodo ($t = T$) y un ángulo igual a 2π radianes ($\alpha = 2\pi$):

$$\omega = \frac{\alpha}{t} = \frac{2\pi}{T}, \quad \text{como} \quad f = \frac{1}{T}$$

$$\omega = 2\pi f$$

Actividad resuelta 12.8

¿Qué valor instantáneo alcanzará una tensión de 50 Hz si el valor máximo es de 311 y el tiempo de 0,003 s?

Solución:

Primero calculamos la velocidad angular:

$$\omega = 2\pi f = 2 \cdot \pi \cdot 50 = 100 \cdot \pi \text{ rad/s}$$

El valor instantáneo a los 0,003 s se calcula así:

$$u = U_{máx} \text{ sen } \omega t = 311 \cdot \text{sen } (100 \cdot \pi \cdot 0{,}003 \text{ rad}) =$$
$$= 311 \cdot \text{sen } (54°) = 251{,}6 \text{ V}$$

Nota: Se ha transformado el ángulo en radianes a grados para operar el seno.

12.4. Receptores elementales en corriente alterna

Ahora vamos a estudiar el comportamiento de los receptores elementales cuando son sometidos a una corriente alterna. Dentro de la multitud de receptores que se pueden construir existen tres elementos claramente diferenciados. Nos referimos a las resistencias, bobinas y condensadores. Estos receptores se comportan de diferente manera, según se les aplique corriente continua o alterna.

12.4.1. Circuito con resistencia pura

Los circuitos con resistencia aparecen prácticamente en todo tipo de receptores, ya que hay que tener en cuenta que los propios conductores con los que se diseñan los receptores siempre poseen algo de resistencia. Por supuesto, los receptores que utilizan básicamente las resistencias son los calefactores.

En corriente continua: recordemos que cuando una corriente continua fluye por una resistencia, esta se calienta. Para calcular el valor de la corriente aplicamos la ley de Ohm:

$$I = \frac{U}{R}$$

I = Intensidad en amperios.
U = Tensión en voltios.
R = Resistencia en ohmios.

La potencia que aparece en la resistencia se transforma en energía calorífica y se calcula mediante las expresiones:

$$P = U \cdot I \qquad P = R \cdot I^2$$

P = Potencia en vatios.

En corriente alterna: una resistencia pura se comporta de forma similar en corriente alterna que en continua. En este caso también se cumple la ley de Ohm, pero ahora se aplica con los valores eficaces de la corriente y la tensión, que son los que indicarían un amperímetro y un voltímetro, respectivamente (Figura 12.11).

$$I = \frac{U}{R}$$

I = Intensidad eficaz en amperios.
U = Tensión eficaz en voltios.
R = Resistencia en ohmios.

De esta manera, se puede deducir que, para una tensión determinada aplicada a una resistencia, la intensidad eficaz que aparece en corriente alterna es del mismo valor que la intensidad de corriente continua que recorre el mismo circuito.

© Ediciones Paraninfo

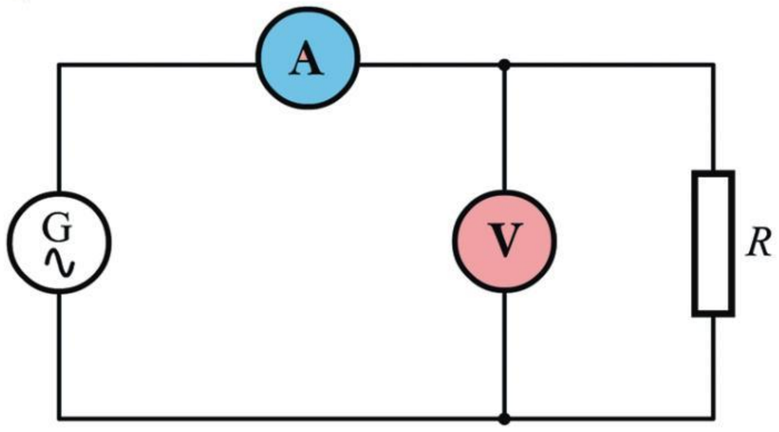


Figura 12.11.

Dado que la tensión que aplicamos a la resistencia varía según la forma de una senoide, si aplicamos la ley de Ohm a todos estos valores, obtendremos una intensidad de corriente eléctrica que también es una senoide, tal como se muestra en la Figura 12.12.

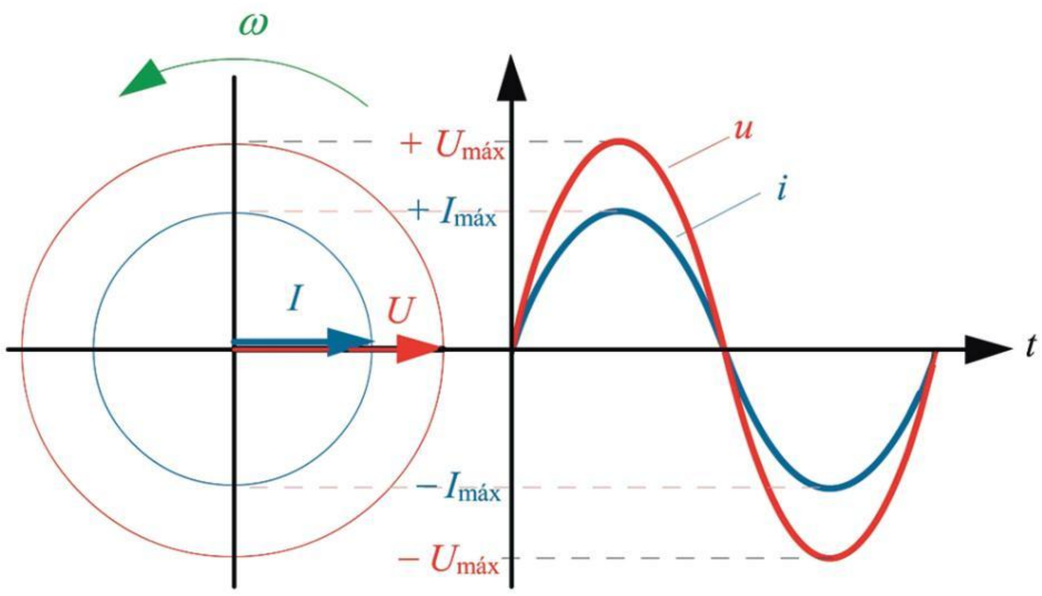


Figura 12.12. Representación de la tensión y la corriente en una resistencia.

Si observamos detenidamente la representación gráfica de la tensión e intensidad podremos comprobar que, cuando el valor de la tensión U aumenta o disminuye, también lo hace el de la corriente I, alcanzando los valores máximos y nulos en el mismo instante de tiempo. En este caso se puede decir **que la corriente y la tensión están en fase.**

En el gráfico inferior de la Figura 12.12 se ha representado el diagrama vectorial de U y de I. Estas magnitudes aparecen dibujadas como dos vectores que giran a la velocidad ω en el sentido contrario al de las agujas de un reloj; el valor instantáneo de tales magnitudes es el que correspondería a la proyección de estos vectores en el eje Y. Para que la representación sea correcta es necesario dibujar estos vectores con una longitud que sea proporcional a los valores de la tensión e intensidad.

Potencia en una resistencia

Dado que tanto la tensión como la corriente son variables en todo momento, para determinar la potencia con la que trabaja una resistencia pura vamos a averiguar cuál es la potencia en cualquier instante del tiempo:

Potencia instantánea: $P = u \cdot i$.

En la Figura 12.13 se ha obtenido la curva de potencia instantánea multiplicando cada uno de los valores de la tensión instantánea por los de la intensidad.

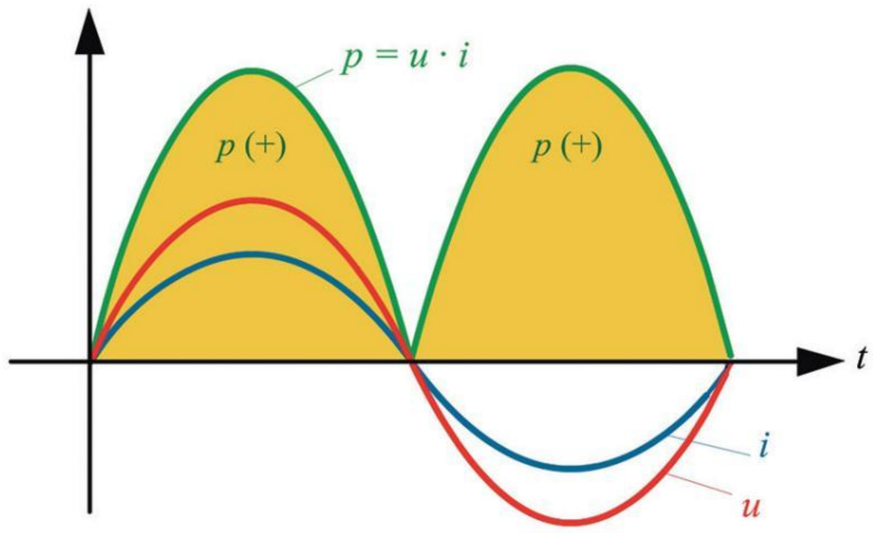


Figura 12.13. Potencia instantánea de un circuito con resistencia pura.

En el gráfico de la Figura 12.13 se puede observar cómo la potencia en una resistencia siempre es positiva, lo que nos indica que el receptor absorbe en todo momento energía del generador. De tal forma que se puede afirmar que la potencia que se desarrolla en C.A. es igual que la que se desarrolla en C.C. Hecho que, además, se puede comprobar experimentalmente. Si conectamos un vatímetro para medir la potencia a la que trabaja una resistencia óhmica pura, podremos verificar que la lectura del vatímetro es la misma para C.C. que para C.A., siempre y cuando utilicemos los mismos valores de tensión e intensidad en C.C. que los eficaces de C.A.

A esta potencia, que es consumida por la resistencia, la llamaremos **potencia activa (*P*)** y se podría calcular obteniendo la potencia media de la potencia instantánea, o mucho más fácil:

$$P = U \cdot I \qquad P = R \cdot I^2$$

P = Potencia en vatios.

Actividad resuelta 12.9

Determina la corriente y la potencia activa que aparecerán en una resistencia pura de 50 ohmios si la sometemos a una tensión alterna senoidal de 230 V. Dibuja el diagrama vectorial.

Solución:

Mientras no nos indiquen ninguna otra referencia, la tensión a la que se refiere el enunciado de este problema es el valor eficaz. De esta forma, el valor eficaz de la intensidad de la corriente es:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{230}{50} = 4{,}6 \text{ A}$$

© Ediciones Paraninfo

La potencia activa la podemos calcular así:

$$P = R \cdot I^2 = 50 \cdot 4{,}6^2 = 1.058 \text{ W}$$

El diagrama vectorial lo dibujamos a una determinada proporción de los valores I = 4,6 A y U = 230 V, tal como se muestra en la Figura 12.14.

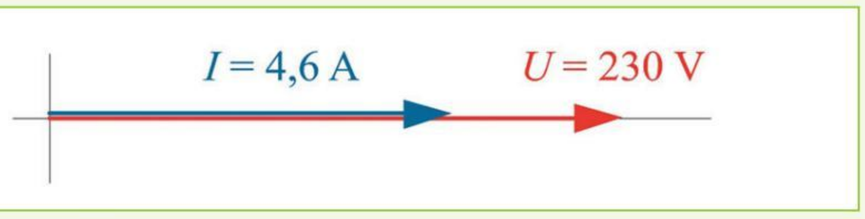


Figura 12.14. Diagrama vectorial.

12.4.2. Circuito con bobina

Las bobinas están presentes en todos aquellos receptores en los que sea necesaria la producción de un campo magnético. Nos referimos a los electroimanes, contactores, motores, reactancias de arranque de lámparas de descarga (fluorescentes, vapor de mercurio, vapor de sodio, etc.), transformadores, etcétera.

Para el estudio del comportamiento de la bobina vamos a partir del hecho de que la resistencia eléctrica es cero. Hecho que, como se podrá entender, es en la mayoría de las aplicaciones falso, ya que los conductores con los que se construyen habitualmente las bobinas son de cobre, por lo que siempre tienen una determinada resistencia.

En corriente continua: si conectamos una bobina a una tensión continua, en ella aparece una corriente eléctrica que queda únicamente limitada por la resistencia que posean los conductores con los que haya sido fabricada. Según la ley de Ohm: $I = U/R$. Dado que esta resistencia suele ser pequeña, si aplicamos una tensión elevada a la bobina, aparece una fuerte corriente por esta y se desarrolla una fuerte potencia que puede llegar a destruirla por el fuerte calor generado.

En corriente alterna: si conectamos la misma bobina a una tensión alterna, se puede comprobar experimentalmente que ahora la corriente que fluye por la bobina es más bien moderada. Si conectamos un vatímetro podríamos comprobar que el consumo de potencia es prácticamente nulo, a pesar de la existencia de una cierta corriente. De aquí se puede sacar la conclusión de que la bobina desarrolla una cierta oposición a la corriente eléctrica de carácter diferente a la resistencia óhmica.

Todos estos fenómenos se deben al efecto de autoinducción de la bobina:

Cuando la bobina es recorrida por una corriente alterna, aparece una corriente variable, y por tanto un campo magnético también variable (Figura 12.15). Dado que las líneas de fuerza del flujo magnético, que ella misma genera, cortan a sus propios conductores, surge una f. e. m. de autoinducción que, según la ley de Lenz, se va a oponer a la causa que la produjo. Es decir, se opone en todo momento a los cambios de corriente.

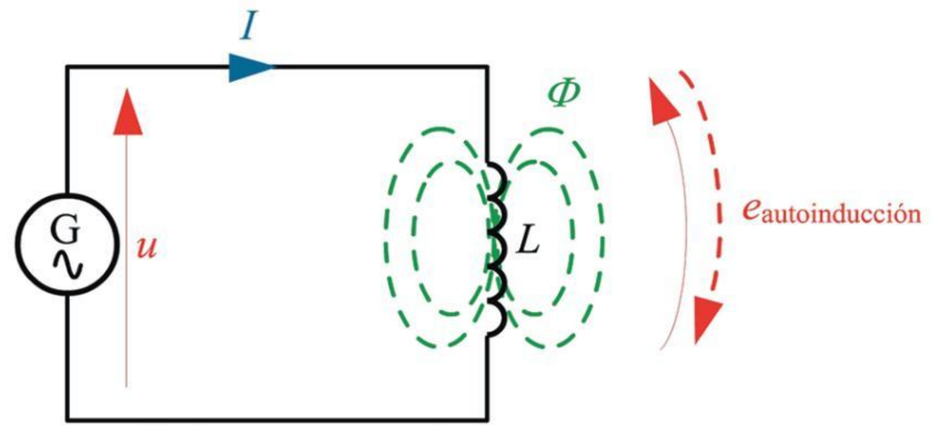


Figura 12.15. La f. e. m. de autoinducción de la bobina se opone a la corriente.

Cuando la corriente, siguiendo las variaciones de la función senoidal, tiende a crecer, el campo magnético también lo hace. Aparece entonces una f. e. m. que se opone a que la corriente se establezca, lo que provoca un efecto de retraso en la corriente eléctrica respecto de la tensión (al conectar una bobina a una tensión alterna, la tensión aparece inmediatamente, mientras que la corriente tarda cierto tiempo en establecerse). En estas condiciones la bobina se está cargando de energía en forma de campo magnético creciente.

Cuando la corriente se ha establecido con su valor máximo por la bobina, la f. e. m. de autoinducción se hace cero. Pero cuando la corriente empieza a disminuir, también lo hace el campo, y entonces se genera una f. e. m. de autoinducción de tal sentido que se opone a que la corriente desaparezca. Ahora la bobina descarga hacia el generador la energía que había acumulado en forma de campo magnético decreciente.

Realmente, una bobina pura (sin resistencia óhmica) devuelve toda la energía que ha utilizado para crear el campo magnético y, en consecuencia, la potencia media o activa que consume es cero (Figura 12.16).

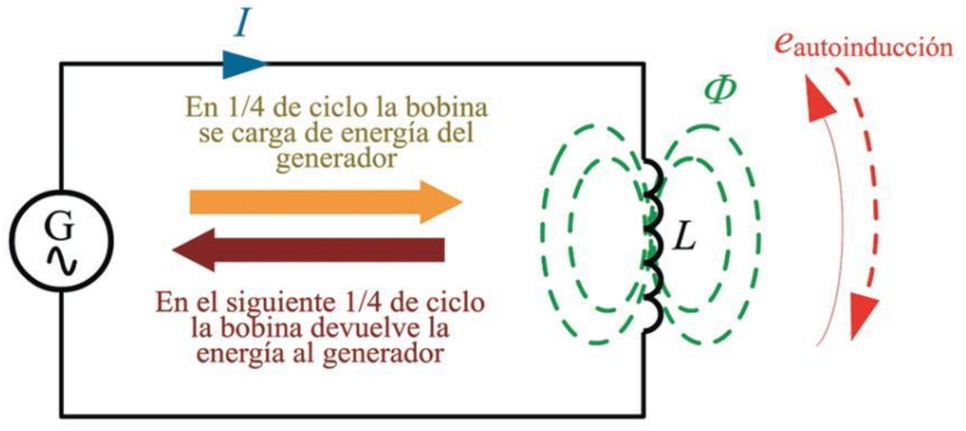


Figura 12.16. Carga y descarga de energía en una bobina.

En la Figura 12.17 se ha representado la corriente eléctrica con un retraso de 90º respecto de la tensión. Observa cómo, efectivamente, cuando la intensidad quiere crecer la tensión es máxima, y en este momento es cuando se carga la bobina.

© Ediciones Paraninfo

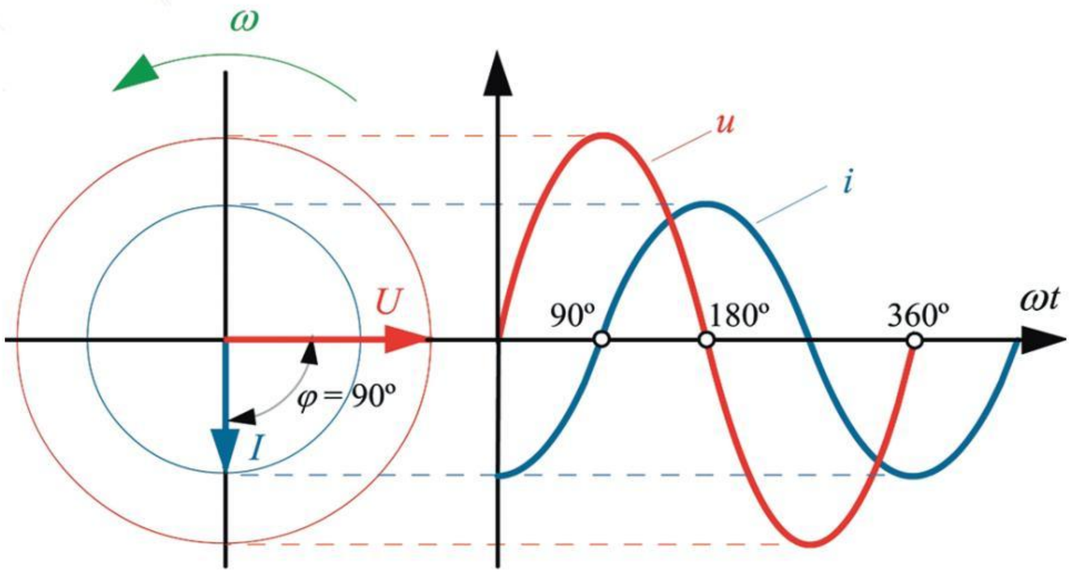


Figura 12.17. Diagrama vectorial de *U* e *I* en una bobina pura.

En este caso se dice que la intensidad está desfasada en retraso respecto a la tensión en un cuarto de ciclo, es decir, un ángulo φ de 90º.

Una bobina pura retrasa un ángulo de 90º a la corriente respecto de la tensión.

Reactancia inductiva de una bobina

Como la oposición que presenta la bobina a la corriente alterna tiene que ver con los fenómenos de autoinducción, esta será mayor cuanto mayor sea el coeficiente de autoinducción L y más rápidas sean las variaciones de la corriente alterna, es decir, la frecuencia f. Si llamamos reactancia inductiva X_L a la oposición que presenta la bobina a la corriente, tendremos que:

$X_L = \omega L$, o lo que es lo mismo:

$$X_L = 2\pi f L$$

X_L = Reactancia inductiva en ohmios.
F = Frecuencia en hercios.
L = Coeficiente de autoinducción en henrios.

Para calcular el valor eficaz de la corriente en una bobina aplicaremos la siguiente expresión, que es muy similar a la ley de Ohm:

$$I = \frac{U}{X_L}$$

Potencia en una bobina

Tal como indicábamos al principio de esta unidad, si se mide la potencia de una bobina pura al aplicarle una C.A., se puede comprobar que el vatímetro indica una potencia igual a cero.

Al contrario que ocurre en una resistencia, en una bobina pura no se produce ningún consumo de energía calorífica. La corriente que recorre la bobina sirve únicamente para generar el campo magnético.

En realidad lo que ocurre es que, al intentar crecer la corriente por la bobina, también lo hace el campo magnético, por lo que se produce un consumo de energía eléctrica. En este caso la energía fluye del generador de C.A. hacia la bobina y es cuando decimos que esta se está cargando de energía electromagnética. Una vez alcanzada la corriente máxima y el flujo máximo, estos tienden a disminuir siguiendo la trayectoria senoidal, y se desarrolla una f. e. m. de autoinducción de tal sentido que genera una energía eléctrica que, ahora, fluye desde la bobina hacia el generador. En este caso, la bobina devuelve la energía al generador. De esta manera tenemos que la bobina no consume realmente la energía; simplemente la toma prestada durante un cuarto de ciclo para generar su campo electromagnético, para devolverla en el siguiente cuarto de ciclo.

Estas afirmaciones se pueden comprobar al obtener la potencia instantánea en una bobina ($p = u \cdot i$), tal como se muestra en la Figura 12.18, donde se observa que la potencia media es cero (potencia activa igual a cero). En el semiciclo positivo el generador cede energía a la bobina y en el negativo, la bobina devuelve esta energía al generador.

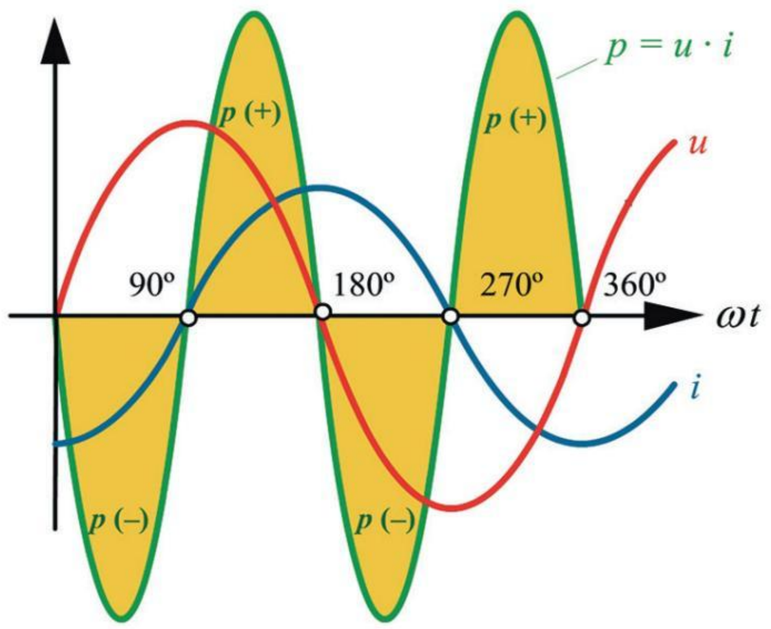


Figura 12.18. Potencia instantánea de un circuito con bobina pura.

Dado que el vatímetro mide el valor medio de la potencia y esta es positiva durante un cuarto de ciclo y negativa en el siguiente, este no indica ninguna potencia cuando está conectado a una bobina pura.

Aunque la bobina no consuma energía real para su funcionamiento, sus constantes cargas y descargas hacen que circule una determinada corriente por los conductores y, por tanto, también aparece una potencia que fluctúa por estos, que llamaremos **potencia reactiva** (Q_L).

En una bobina:

$$Q_L = X_L I^2 \text{ (VAR) (voltiamperios reactivos)}$$

© Ediciones Paraninfo

Actividad resuelta 12.10

Se conecta una bobina con un coeficiente de autoinducción de 0,2 henrios a una red de C.A. de 50 Hz, tal como se muestra en la Figura 12.19. Si el voltímetro indica una tensión de 125 V, averigua las lecturas del amperímetro y el vatímetro, así como la potencia reactiva de la bobina. Dibuja el diagrama vectorial.

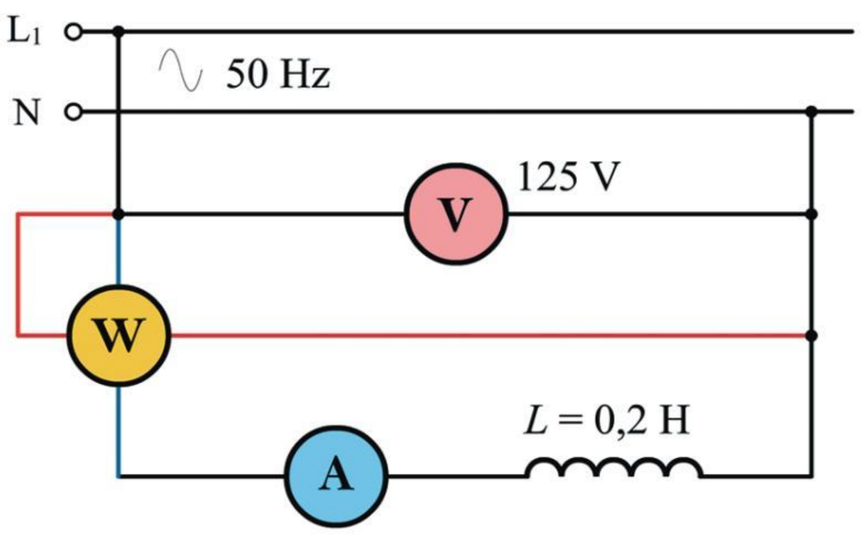


Figura 12.19.

Solución:

Primero determinamos la reactancia inductiva:

$$X_L = 2\pi fL = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0{,}2 = 62{,}8\ \Omega$$

La intensidad de la corriente eléctrica quedará limitada por el valor de esta reactancia.

$$I = \frac{U}{X_L} = \frac{125}{62{,}8} = 2\ \text{A}$$

La lectura del amperímetro es de 2 A, que se corresponde con el valor eficaz de la corriente.

Con estos valores ya podemos dibujar el diagrama vectorial (Figura 12.20). Para ello tendremos en cuenta que la bobina produce un retraso de 90° a la corriente respecto de la tensión.



Figura 12.20. Diagrama vectorial

La potencia reactiva la calculamos con la expresión:

$$Q_L = X_L I^2 = 62{,}8 \cdot 2^2 = 251\ \text{VAR}$$

Como se trata de una bobina pura, el vatímetro indica cero vatios.

12.4.3. Circuito con condensador

Los condensadores no son receptores que se utilicen tan habitualmente en C.A. como las resistencias y las bobinas. Sin embargo son muy útiles, por ejemplo, para contrarrestar los fenómenos negativos que producen las potencias reactivas de las bobinas.

En corriente continua: cuando aplicamos C.C. a un condensador, este se carga de energía eléctrica y hace fluir corriente eléctrica por el circuito solo durante dicha carga. De esta forma, se puede decir que un condensador no permite el paso de la corriente continua.

En corriente alterna: si conectamos un condensador a una tensión alterna (Figura 12.21), se puede comprobar experimentalmente que ahora sí fluye corriente de una forma constante. Si conectásemos un vatímetro, al igual que ocurre con el circuito con bobina, podríamos comprobar cómo el consumo de potencia es nulo, a pesar de la existencia de una cierta corriente. De aquí se puede sacar la conclusión de que el condensador, lo mismo que la bobina, no consume potencia.

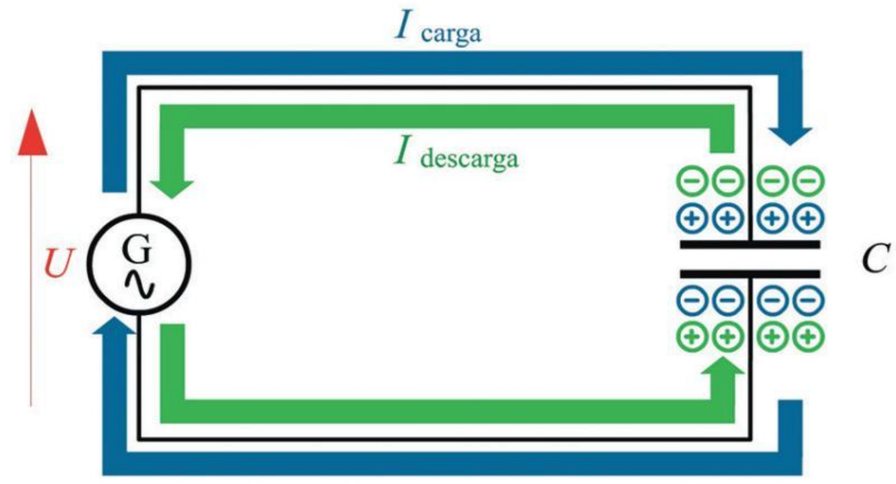


Figura 12.21. El condensador se carga y descarga al aplicarle C.A.

Estudiemos con detenimiento los fenómenos que se dan. Cuando aplicamos la tensión al condensador, como este está totalmente descargado, aparece en él una fuerte corriente de carga. Según se carga el condensador, la tensión que aparece en él va aumentando mientras disminuye la corriente. Cuando se completa la carga la corriente es cero y la tensión alcanza su valor máximo. Se habrá podido observar en esta explicación que en un condensador primero aparece la corriente, siendo la tensión cero (nivel de carga inicial cero), y según se va cargando el condensador la tensión crece y la corriente disminuye. Por esta razón, se puede decir que el condensador adelanta la corriente en el tiempo respecto de la tensión. En el diagrama vectorial este desfase corresponde a un ángulo de 90º en ciclo (Figura 12.22).

Cuando la tensión aplicada al condensador comienza su descenso, este descarga la energía acumulada en el 1/4 de ciclo anterior, y aparece una corriente de descarga por el circuito.

Un condensador puro adelanta un ángulo de 90° a la corriente respecto de la tensión.

© Ediciones Paraninfo

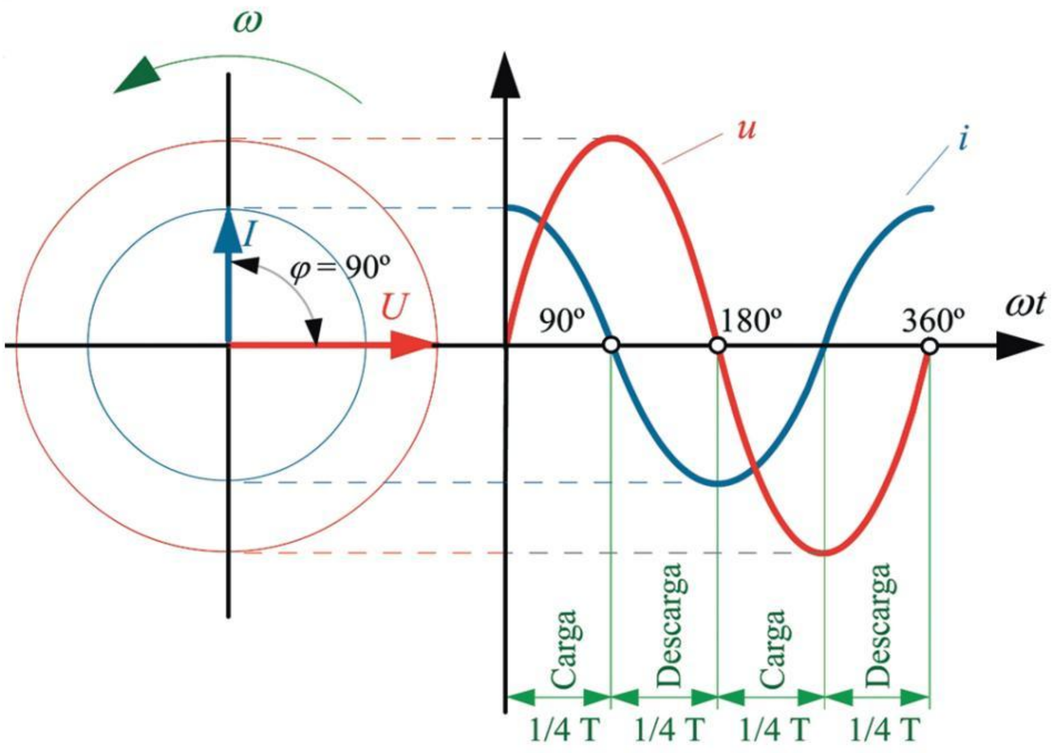


Figura 12.22. Diagrama vectorial de *U* e *I* en un condensador.

Reactancia capacitiva de un condensador

Un condensador, en C.A., hace que fluya constantemente una corriente eléctrica por el circuito debido a las constantes cargas y descargas del mismo. Es importante hacer notar que esta corriente nunca llega a atravesar el dieléctrico del condensador, pero sí fluye por los conductores que lo alimentan.

Como el establecimiento de la corriente eléctrica en un condensador cuando le es aplicada una C.A. tiene que ver con los fenómenos de carga y descarga del mismo, dicha corriente será mayor cuanto mayor sea la capacidad del condensador y más rápidas sean dichas cargas y descargas, es decir, la frecuencia f. Si llamamos reactancia capacitiva X_C a la oposición que presenta el condensador a la corriente, tendremos que:

$$X_C = \frac{1}{\omega C}, \text{ o lo que es lo mismo:}$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C}$$

X_C = Reactancia capacitiva en ohmios.

f = Frecuencia en hercios.

C = Capacidad del condensador en faradios.

$$I = \frac{U}{X_C}$$

Para calcular el valor eficaz de la corriente en un condensador aplicaremos la expresión similar a la ley de Ohm.

Potencia en un condensador

Al igual que ocurre con la bobina, si se mide con un vatímetro la potencia de un condensador al conectarlo a una C.A., se puede comprobar que este indica una potencia igual a cero.

En un condensador tampoco se produce ningún consumo de energía calorífica. Este hecho se debe a que en el primer cuarto de ciclo el condensador se carga de energía eléctrica en forma de carga electrostática, por lo que la energía fluye del generador de C.A. al condensador. En el siguiente cuarto de ciclo el condensador se descarga hacia el generador y devuelve a este la energía acumulada. Al igual que con la bobina, el condensador no consume realmente la energía, sino que simplemente la toma prestada durante un cuarto de ciclo, para devolverla en el siguiente cuarto de ciclo. Por esta razón el vatímetro, que indica el valor medio de la potencia instantánea, señala una potencia igual a cero.

Estas afirmaciones también se pueden comprobar al obtener la potencia instantánea en el condensador ($p = u \cdot i$), tal como se muestra en la Figura 12.23, donde se observa que la potencia media es cero (potencia activa igual a cero). En el semiciclo positivo el generador cede energía al condensador y en el negativo, el condensador devuelve esta energía al generador.

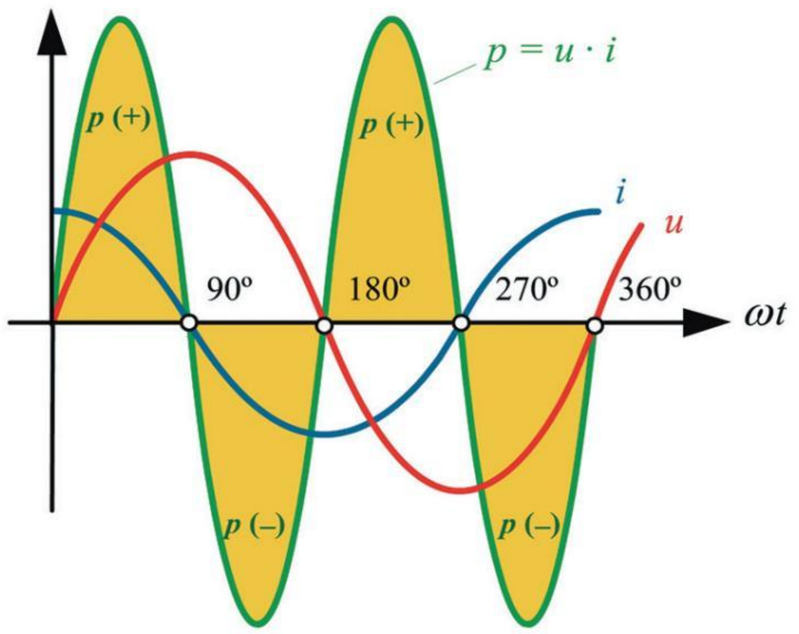


Figura 12.23. Potencia instantánea de un circuito con condensador.

La corriente que fluye hacia el condensador sirve solo para producir las cargas y descargas constantes del mismo. Además, aquí también aparece una potencia reactiva Q_C producida por la energía que se intercambia entre el condensador y el generador.

En un condensador:

$$Q_C = X_C I^2 \text{ (VAR) (voltiamperios reactivos)}$$

Se puede comprobar que cuando la bobina descarga su energía eléctrica acumulada en forma de campo electro-

© Ediciones Paraninfo

magnético, se produce el ciclo de carga del condensador. En conclusión, se puede decir que la potencia reactiva del condensador es negativa respecto a la bobina y que, por tanto, sus efectos se compensan. Este aspecto habrá que tenerlo en cuenta cuando conectemos en un mismo circuito bobinas con condensadores.

Actividad resuelta 12.11

Se conecta un condensador de 75 µF a una red de C.A. de 50 Hz, tal como se muestra en la Figura 12.24. Si el voltímetro indica una tensión de 230 V, averigua las lecturas del amperímetro y el vatímetro, así como la potencia reactiva del condensador. Dibuja el diagrama vectorial.

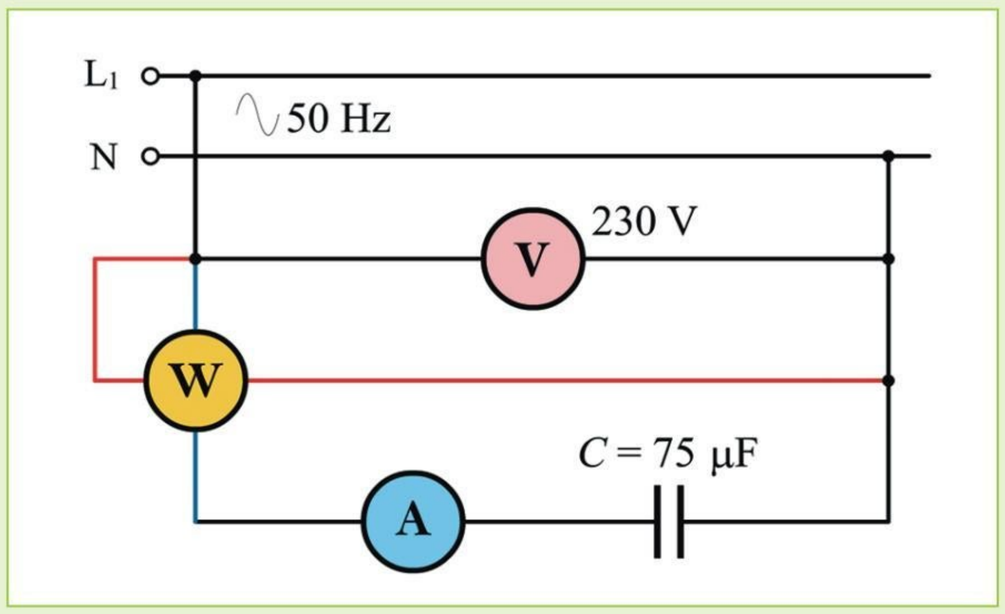


Figura 12.24.

Solución:

Primero determinamos la reactancia capacitiva:

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 75 \cdot 10^{-6}} = \frac{10^6}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 75} =$$

$$= 42{,}44\ \Omega$$

La intensidad de la corriente eléctrica quedará limitada por el valor de esta reactancia.

$$I = \frac{U}{X_C} = \frac{230}{42{,}44} = 5{,}42\ \text{A}.$$

La lectura del amperímetro es de 5,42 A.

Con estos valores dibujamos el diagrama vectorial (Figura 12.25). Para ello tendremos en cuenta que el condensador produce un adelanto de 90° a la corriente respecto de la tensión.

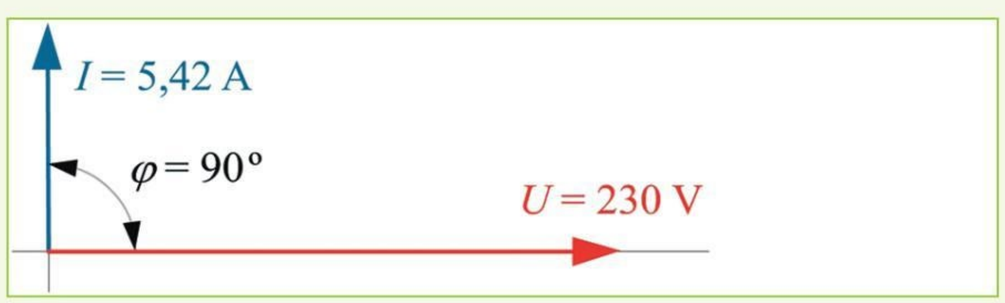


Figura 12.25. Diagrama vectorial.

La potencia reactiva la calculamos con la expresión:

$$Q_C = X_C I^2 = 42{,}44 \cdot 5{,}42^2 = 1.246{,}7\ \text{VAR}$$

Como se trata de un condensador, el vatímetro indica cero vatios.

12.4.4. Resumen de los efectos producidos por los receptores elementales

En la Tabla 12.1 se muestra un resumen de los efectos que producen los receptores elementales en C.A.

Tabla 12.1.

Receptor	Diagrama vectorial	Resistencia reactancia	Desfase entre *U* e *I*	Potencia
R	*I* *U*	*R*	En fase	Activa $P = RI^2$
L	*U*, *I*, $\varphi = 90^o$	$X_L = 2\pi fL$	*I* se retrasa 90° respecto a *U*	Reactiva $Q_L = X_L I^2$
C	*I*, $\varphi = 90^o$, *U*	$X_C = 1/2\pi fC$	*I* se adelanta 90° respecto a *U*	Reactiva $Q_C = X_C I^2$

En relación con la potencia instantánea de una bobina y un condensador, si contrastamos la situación en las que se encuentran las curvas de potencia (Figura 12.26), podemos comprobar que en el momento en que la bobina se está descargando de energía (ciclo de potencia negativo), el condensador se carga de la misma (ciclo de potencia positiva). En conclusión, se puede afirmar que la potencia reactiva del condensador es negativa respecto a la de la bobina y que, por tanto, sus efectos se compensan, tal como estudiaremos más adelante en la compensación de energía reactiva de cargas inductivas como motores y lámparas de descarga.

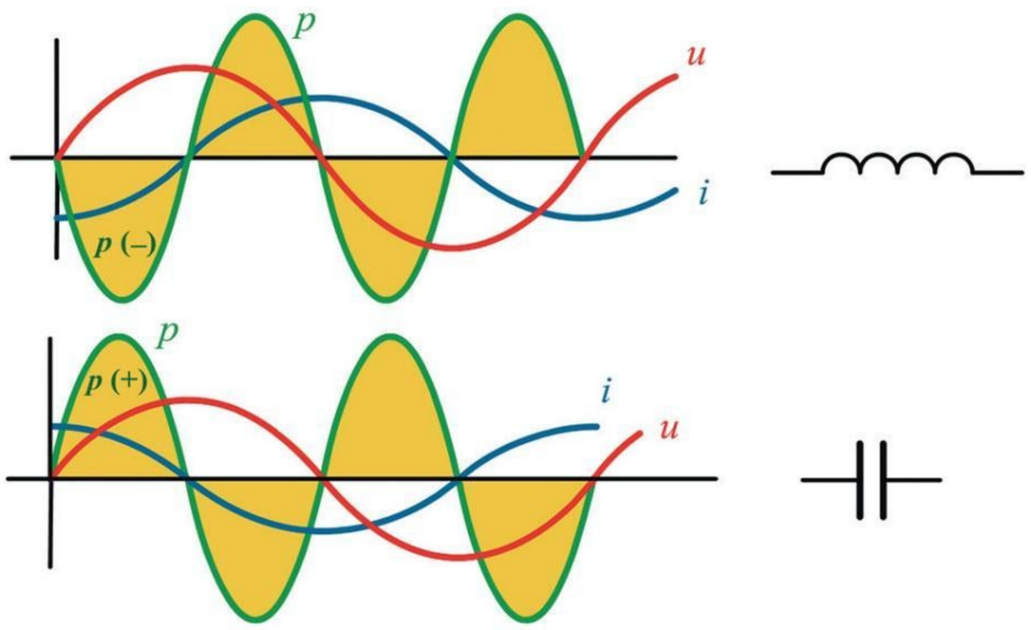


Figura 12.26. Potencia instantánea de una bobina y un condensador.

© Ediciones Paraninfo

Comprobación práctica en el laboratorio

12.1. Medida de una tensión senoidal con el osciloscopio. Consigue un generador de funciones (instrumento muy utilizado en electrónica que sirve para producir tensiones variables a diferentes frecuencias) y, a modo de ejercicio práctico, comprueba con un osciloscopio los valores de las magnitudes asociadas a las tensiones senoidales de diferentes frecuencias (Figura 12.27).

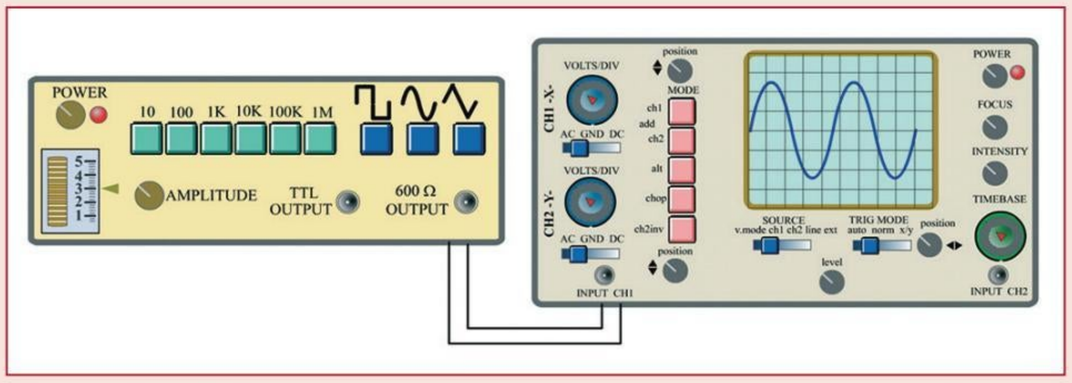


Figura 12.27. Osciloscopio midiendo las magnitudes asociadas a tensiones senoidales proporcionadas por un generador de funciones.

Antes de realizar la medida necesitaremos conocer en qué consiste un osciloscopio.

El osciloscopio es un aparato de medida que va a ser indispensable para el análisis y comprobación de los valores que se dan en una tensión variable. Su aplicación en el campo de la electrónica se hace indispensable. Un osciloscopio lo que hace es mostrar en su pantalla la forma que posee una determinada tensión o corriente eléctrica. Es decir, representa en un eje de coordenadas las variaciones de estas magnitudes en función del tiempo.

Así, por ejemplo, la imagen que aparecería en la pantalla del osciloscopio al aplicarle una tensión alterna senoidal sería la mostrada en la Figura 12.28.

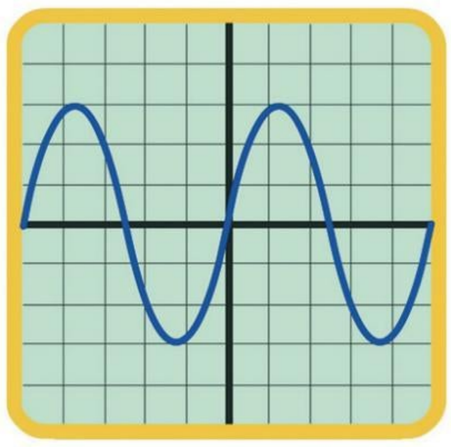


Figura 12.28. Imagen de una tensión senoidal en un osciloscopio.

Así, por ejemplo, en el caso de que la imagen que aparece en la pantalla fuese la de la Figura 12.29, los grados de desviación serían: atenuador vertical, 4 V/div; base de tiempos, 1 ms/div. El valor máximo y eficaz de la tensión, así como el periodo y la frecuencia, lo calcularemos así:

$$U_{máx} = 3 \text{ div} \cdot 4 \text{ V/div} = 12 \text{ V}$$

$$U_{eficaz} = \frac{U_{máx}}{\sqrt{2}} = \ldots = 8{,}5 \text{ V}$$

$$T = 8 \text{ div} \cdot 1 \text{ ms/div} = 0{,}008 \text{ s}$$

$$f = 1/T = \ldots = 125 \text{ Hz}$$

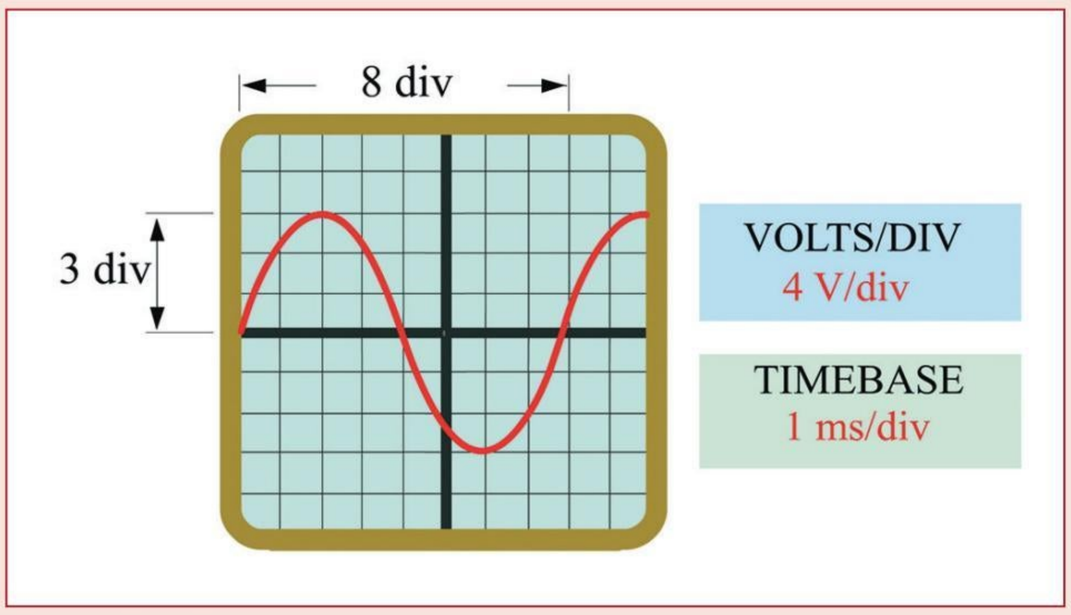


Figura 12.29.

12.2. Visualización del desfase de la tensión y corriente senoidal en bobinas y condensadores. Con este sencillo ejercicio práctico comprobaremos los ángulos de desfase que provocan las bobinas puras y los condensadores.

Consigue una bobina con un coeficiente de autoinducción elevado y de baja resistencia óhmica. Conectaremos el canal A del osciloscopio en derivación con la bobina; de esta forma, conseguimos que aparezca por este canal la tensión senoidal aplicada.

Como el osciloscopio solo mide tensiones, conectamos una resistencia de medida, de bajo valor óhmico, en serie con la bobina, con el fin de medir en ella la caída de tensión ($u = R_{medida}\ I$), que será proporcional a la corriente a medir. Para llevar a cabo esta operación, se conecta el canal B del osciloscopio, por la entrada vertical, en derivación con la resistencia de medida (Figura 12.30).

Nota: Para ampliar conocimientos sobre el manejo del osciloscopio conviene que antes realices un estudio más completo del mismo, como el que se propone en la Unidad 16 de esta obra.

© Ediciones Paraninfo

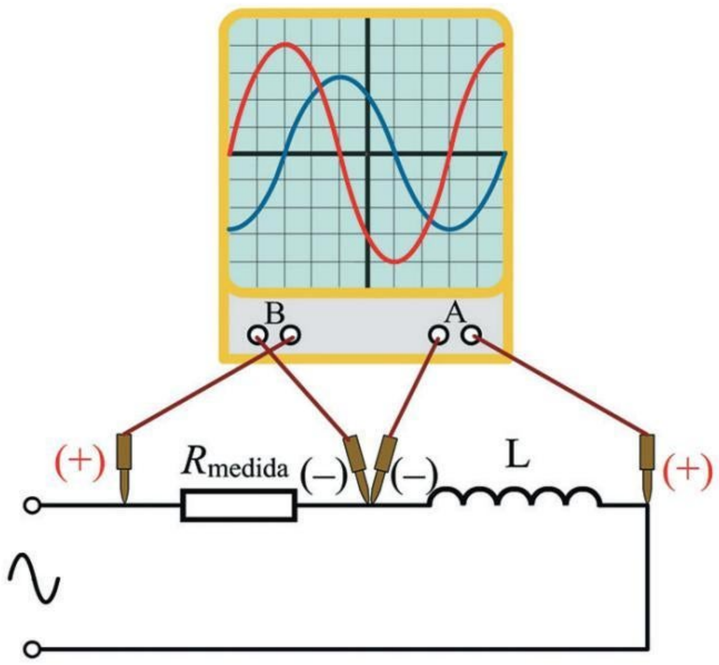


Figura 12.30. Medida de *U* e *I* con un osciloscopio.

Nota: Las puntas de prueba de ambos canales poseen una conexión interior en común en el terminal (–). Para evitar que se cortocircuiten las señales es conveniente conectar al mismo punto del circuito este terminal, tal como se muestra en el esquema de conexiones de la Figura 12.30. El resultado de este condicionante es que la tensión y la corriente quedan en oposición, es decir, desfasadas 180°. Para visualizar correctamente la señal en la pantalla del osciloscopio hay que invertir la señal del canal B mediante el control de inversión de la polaridad.

¿Se consiguen exactamente 90° de desfase entre *U* e *I*?

¿Por qué razón el ángulo de desfase provocado es algo menor de 90°?

Sustituye la bobina por un condensador y, teniendo en cuenta las mismas consideraciones, visualiza en el osciloscopio la tensión y la corriente por el condensador y determina el ángulo de desfase entre *U* e *I*.

Como en otras ocasiones, al finalizar cada una de estas actividades deberás elaborar un informe-memoria sobre la actividad desarrollada, indicando los resultados obtenidos y estructurándolos en los apartados necesarios para una adecuada documentación de las mismas (descripción del proceso seguido, medios utilizados, esquemas y planos utilizados, cálculos, medidas, etc.).

© Ediciones Paraninfo

Actividades de comprobación

12.1. ¿A qué se debe que un alternador produzca una tensión que cambia constantemente de valor y de sentido?

a) Los electrones son empujados a moverse según gira el alternador.

b) A que los conductores en su giro cortan el campo magnético con diferentes ángulos.

12.2. ¿Qué indica un voltímetro de C.C. al ser conectado a una red de C.A.?

a) El valor eficaz.

b) El valor máximo.

c) Cero.

12.3. De todos los valores que compone una C.A. senoidal, ¿cuál es el que se utiliza siempre para cálculos y medidas?

a) El valor eficaz.

b) El valor medio.

c) El valor máximo.

12.4. ¿Por qué es interesante conocer el valor máximo de la tensión en un sistema de C.A.?

a) Es el que se utiliza comúnmente para realizar cálculos y medidas.

b) Es el que hay que tener en cuenta para la elección de los aislantes.

c) De él depende el valor de la frecuencia.

12.5. De los componentes que a continuación se exponen, ¿cuál de ellos produce un adelanto de 90° a la corriente respecto de la tensión?

a) Una bobina.

b) Un condensador.

c) Una resistencia.

12.6. Las bobinas y condensadores no consumen realmente energía eléctrica. ¿Cómo se denomina a la potencia eléctrica que intercambian con el generador?

a) Potencia activa.

b) Potencia aparente.

c) Potencia reactiva.

12.7. Cuando se conecta una resistencia a una red de C.A. se produce un desfase entre la tensión y la corriente de:

a) 0°.

b) 90°.

c) 45°.

12.8. Con un voltímetro de C.A. se mide una tensión de 100 V. ¿Cuál es el valor máximo de la tensión?

12.9. Averigua la frecuencia de una C.A. si su periodo es de 5 ms.

12.10. Determina la tensión máxima que deberá soportar un aislador de una línea de transporte de energía eléctrica si la tensión eficaz entre fases es de 220.000 V.

12.11. Al medir con un osciloscopio una tensión alterna, obtenemos la señal que se indica en la Figura 12.31. Estando el atenuador vertical en 10 V/div y la base de tiempos en 5 ms/div, determina el valor máximo, el valor eficaz, el periodo, la frecuencia y el valor instantáneo a los 5 ms.

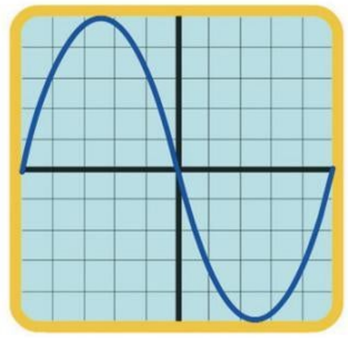


Figura 12.31.

12.12. Una espira gira a 1.500 revoluciones/minuto en el seno del campo magnético formado por un par de polos. ¿Cuál será la velocidad angular, la frecuencia y el periodo de la tensión alterna inducida en dicha espira?

12.13. Al conectar un osciloscopio a una fuente de tensión senoidal aparece en su pantalla la imagen de la Figura 12.32. Averigua la lectura de los siguientes aparatos de medida conectados a la misma fuente:

a) Un voltímetro de C.A.

b) Un voltímetro de C.C.

c) Un frecuencímetro.

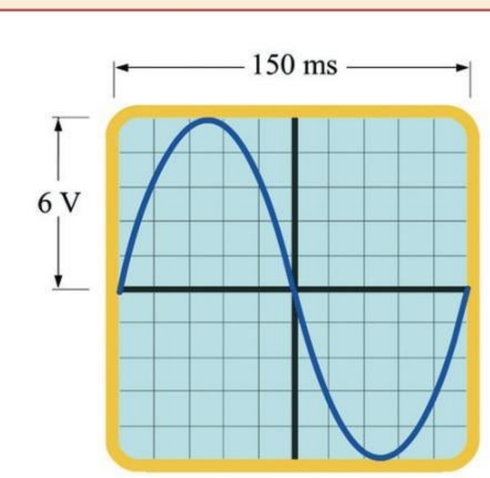


Figura 12.32.

© Ediciones Paraninfo

12.14. El valor máximo de una tensión senoidal es de 311 V, para una frecuencia de 50 Hz. Halla los valores instantáneos de la tensión para los tiempos 1 ms, 3 ms, 5 ms, 6 ms, 10 ms, 11 ms, 13 ms, 20 ms y sitúa dichos valores en un gráfico de la onda senoidal.

12.15. Si una tensión senoidal posee un valor de 90 V a los 30° del ciclo, halla el valor eficaz de dicha tensión.

12.16. Se conecta un condensador de 200 μF a un alternador de 100 Hz y 50 V. Determina la intensidad de la corriente y la potencia reactiva.

12.17. Las características eléctricas de una plancha eléctrica son: $R = 50\ \Omega$, $U = 230$ V, $f = 50$ Hz. Calcula la intensidad, la potencia y la energía consumida por ella en 8 horas.

12.18. Una bobina pura posee un coeficiente de autoinducción de 0,4 H. Se la conecta a una red de C.A. de 400 V y 60 Hz. Calcula la reactancia inductiva, la intensidad, la potencia reactiva y la energía consumida en 8 horas.

Actividades de ampliación

12.1. Eficiencia energética. Busca en internet información sobre la eficiencia energética y explica el significado de la etiqueta energética que aparece en los electrodomésticos, así como el de la certificación de eficiencia energética de los edificios.

Para que te sirva de ayuda, seguidamente se dan unas ideas sobre este tema:

La eficiencia energética es la mejora del aprovechamiento de la energía manteniendo el mismo nivel de servicios energéticos, sin disminuir nuestro confort y calidad de vida, protegiendo el medioambiente, asegurando el abastecimiento y fomentando un comportamiento sostenible en su uso. La eficiencia energética no está orientada a privarnos del recurso, sino a hacer un uso eficiente de este sin desperdiciarlo.

Etiqueta de eficiencia energética en electrodomésticos

En los países de la Unión Europea los fabricantes de electrodomésticos (lavadoras, secadoras, frigoríficos, congeladores, lavavajillas, calentadores de agua, hornos y aire acondicionado) están obligados a etiquetar sus productos con la llamada **etiqueta energética,** con el fin de contribuir al ahorro de energía (Figura 12.33).



Figura 12.33. Etiqueta energética.

La etiqueta energética es una herramienta informativa que indica la eficiencia y los valores de consumo (agua y energía) de un electrodoméstico en relación con otro de semejantes características. Así, por ejemplo, no es comparable el consumo eléctrico de una lavadora de clase B con el de un frigorífico de la misma clase, pero sí con el de otra lavadora de clase D.

La etiqueta contiene siete niveles de eficiencia, desde la clase A (los más eficientes) a la clase G (los menos eficientes). Estas nuevas etiquetas se aplican desde marzo de 2021. La clase A de mayor eficiencia queda de momento reservada para la clasificación de electrodomésticos, que en un futuro y gracias a la innovación tecnológica, superen las cuotas actuales de eficiencia.

En la Figura 12.34 se muestra, como ejemplo, el aspecto de una etiqueta energética para una lavadora y su significado.

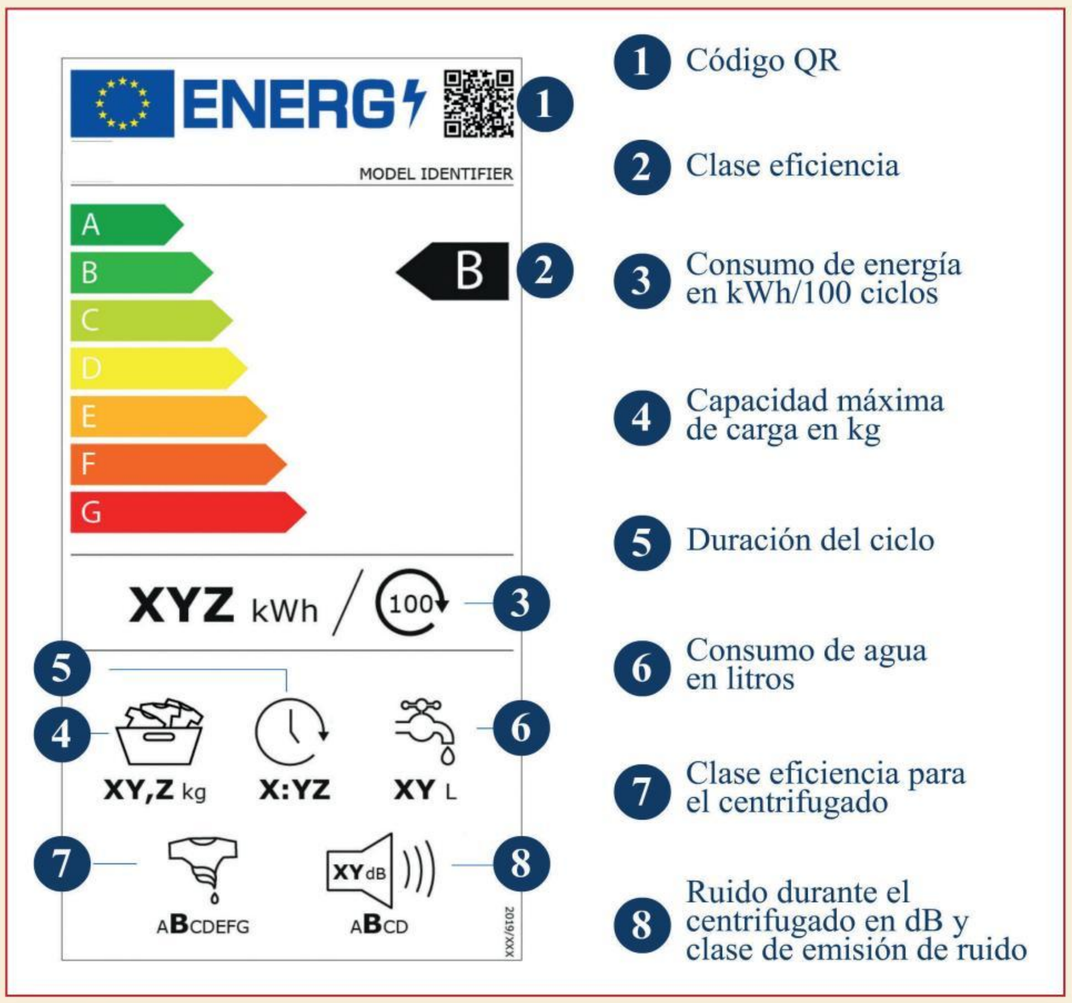


Figura 12.34. Interpretación de la etiqueta energética de una lavadora.

© Ediciones Paraninfo

Etiqueta de eficiencia energética en edificios

Según establece el Real Decreto 47/2007 en transposición de la directiva 2002/91/CE de Eficiencia Energética de los Edificios, los edificios de nueva construcción deben disponer también de la Certificación de Eficiencia Energética. Este certificado es muy parecido al utilizado para los electrodomésticos y describe las características energéticas del edificio, asignando a cada edificio una Clase Energética de eficiencia, que variará desde la clase A, para los energéticamente más eficientes, a la clase G, para los menos eficientes.

En la Figura 12.35 se muestra el aspecto de la Certificación de Eficiencia Energética de un edificio.

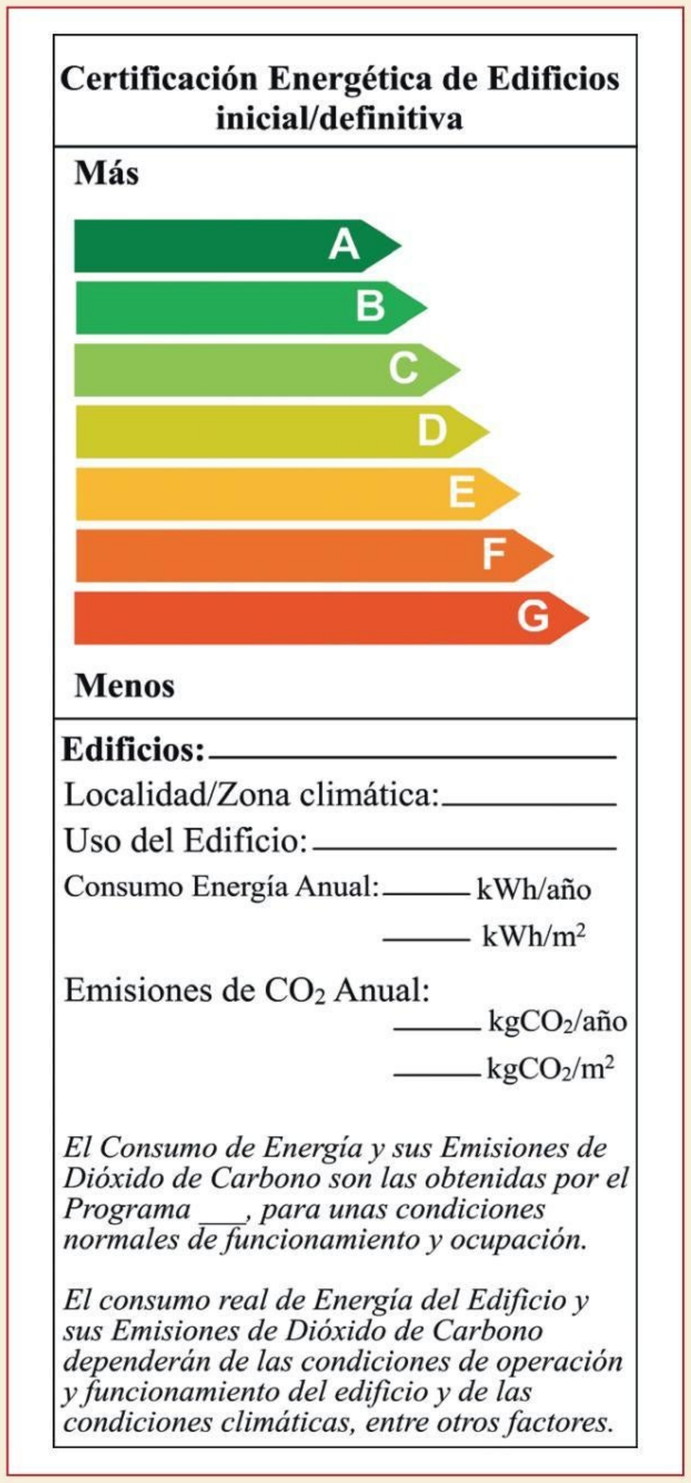
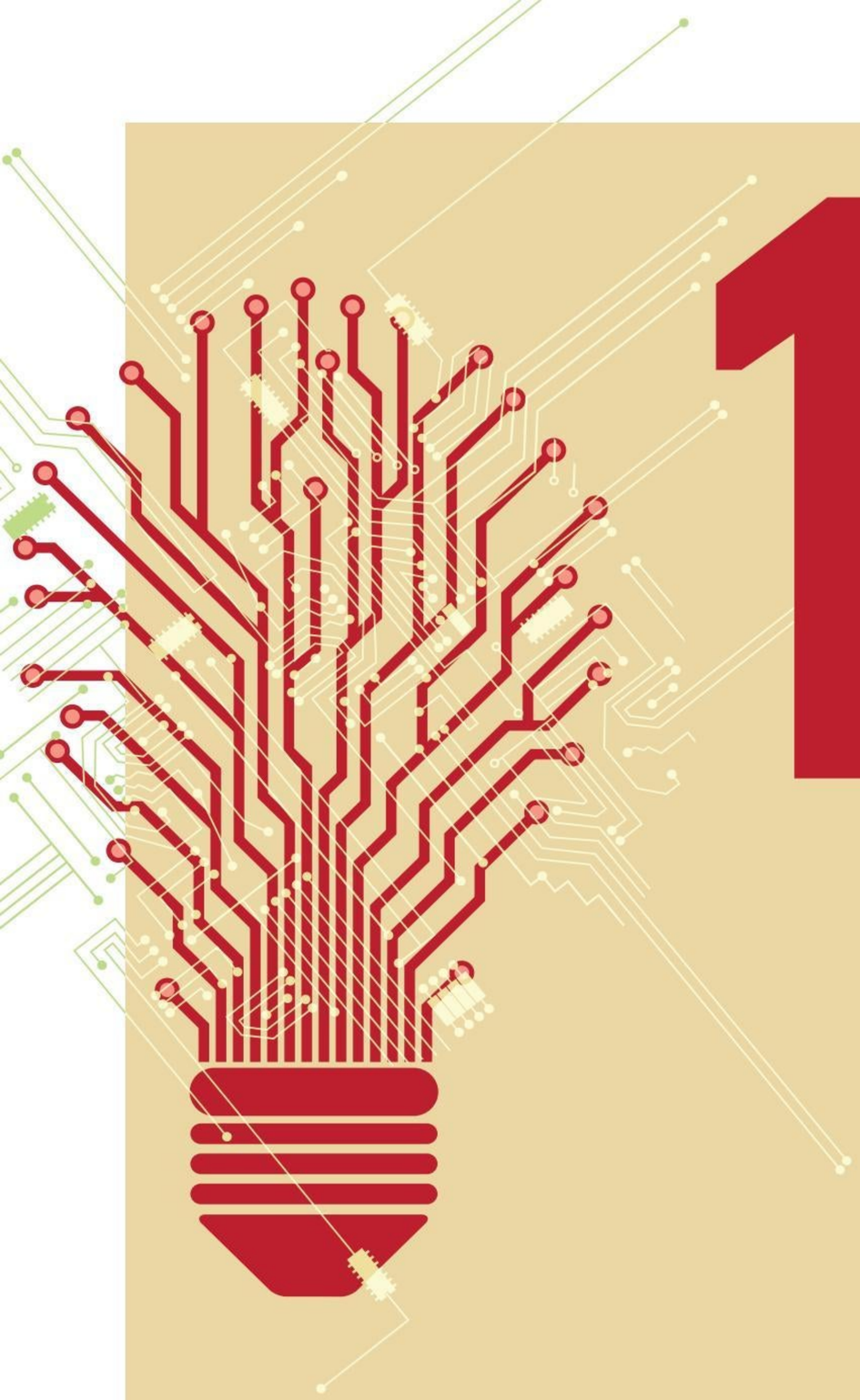


Figura 12.35. Certificación de Eficiencia Energética de un edificio.

© Ediciones Paraninfo

13 Circuitos serie R-L-C en C.A.



Contenidos

- **13.1.** Acoplamiento en serie de bobinas y resistencias
- **13.2.** Acoplamiento en serie de resistencias y condensadores
- **13.3.** Circuito serie R-L-C
- **13.4.** Importancia práctica del factor de potencia (cos φ)
- **13.5.** Caída de tensión en las líneas eléctricas monofásicas de C.A.

Al igual que en C.C. conectábamos en serie resistencias, en C.A. es fácil encontrar circuitos que consistan en bobinas, resistencias y condensadores conectados en serie. Para la resolución de estos circuitos siempre habrá que tener en cuenta los desfases que producen las bobinas y los condensadores.

Objetivos

- Resolver circuitos serie de circuitos de C.A.
- Distinguir y calcular los tres tipos de potencia de un circuito de C.A., así como encontrar y seleccionar adecuadamente los sistemas para la corrección del factor de potencia.
- Calcular la sección de los conductores en líneas monofásicas de C.A. teniendo en cuenta su caída de tensión.

13.1. Acoplamiento en serie de bobinas y resistencias

En la práctica es difícil encontrar circuitos que sean exclusivamente inductivos, ya que para la fabricación de las bobinas se utilizan hilos metálicos conductores (normalmente de cobre) con una cierta resistencia. Este tipo de circuitos es muy común, como es el caso de los motores, circuitos de arranque en las lámparas fluorescentes, contactores, electroimanes, etcétera.

En la Figura 13.1 se ha representado el circuito equivalente de una bobina real, que en este caso está formado por una resistencia de valor óhmico $\boldsymbol{R}$ conectada en serie con una bobina pura de reactancia $\boldsymbol{X_L}$.

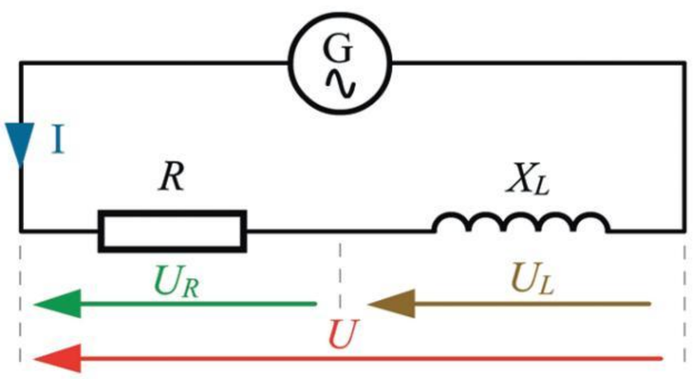


Figura 13.1. Circuito serie R-L.

Si a este circuito le conectamos una serie de aparatos de medida, tal como se muestra en la Figura 13.2 y aplicamos una tensión alterna al conjunto, se obtienen las siguientes conclusiones:

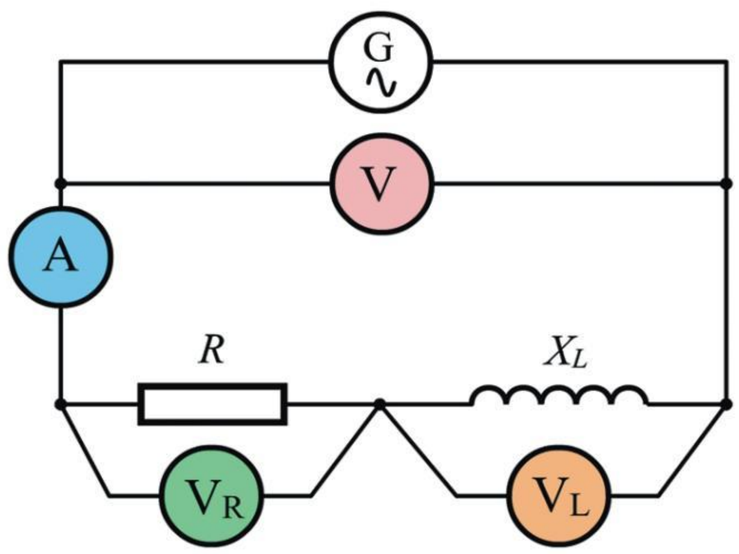


Figura 13.2. Circuito de medida.

Dado que se trata de un circuito serie, aparece una única corriente $\boldsymbol{I}$ por el circuito que queda reflejada en el amperímetro A. El valor de esta corriente depende de la combinación de los valores de $\boldsymbol{R}$ y $\boldsymbol{X_L}$, de tal forma que, cuanto mayores sean estos, menor es la corriente.

La combinación de los efectos limitadores de la corriente producidos por la resistencia y la bobina recibe el nombre de impedancia y se representa por la letra *Z*.

Para determinar el valor de la corriente en el circuito ahora aplicamos la ley de Ohm de esta manera:

$$I = \frac{U}{Z}$$

Los voltímetros V_R y V_L nos indican respectivamente las tensiones que aparecen en la resistencia y la bobina. Se puede comprobar experimentalmente que en ambos casos se cumple la ley de Ohm para corriente alterna, de lo que se deduce que:

$$U_R = RI \qquad U_L = X_L I$$

Dado que se trata de un circuito serie, cabría pensar que la lectura del voltímetro V, que indica la tensión total aplicada, tendría que ser la suma de las lecturas de los voltímetros $V_R + V_L$. Al hacer la experiencia comprobamos que esta relación no se cumple. ¿Cuál es la explicación?

En realidad sí se cumple que la tensión total aplicada al circuito es igual a la suma de las tensiones que aparecen en la resistencia y la bobina, pero de forma vectorial:

$$\vec{U} = \vec{U}_R + \vec{U}_L$$

Hay que pensar que la bobina produce un desfase en las magnitudes eléctricas que hace que estas tensiones no varíen al mismo tiempo, por lo que para sumarlas habrá que conocer su situación en el diagrama vectorial.

Para que el diagrama vectorial sea más fácil de interpretar vamos a tomar como referencia la intensidad, ya que esta es común a los dos receptores. Para ello situamos el vector *I* con un ángulo de cero grados, tal como se muestra en la Figura 13.3.

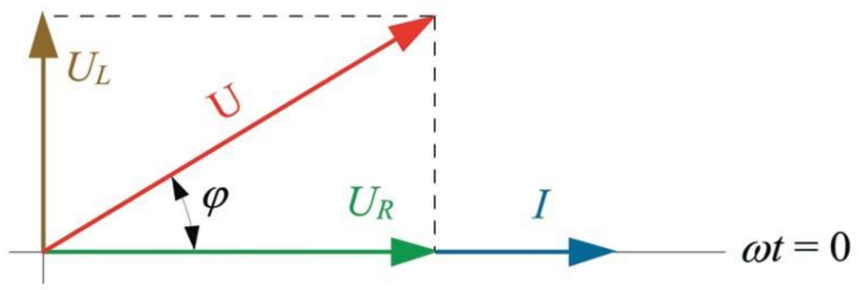


Figura 13.3. Diagrama vectorial de un circuito R-L.

Dado que la resistencia óhmica no provoca ningún tipo de desfase, dibujamos en el diagrama vectorial la caída de tensión U_R en fase con la intensidad de corriente.

Una bobina provoca un retraso de 90º de la corriente respecto de la tensión. Como hemos dibujado a la corriente en el ángulo cero, habrá que situar el vector de la tensión en la bobina U_L adelantado respecto a la misma un ángulo de 90º.

© Ediciones Paraninfo

Una vez situados correctamente en el diagrama los vectores de tensión, la tensión del conjunto U la obtenemos haciendo la suma vectorial de U_R y U_L. Si se observa el resultado obtenido podemos comprobar que la tensión U queda adelantada un ángulo φ respecto de la corriente.

Dicho de otra manera: en un circuito R-L la corriente queda retrasada un ángulo φ respecto de la tensión, que ya no es 90º como en el caso de la bobina pura. El valor de este ángulo dependerá de los valores de la resistencia respecto de la bobina. Así, por ejemplo, si en un circuito es mucho mayor la resistencia que la reactancia de la bobina, este ángulo será pequeño. Al contrario, si predomina la reactancia inductiva sobre la resistencia, el ángulo alcanzará valores próximos a los 90º.

13.1.1. Triángulo de tensiones

Observando el diagrama vectorial de la Figura 13.3 detectamos que los vectores de las tensiones forman un triángulo rectángulo, donde U es la hipotenusa y U_R y U_L los catetos, tal como se muestra en la Figura 13.4. Si aplicamos el teorema de Pitágoras a este triángulo podemos obtener la siguiente relación:

$$U = \sqrt{U_R^2 + U_L^2}$$

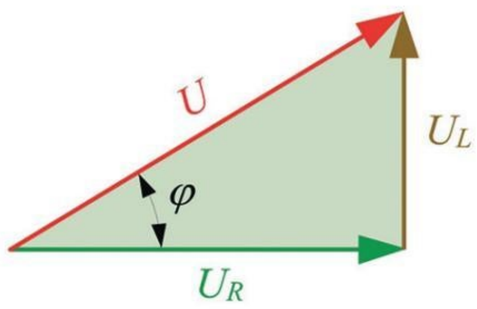


Figura 13.4. Triángulo de tensiones.

13.1.2. Triángulo de impedancias

Vamos a expresar en el triángulo de tensiones las relaciones de la ley de Ohm, tal como se muestra en la Figura 13.5(a). Si ahora dividimos cada uno de los lados de este triángulo entre la intensidad I, común a todos ellos, obtendremos el triángulo de impedancias que se muestra en la Figura 13.5(b).

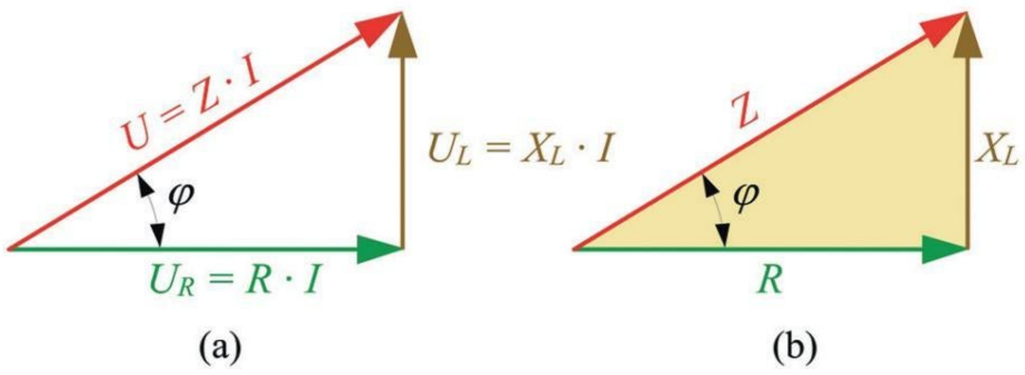


Figura 13.5. (a) Triángulo de tensiones. (b) Triángulo de impedancias.

Con el triángulo de impedancias podemos obtener el valor de la impedancia Z:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$$

Para determinar el ángulo φ de desfase entre U e I se puede utilizar la relación trigonométrica de la tangente:

$$\text{tg } \varphi = \frac{X_L}{R}$$

Una vez obtenida la tangente, mediante unas tablas trigonométricas o una calculadora científica, se determina el ángulo que le corresponde.

Actividad resuelta 13.1

El circuito equivalente de la bobina de un contactor es el que se representa en la Figura 13.6. El circuito consta de una resistencia de 20 Ω y de una bobina pura con un coeficiente de autoinducción de 50 milihenrios. Se trata de averiguar los valores de Z, I, φ, U_R y U_L si aplicamos una tensión senoidal de 125 V y 50 Hz. Dibuja el diagrama vectorial de U e I.

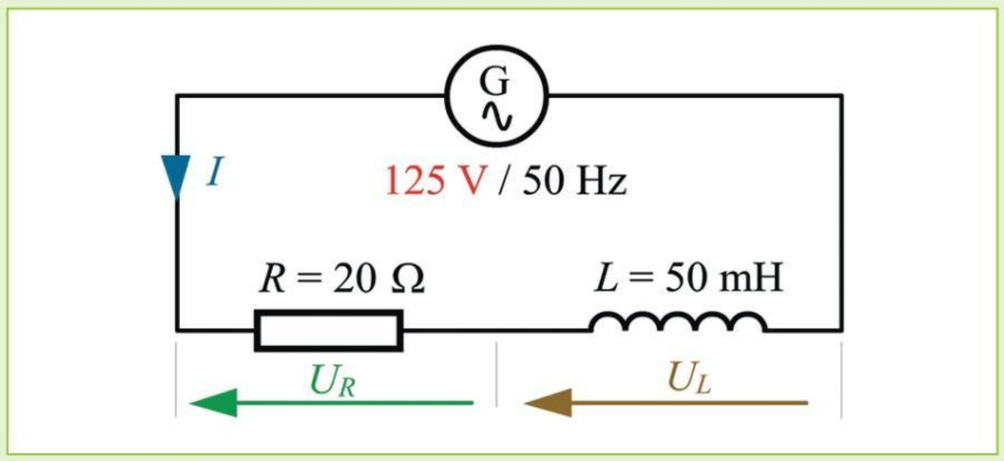


Figura 13.6.

Solución:

$$X_L = 2\pi fL = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0{,}05 = 15{,}7\ \Omega$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{20^2 + 15{,}7^2} = 25{,}4\ \Omega$$

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{125}{25{,}4} = 4{,}9\ \text{A.}$$

$$U_R = RI = 20 \cdot 4{,}9 = 98\ \text{V}$$

$$U_L = X_L I = 15{,}7 \cdot 4{,}9 = 76{,}9\ \text{V}$$

$$\text{tg } \varphi = \frac{X_L}{R} = \frac{15{,}7}{20} = 0{,}79$$

que le corresponde un ángulo φ de 38°.

El ángulo de desfase es de 38° de retraso de la corriente respecto de la tensión, tal como se ha representado en el diagrama vectorial correspondiente en la Figura 13.7.

© Ediciones Paraninfo

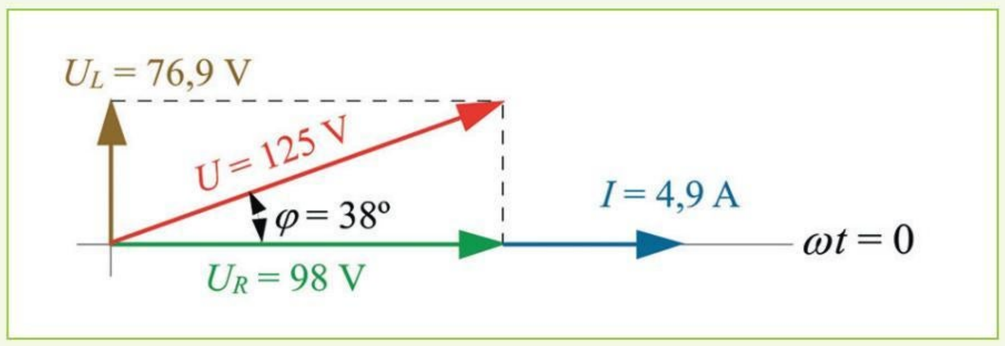


Figura 13.7. Diagrama vectorial.

13.1.3. Potencia en un circuito R-L

En un circuito con resistencia y bobina se puede observar que existe un consumo de energía eléctrica que se transforma en calor a causa de la resistencia *R*. Por otro lado, en la bobina se producen constantes cargas y descargas de energía en forma de campo electromagnético. Esto da lugar a que en el mismo circuito coexistan diferentes tipos de potencias.

Al multiplicar por la intensidad el triángulo de tensiones del diagrama vectorial y el triángulo de impedancias, obtenemos el triángulo de potencias de la Figura 13.8.

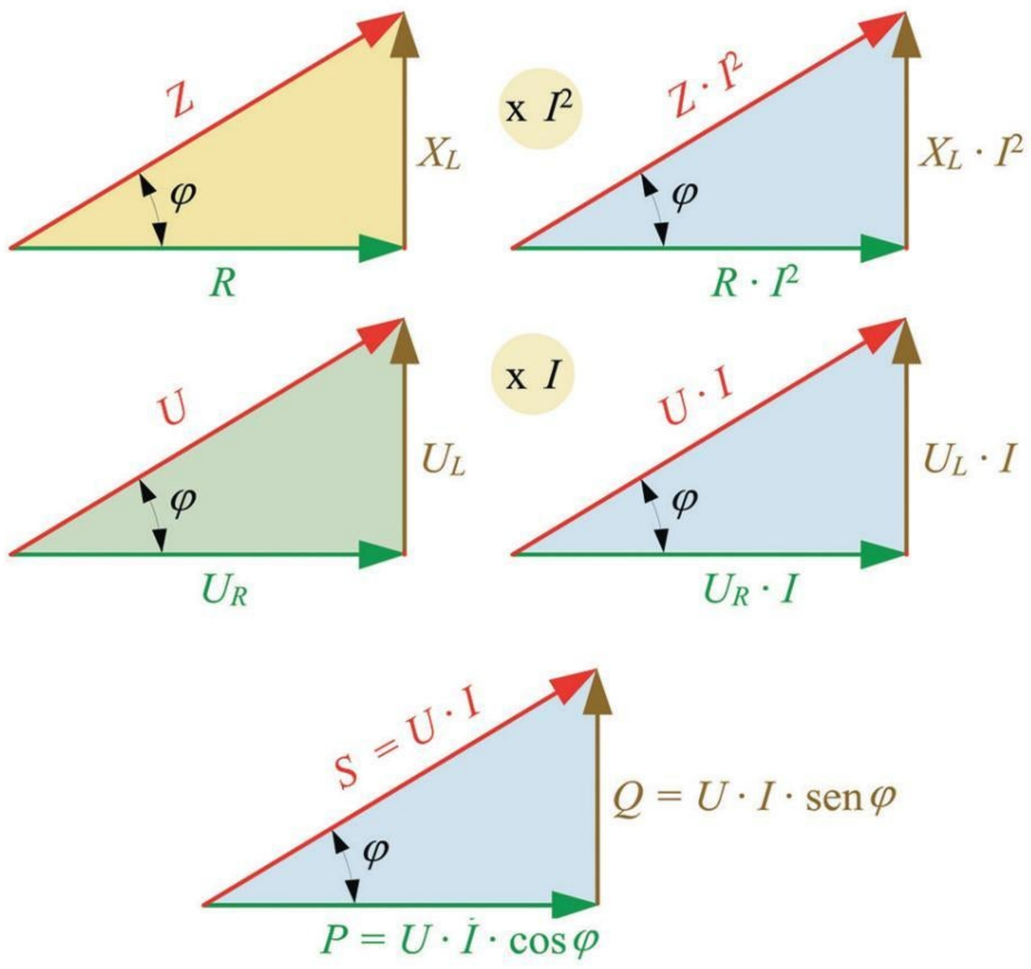


Figura 13.8. Triángulo de potencias.

Potencia activa: este tipo de potencia es el que se transforma en calor en la resistencia. Se puede decir que es la única potencia que realmente se consume en el circuito y, por tanto, es la que debe aportar el generador al circuito.

Esta potencia es la que miden los vatímetros y en una resistencia se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$P = RI^2 \qquad \text{o} \qquad P = U_R I$$

Su unidad de medida es el vatio (W). Según el triángulo de potencias, para calcular la potencia activa de cualquier circuito podemos utilizar la siguiente expresión:

$$P = UI \cos \varphi$$

Potencia reactiva: es la potencia con la que se carga y descarga constantemente la bobina. Realmente, es una potencia que no se consume; únicamente se intercambia entre el generador y la bobina, haciendo fluir una corriente extra por los conductores de alimentación.

En una bobina la potencia reactiva se calcula mediante la expresión:

$$Q_L = X_L I^2 \qquad \text{o} \qquad Q_L = U_L I$$

Su unidad de medida es el voltiamperio reactivo (VAR). Según el triángulo de potencias, para calcular la potencia reactiva de cualquier circuito utilizamos la expresión:

$$Q = UI \text{ sen } \varphi$$

Potencia aparente: es la potencia total que transportan los conductores que alimentan al circuito. Dado que en un circuito R-L existe potencia activa y reactiva, por los conductores que alimentan a dicho circuito se transportan ambas potencias. Si sumamos vectorialmente estas potencias obtendremos la potencia aparente (Figura 13.9).

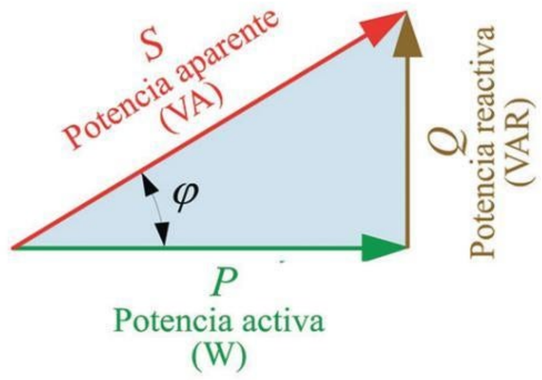


Figura 13.9. Triángulo de potencias.

Se suele representar por la letra *S* y su unidad de medida el voltiamperio (VA). Para calcular la potencia aparente de cualquier circuito utilizamos la expresión:

$$S = UI$$

Del triángulo de potencias se deduce que la potencia aparente también es igual a:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

© Ediciones Paraninfo

Factor de potencia (*FP*): este valor indica la relación que existe entre la potencia activa y la aparente.

$$FP = \frac{P}{S} = \cos \varphi$$

Si observamos el triángulo de potencias, comprobamos que el factor de potencia coincide con el valor del coseno de φ.

De alguna manera el factor de potencia o coseno de φ (ángulo de desfase entre U e I) nos indica la cantidad de potencia activa que existe en un circuito respecto a la potencia total aparente.

En la Figura 13.11 se ha dibujado el triángulo de potencias correspondiente. El factor de potencia resultante es 0,89, valor que está más próximo a la unidad que al cero. Esto nos indica que en el circuito predomina la potencia activa frente a la reactiva. Otra interpretación podría ser la siguiente: de cada 100 unidades de potencia aparente, 89 son de potencia activa.

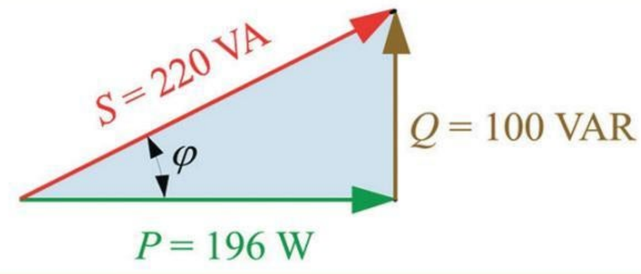


Figura 13.11. Triángulo de potencias.

Actividad resuelta 13.2

Se conectan en serie una bobina de reactancia inductiva igual a 20 Ω con una resistencia de 40 Ω a una tensión de 100 V. Averigua la potencia activa, reactiva y aparente del circuito, así como el factor de potencia. Dibuja el triángulo de potencias y valora el significado del *FP* obtenido.

Solución:

Con la ayuda del triángulo de impedancias (Figura 13.10) averiguamos la impedancia del circuito, el cos φ y el ángulo φ de desfase entre U e I.

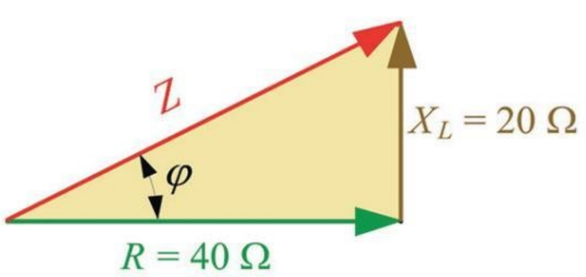


Figura 13.10.

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{40^2 + 20^2} = 44{,}7\ \Omega$$

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z} = \frac{40}{44{,}7} = 0{,}89$$

Le corresponde un ángulo $\varphi = 27°$.

Ahora ya podemos calcular la intensidad del circuito:

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{100}{44{,}7} = 2{,}2\ \text{A}$$

Las diferentes potencias del circuito son:

$$P = UI \cos \varphi = 100 \cdot 2{,}2 \cdot 0{,}89 = 196\ \text{W}$$

$$Q = UI \operatorname{sen} \varphi = 100 \cdot 2{,}2 \cdot \operatorname{sen} 27° = 100\ \text{VAR}$$

$$S = UI = 100 \cdot 2{,}2 = 220\ \text{VA}$$

Actividad resuelta 13.3

Las características de una lámpara fluorescente son las siguientes: P = 40 W, U = 230 V, cos φ = 0,6. Determina la intensidad, la potencia reactiva y aparente y el circuito equivalente.

Solución:

Para el cálculo de la intensidad nos valemos de la fórmula general de potencia activa:

$$P = UI \cos \varphi \quad \Rightarrow \quad I = \frac{100}{U \cos \varphi} = \frac{40}{230 \cdot 0{,}6} = 0{,}3\ \text{A}$$

El ángulo φ que le corresponde al factor de potencia de 0,6 es igual a 53°.

Con estos datos ya podemos calcular la potencia reactiva y aparente de la lámpara.

$$Q = UI \operatorname{sen} \varphi = 230 \cdot 0{,}3 \cdot \operatorname{sen} 53° = 55\ \text{VAR}$$

$$S = UI = 230 \cdot 0{,}3 = 69\ \text{VA}$$

El circuito equivalente de una lámpara fluorescente se puede dibujar como una reactancia inductiva y una resistencia en serie (Figura 13.12). Para determinar los valores de R y X_L, utilizamos las fórmulas ya conocidas:

$$P = RI^2 \quad \Rightarrow \quad R = \frac{P}{I^2} = \frac{40}{0{,}3^2} = 444\ \Omega$$

$$Q_L = X_L I^2 \quad \Rightarrow \quad X_L = \frac{Q_L}{I^2} = \frac{55}{0{,}3^2} = 611\ \Omega$$

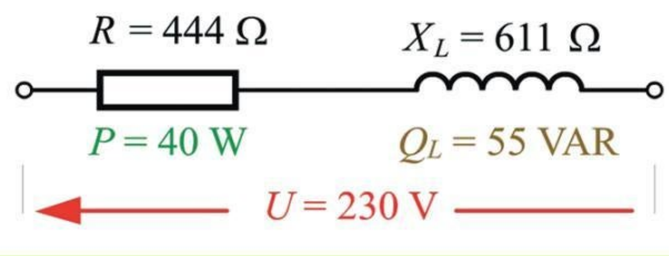


Figura 3.12.

© Ediciones Paraninfo

Actividad resuelta 13.4

Se desea conocer los valores característicos y el circuito equivalente de la bobina de un contactor electromagnético. Para ello se realiza un ensayo en el laboratorio de Electrotecnia que consiste en alimentarla a 24 V/ 50 Hz y medir la intensidad de corriente y la potencia activa (Figura 13.13). Las lecturas obtenidas en los aparatos de medida son 0,39 A y 7 W.

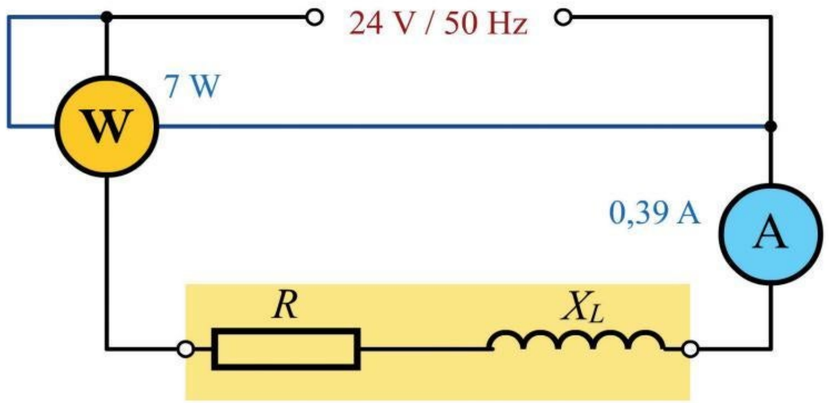


Figura 13.13.

Solución:

$$P = UI\cos\varphi \quad \Rightarrow \quad \cos\varphi = \frac{P}{UI} = \frac{7}{24 \cdot 0{,}39} = 0{,}75$$

$$\varphi = \text{arc cos}(0{,}75) = 41{,}41°$$

$$Z = \frac{U}{I} = \frac{24}{0{,}39} = 61{,}54\ \Omega$$

Para calcular la resistencia y la reactancia inductiva de la bobina vamos a utilizar esta vez las relaciones que se establecen en el triángulo de impedancias.

$$\cos\varphi = \frac{R}{Z} \Rightarrow R = Z\cos\varphi = 61{,}54 \cdot \cos 41{,}4° = 46{,}16\ \Omega$$

$$\text{sen}\ \varphi = \frac{X_L}{Z} \Rightarrow X_L = Z\ \text{sen}\ \varphi = 61{,}54 \cdot \text{sen}\ 41{,}4° = 40{,}7\ \Omega$$

$$X_L = 2\pi fL \Rightarrow L = \frac{X_L}{2\pi f} = \frac{40{,}7}{2\pi \cdot 50} = 0{,}13\ \text{H}$$

Por último calculamos el resto de las potencias.

$$Q = UI\ \text{sen}\ \varphi = 24 \cdot 0{,}39 \cdot \text{sen}\ 41{,}4 = 6{,}2\ \text{VAR}$$

$$S = UI = 24 \cdot 0{,}39 = 9{,}36\ \text{VA}$$

13.2. Acoplamiento en serie de resistencias y condensadores

En la Figura 13.14 se ha representado el circuito formado por una resistencia de valor óhmico ***R*** conectada en serie con un condensador de reactancia $\boldsymbol{X_C}$.

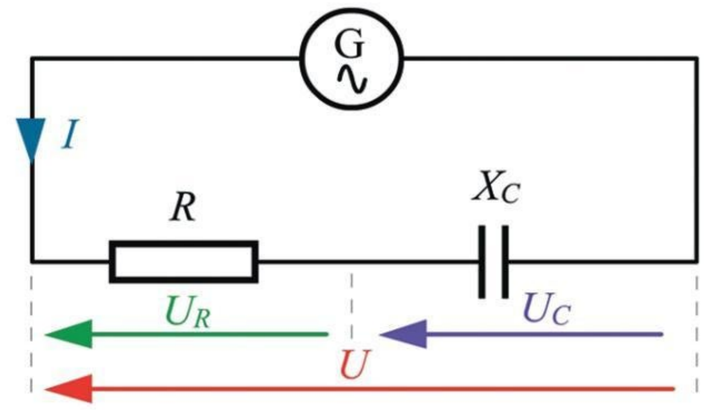


Figura 13.14. Circuito serie R-C.

Al igual que ocurría con el circuito R-L, aquí aparece una sola corriente eléctrica ***I*** que queda limitada por la impedancia del circuito ***Z***.

$$I = \frac{U}{Z}$$

En la resistencia aparece una caída de tensión U_R y en el condensador U_C.

$$U_R = RI \qquad U_C = X_C I$$

Aquí también se cumple que la tensión total aplicada al circuito es igual a la suma vectorial de las caídas de tensión que se dan en la resistencia y el condensador:

$$\vec{U} = \vec{U}_R + \vec{U}_C$$

Para dibujar el diagrama vectorial (Figura 13.15) de estas magnitudes eléctricas tenemos en cuenta que la caída de tensión U_R queda en fase con la intensidad. Por otro lado, el condensador provoca un adelanto de 90º de la corriente respecto de la tensión. Como hemos dibujado a la corriente en el ángulo cero, habrá que situar el vector de la tensión U_C del condensador retrasado respecto a la corriente un ángulo de 90º.

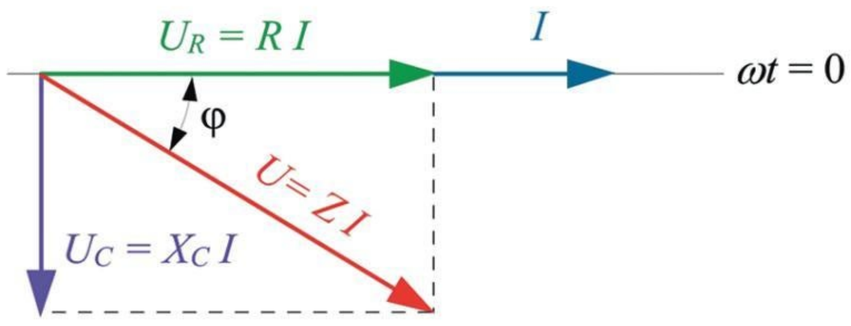


Figura 13.15. Diagrama vectorial de un circuito R-C.

En el diagrama vectorial observamos que la corriente ***I*** queda adelantada un ángulo φ respecto a la tensión.

De este diagrama vectorial se deduce el triángulo de impedancias de la Figura 13.16. Con él ya podemos determinar el valor de la impedancia y el del ángulo de desfase por cualquiera de las relaciones trigonométricas.

© Ediciones Paraninfo

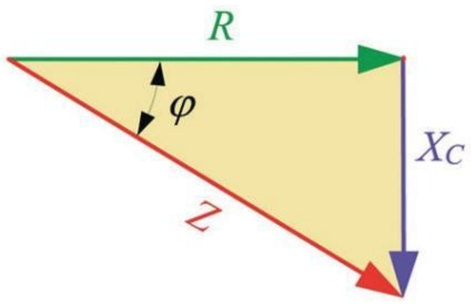


Figura 13.16. Triángulo de impedancias.

$$tg\ \varphi = \frac{X_C}{R}$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}$$

En cuanto a las potencias que se dan en el circuito, hay que indicar que en la resistencia se produce potencia activa que se transforma en calor. Por otro lado, en el condensador aparece una potencia reactiva provocada por las constantes cargas y descargas del mismo.

Al dibujar el triángulo de potencias (Figura 13.17) observamos que la potencia reactiva Q_C queda invertida, lo que nos indica que esta posee un valor negativo respecto a la potencia reactiva que produce la bobina.

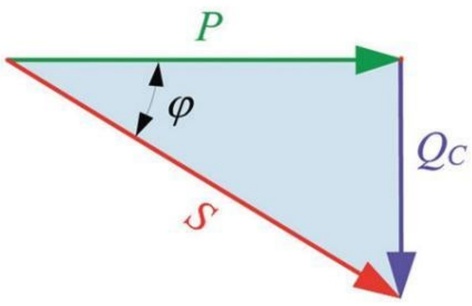


Figura 13.17. Triángulo de potencias.

Actividad resuelta 13.5

En la Figura 13.18 se muestra un circuito serie R-C.

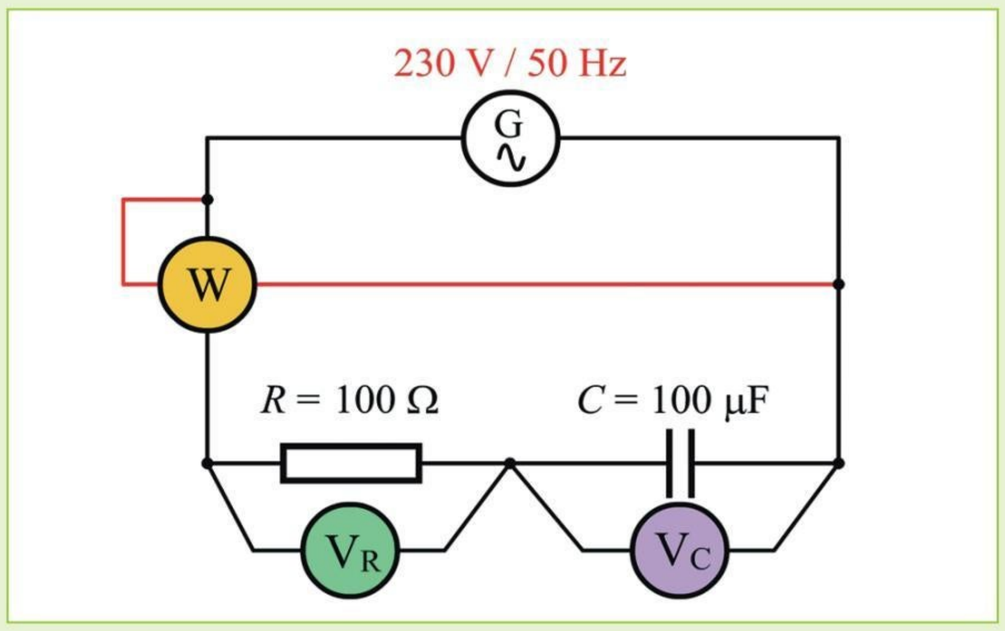


Figura 13.18.

Averigua la lectura de los aparatos de medida, así como la intensidad de la corriente, potencia reactiva, potencia aparente y el factor de potencia. Dibuja el diagrama vectorial correspondiente.

Solución:

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{10^6}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 100} = 31{,}8\ \Omega$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2} = \sqrt{100^2 + 31{,}8^2} = 105\ \Omega$$

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{230}{105} = 2{,}2\ \text{A}$$

$$U_R = RI = 100 \cdot 2{,}2 = 220\ \text{V}$$

$$U_C = X_C I = 31{,}8 \cdot 2{,}2 = 70\ \text{V}$$

$$\text{tg}\ \varphi = \frac{X_C}{R} = \frac{31{,}8}{100} = 0{,}32$$

Le corresponde un ángulo $\varphi = 17{,}7°$.

$$P = UI \cos \varphi = 230 \cdot 2{,}2 \cdot \cos 17{,}7° = 482\ \text{W}$$

$$Q = UI \operatorname{sen} \varphi = 230 \cdot 2{,}2 \cdot \operatorname{sen} 17{,}7° = 154\ \text{VAR}$$

$$S = UI = 230 \cdot 2{,}2 = 506\ \text{VA}$$

$$FP = \cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{482}{506} = 0{,}95$$

El ángulo de desfase es de 17,7° de adelanto de la corriente respecto de la tensión, tal como se muestra en el diagrama vectorial de la Figura 13.19.

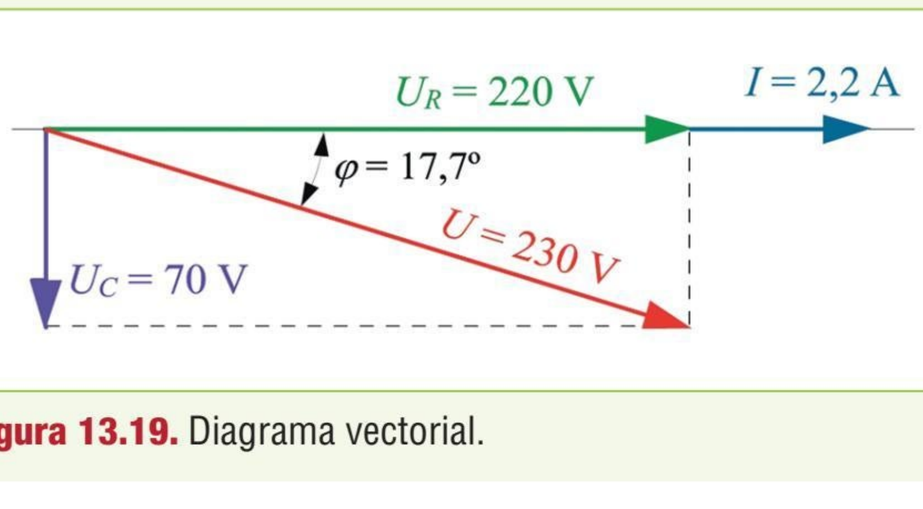


Figura 13.19. Diagrama vectorial.

Actividad resuelta 13.6

Para evitar que un pequeño soldador para circuitos impresos de 110 V/100 W se funda al conectarlo a una red de C.A. de 230 V/50 Hz, se le conecta en serie un condensador. Determina las características de dicho condensador.

Solución:

Para hacernos una idea de cómo resolver este problema, primero dibujamos el circuito (Figura 13.20). Para ello tenemos en cuenta que el soldador consta de una resistencia *R*

© Ediciones Paraninfo

sometida a una tensión de 110 V y que desarrolla una potencia de 100 W.

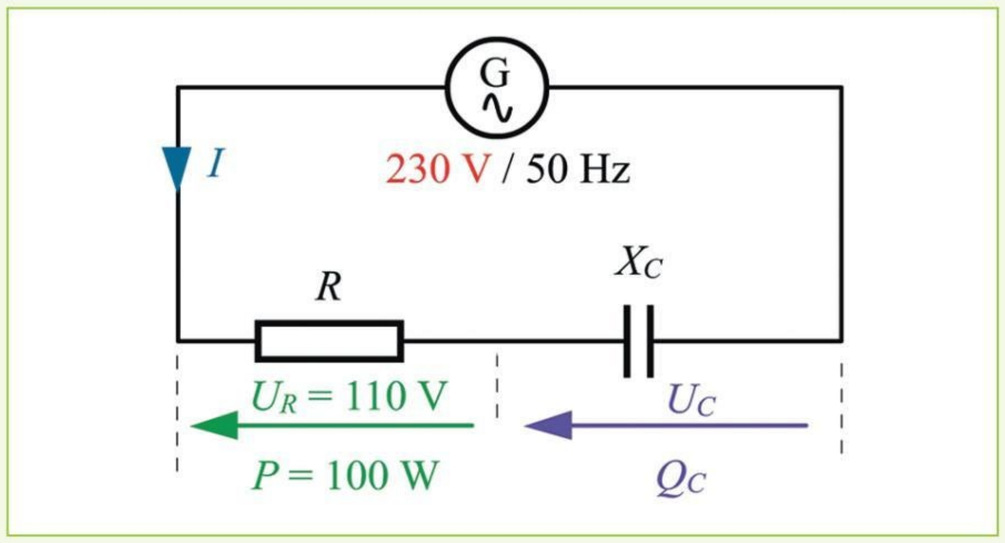


Figura 13.20.

$$\cos \varphi = \frac{U_R}{U} = \frac{110}{230} = 0{,}48$$

$$U_C = \sqrt{U^2 - U_R^2} = \sqrt{230^2 - 110^2} = 202 \text{ V}$$

Con la ayuda del triángulo de tensiones (Figura 13.21) podemos averiguar el factor de potencia y la tensión U_C que aparece en el condensador.

Con estos datos ya podemos averiguar la corriente eléctrica:

$$P = UI \cos \varphi \quad \Rightarrow \quad I = \frac{P}{U \cos \varphi} = \frac{100}{230 \cdot 0{,}48} = 0{,}91 \text{ A}$$

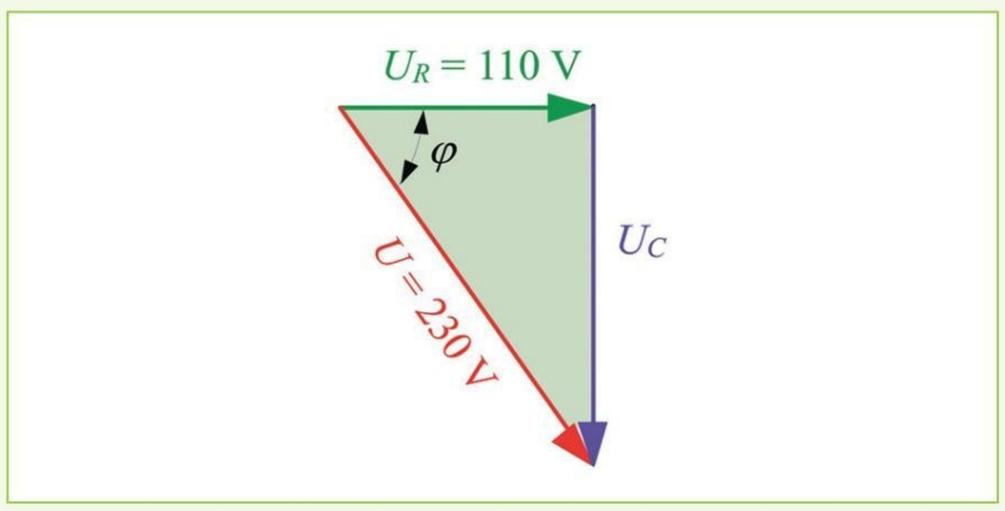


Figura 13.21. Triangulo de tensiones.

Aplicamos la ley de Ohm al condensador para determinar su reactancia capacitiva:

$$X_C = \frac{U_C}{I} = \frac{202}{0{,}91} = 222\ \Omega$$

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 222} =$$

$$= 14 \cdot 10^{-6} \text{ F} = 14\ \mu\text{F}$$

Las características del condensador son de 14 µF/202 V.

Como el condensador no consume potencia activa, el rendimiento alcanzado por este método para provocar una caída de tensión en un elemento resistivo es infinitamente mayor que si hubiésemos colocado una resistencia en serie con el soldador.

Actividad resuelta 13.7

Se desea conectar una tira de 10 diodos LED serie a una red de C.A. de 230 V/50 Hz. Para conseguir que funcione correctamente a los valores nominales de cada diodo de 4 V y 20 mA, se le conecta en serie con una resistencia en serie de 1 kΩ y un condensador (Figura 13.22). Averigua las características de dicho condensador.

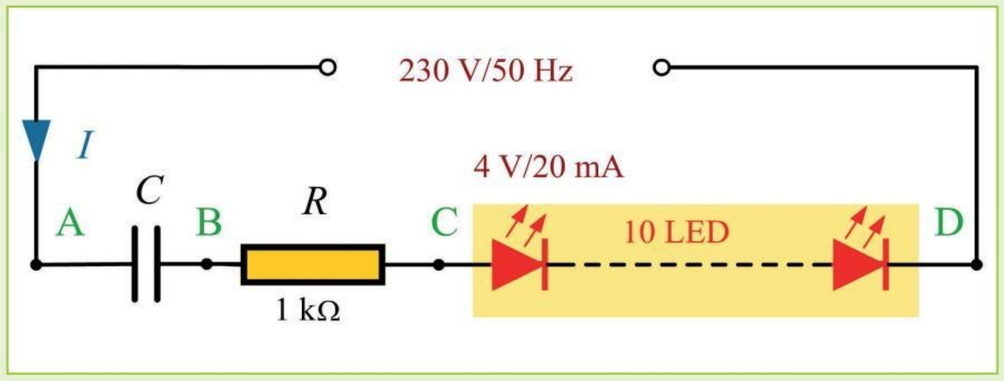


Figura 13.22.

Solución:

Primero calculamos las tensiones en cada una de las cargas resistivas.

$$U_{BC} = R \cdot I = 1.000 \cdot 0{,}020 = 20 \text{ V}$$

$$U_{CD} = 10 \cdot 4 \text{ V} = 40 \text{ V}$$

$$U_{BD} = U_{BC} + U_{CD} = 20 + 40 = 60 \text{ V}$$

Ahora dibujamos el triángulo de tensiones (Figura 13.23) y calculamos el factor de potencia y la tensión U_{AB} del condensador.

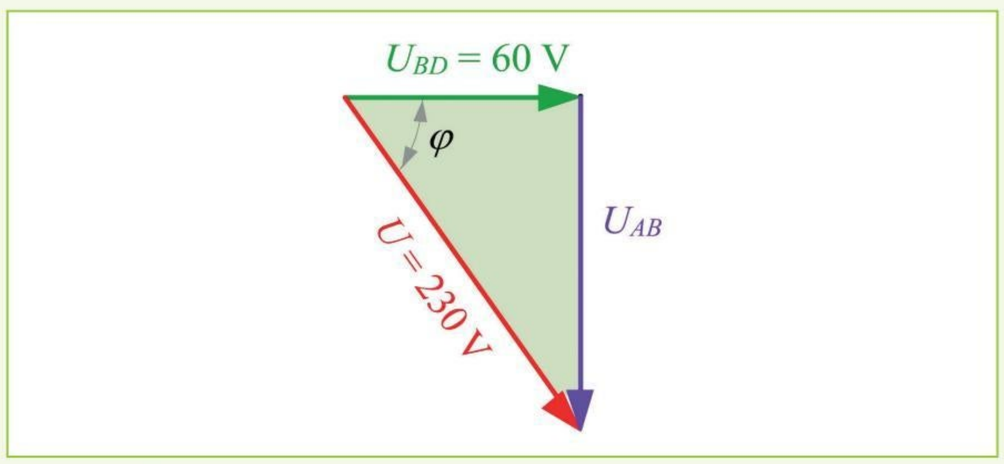


Figura 13.23. Triangulo de tensiones.

$$\cos \varphi = \frac{U_{BD}}{U} = \frac{60}{230} = 0{,}26$$

$$\varphi = \text{arc cos}(0{,}26) = 74{,}93°$$

$$\text{tg } \varphi = \frac{U_{AB}}{U_{BD}} \quad \Rightarrow \quad U_{AB} = U_{BD} \cdot \text{tg } \varphi = 60 \cdot \text{tg } 74{,}93° = 222{,}8 \text{ V}$$

$$X_C = \frac{U_{AB}}{I} = \frac{222{,}8}{0{,}02} = 11.140\ \Omega$$

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 11.140} = 2{,}857 \cdot 10^{-7} \text{ F} = 0{,}29\ \mu\text{F}$$

Las características del condensador serán de 0,29 µF/223 V.

© Ediciones Paraninfo

13.3. Circuito serie R-L-C

En la Figura 13.24 hemos conectado en serie una resistencia R, una bobina con una reactancia inductiva X_L y un condensador con una reactancia capacitiva X_C.

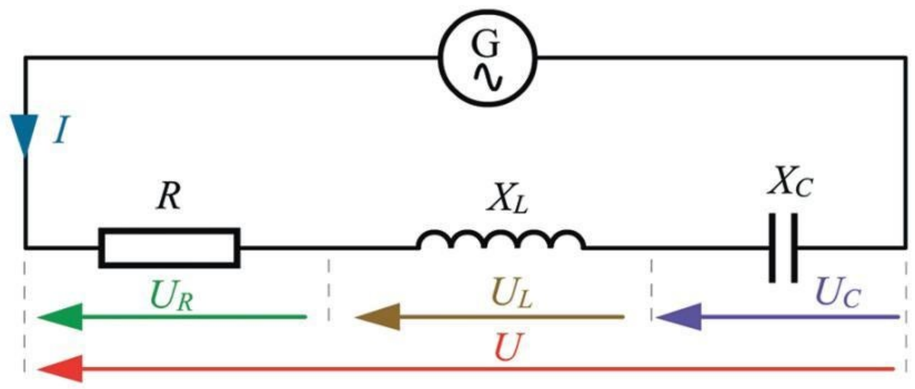


Figura 13.24. Circuito serie R-L-C.

En la Figura 13.25 se ha dibujado el diagrama vectorial correspondiente a este circuito. Al situar en el diagrama las caídas de tensión en la bobina y el condensador (U_L y U_C) se observa que estas quedan en oposición, por lo que la suma vectorial de estas tensiones se convierte en una resta aritmética.

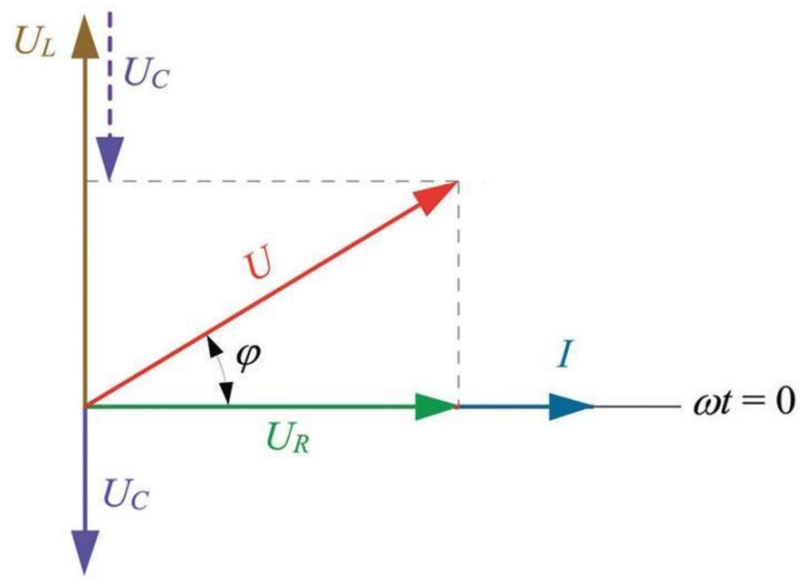


Figura 13.25. Diagrama vectorial de circuito R-L-C.

$$U_R = RI \qquad U_L = X_L I \qquad U_C = X_C I$$

$$U = U_R + U_L + U_C$$

De este diagrama se obtiene el triángulo de impedancias de la Figura 13.26, donde se observa que las reactancias de la bobina y condensador quedan también en oposición.

Para construir el triángulo de impedancias de la Figura 13.26 se ha supuesto que la reactancia inductiva X_L es más grande que la reactancia X_C del condensador. Al obtener la impedancia Z del circuito observamos que los efectos que pudiera provocar la reactancia de la bobina quedan compensados por la reactancia del condensador. El resultado es que el circuito se comporta como si únicamente tuviese una bobina de reactancia igual a $(X_L - X_C)$. Del triángulo de impedancias se deduce que:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

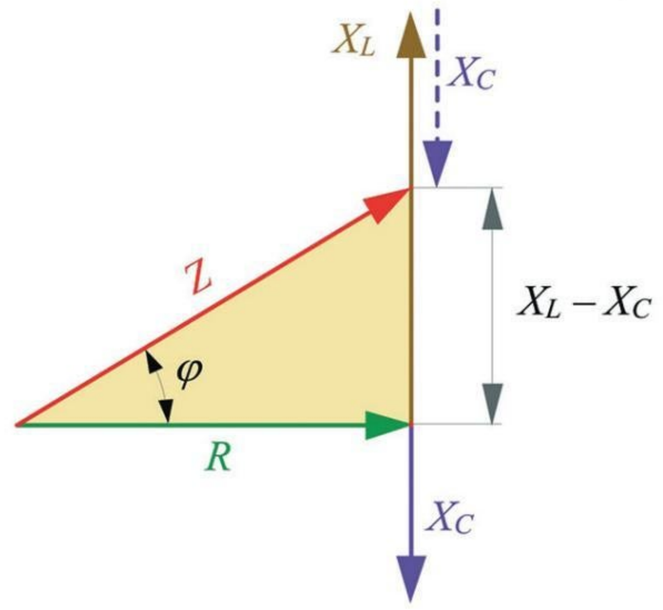


Figura 13.26. Triángulo de impedancias.

Una vez obtenida la impedancia ya se puede calcular la intensidad de la corriente eléctrica:

$$I = \frac{U}{Z}$$

Al predominar, en este caso, la reactancia inductiva sobre la capacitiva, se produce un ángulo de retraso φ de la corriente respecto de la tensión. Para calcular este ángulo nos valemos del triángulo de impedancias al que aplicamos cualquiera de las funciones trigonométricas conocidas.

$$\text{tg } \varphi = \frac{X_L - X_C}{R}$$

Las potencias se pueden calcular por las fórmulas ya conocidas. Aquí es importante observar que cuando la bobina se descarga de potencia reactiva, parte de la misma sirve para la carga del condensador. En el siguiente cuarto de ciclo, el condensador devuelve esta potencia reactiva a la bobina. Si tuviésemos que dibujar el triángulo de potencias, situaríamos la potencia reactiva del condensador Q_C en oposición con la de la bobina Q_L, de manera que sus efectos queden compensados, tal como se muestra en la Figura 13.27.

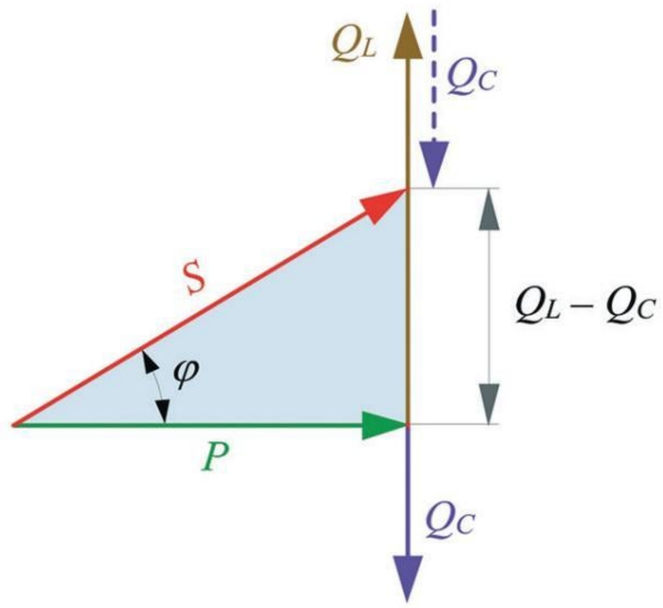


Figura 13.27. Triángulo de potencias.

© Ediciones Paraninfo

Actividad resuelta 13.8

Averigua los valores de Z, I, U_R, U_L, U_C, P, Q, S y el factor de potencia del circuito serie R-L-C de la Figura 13.28. Dibuja el diagrama vectorial.

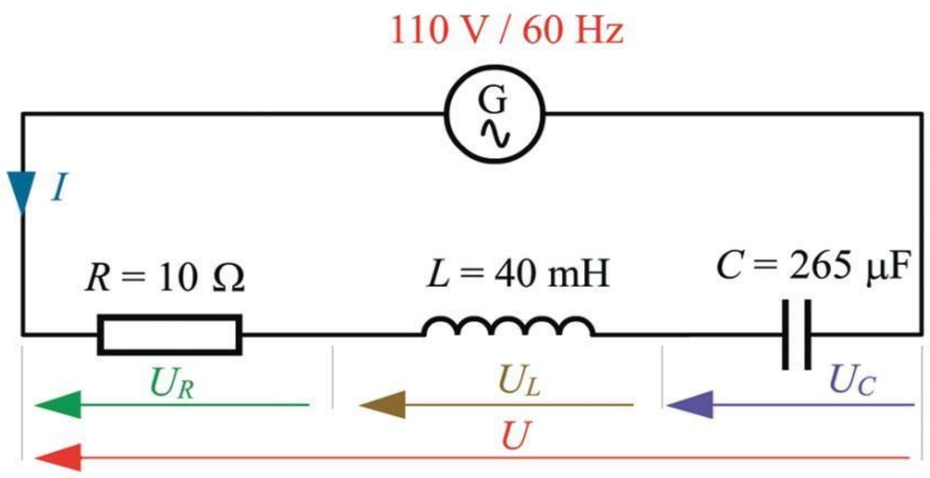


Figura 13.28.

Solución:

$$X_L = 2\pi fL = 2 \cdot \pi \cdot 60 \cdot 0{,}04 = 15\ \Omega$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{10^6}{2 \cdot \pi \cdot 60 \cdot 265} = 10\ \Omega$$

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{10^2 + (15 - 10)^2} = 11\ \Omega$$

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{110}{11} = 10\ \text{A}$$

$$U_R = RI = 10 \cdot 10 = 100\ \text{V}$$

$$U_L = X_L I = 15 \cdot 10 = 150\ \text{V}$$

$$U_C = X_C I = 10 \cdot 10 = 100\ \text{V}$$

$$\text{tg}\ \varphi = \frac{X_L - X_C}{R} = \frac{15 - 10}{10} = 0{,}5$$

le corresponde un ángulo $\varphi = 26{,}6°$.

$$P = UI \cos \varphi = 110 \cdot 10 \cdot \cos 26{,}6° = 984\ \text{W}$$

$$Q = UI \text{ sen } \varphi = 110 \cdot 10 \cdot \text{sen } 26{,}6° = 493\ \text{VAR}$$

$$S = U \cdot I = 110 \cdot 10 = 1.100\ \text{VA}$$

En la Figura 13.29 se muestra el diagrama vectorial correspondiente al circuito. Aquí se observa que la corriente queda retrasada un ángulo de 26,6° respecto a la tensión, hecho que nos indica que el circuito es predominantemente inductivo.

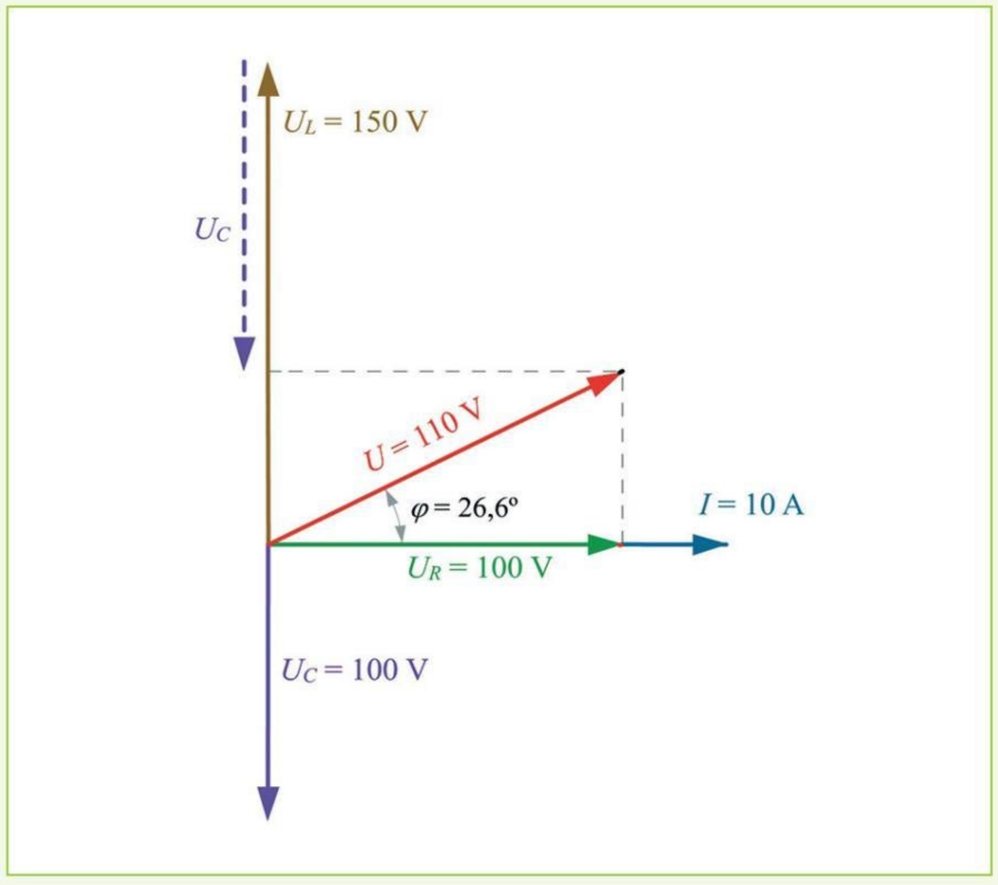
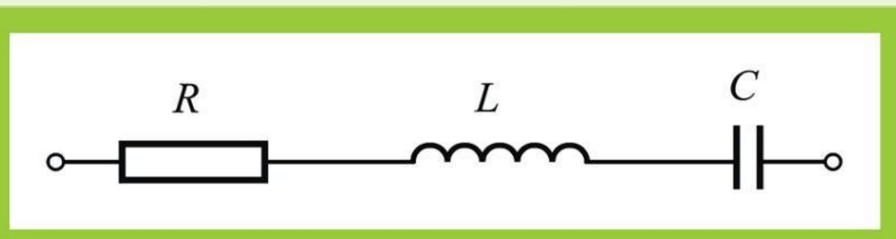


Figura 13.29. Diagrama vectorial.

Actividad propuesta 13.1

Resuelve los ejercicios planteados en la Tabla 13.1 para diferentes circuitos serie R-L-C.

Tabla 13.1.



Ejercicio	1.º	2.º	3.º	4.º	5.º	6.º
R (Ω)	50	10	50	—	?	?
L (H)	0,1	—	0,2	0,5	?	?
C (μF)	—	10	200	100	—	—
U (V)	100	400	230	200	100	230
I (A)	?	?	?	?	10	3
f (Hz)	60	50	50	50	50	50
FP	?	?	?	?	0,5	?
P (W)	?	?	?	?	?	500
Q (VAR)	?	?	?	?	?	?
S (VA)	?	?	?	?	?	?

La solución a esta Actividad propuesta la puedes encontrar dentro del MATERIAL WEB elaborado para este texto.

© Ediciones Paraninfo

13.4. Importancia práctica del factor de potencia (cos φ)

Pongamos como ejemplo un motor monofásico de 1.000 W a 230 V con un cos $\varphi = 0{,}6$. Estos datos nos indican que el motor desarrolla una potencia mecánica equivalente a los 1.000 W de potencia activa suministrados por la red eléctrica. Por otro lado, el factor de potencia está bastante por debajo de la unidad, lo que nos muestra la presencia de una potencia reactiva elevada causada por el efecto de la autoinducción de los bobinados. Hay que pensar que la potencia reactiva no se transforma en trabajo útil en el motor, simplemente sirve para generar el campo electromagnético, para luego ser devuelta al generador. Este trasiego de energía reactiva del generador al motor, y viceversa, hace que la compañía suministradora de energía eléctrica tenga que proporcionar una potencia aparente por la red eléctrica muy superior a la que realmente se consume. En consecuencia, se produce un aumento de corriente por los conductores de la línea que repercute directamente en los costes de las instalaciones eléctricas propiedad de las compañías.

En nuestro ejemplo (Figura 13.30):

$$S = \frac{P}{\cos \varphi} = \frac{1.000}{0{,}6} = 1.667 \text{ VA}$$

$$Q = S \cdot \text{sen } \varphi = 1.667 \cdot 0{,}8 = 1.334 \text{ VAR}$$

$$I = \frac{P}{U \cos \varphi} = \frac{1.000}{230 \cdot 0{,}6} = 7{,}25 \text{ A}$$

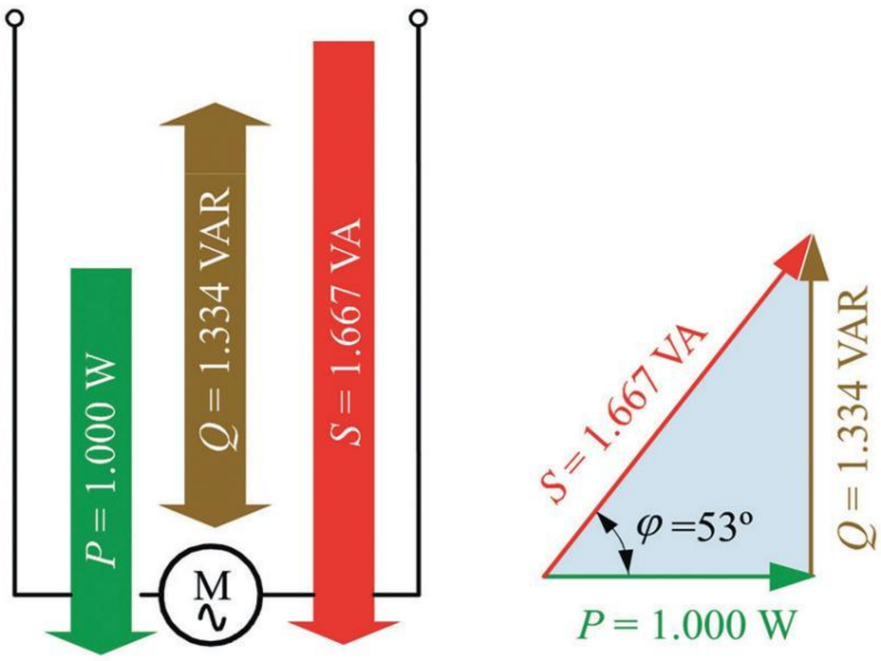


Figura 13.30. Triangulo de potencias para *FP* = 0,6.

De los datos obtenidos se deduce que el motor produce un consumo de 1.000 W, pero necesita de un suministro de 1.667 VA por la línea para funcionar.

Si por algún método consiguiésemos mejorar el factor de potencia hasta, por ejemplo, 0,95, obtendríamos los siguientes valores (Figura 13.31):

$$S = \frac{P}{\cos \varphi} = \frac{1.000}{0{,}95} = 1.053 \text{ VA}$$

$$Q = S \cdot \text{sen } \varphi = 1.053 \cdot 0{,}31 = 326 \text{ VAR}$$

$$I = \frac{P}{U \cos \varphi} = \frac{1.000}{230 \cdot 0{,}95} = 4{,}6 \text{ A}$$

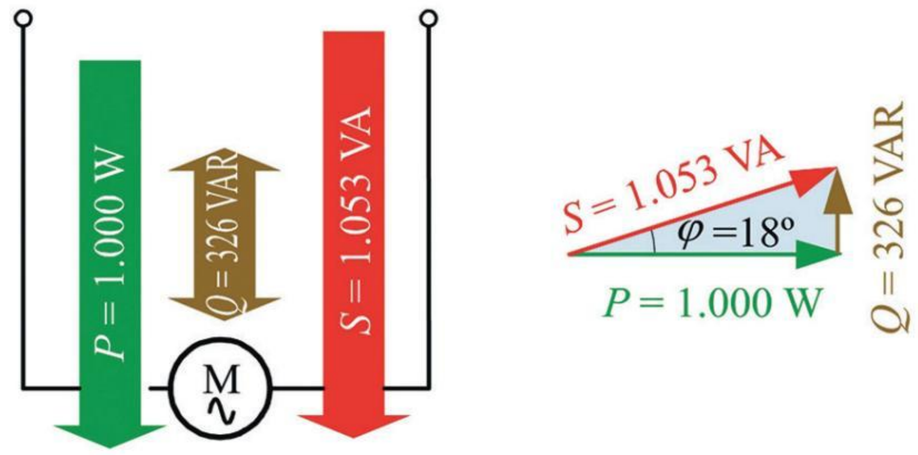


Figura 13.31. Triangulo de potencias para *FP* = 0,95.

De lo que se deduce que al acercar el factor de potencia a la unidad obtenemos una reducción de corriente considerable, así como de la potencia aparente y reactiva.

Para contrarrestar el consumo excesivo de potencia reactiva de carácter inductivo y así reducir también la potencia aparente y la corriente por la línea se instalan condensadores conectados en paralelo con los receptores, tal como se muestra en la Figura 13.32.

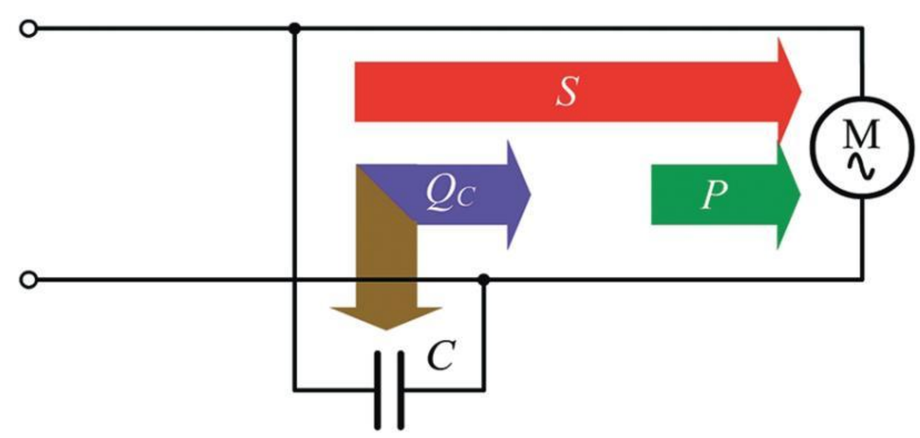


Figura 13.32. Corrección del factor de potencia mediante condensadores.

Los condensadores compensan parte de la potencia reactiva de las bobinas. Hay que pensar que en el instante en que las bobinas descargan su energía reactiva, los condensadores se cargan con ella. En el siguiente cuarto de ciclo, los condensadores devuelven esta energía acumulada a las bobinas para que puedan desarrollar los campos electromagnéticos. De esta forma se evita que parte de la energía reactiva de las bobinas tenga que fluir constantemente por los conductores de la línea, desde el generador hasta aquellas, y viceversa.

Las compañías eléctricas no facturan la energía reactiva, pero exigen que los consumidores trabajen con un factor de potencia cercano a la unidad (en torno a cos $\varphi = 0{,}95$). Para ello disponen de equipos de medida para determinar el *FP*

© Ediciones Paraninfo

medio utilizado durante el periodo de facturación. Dado que la energía reactiva no se cobra, lo que se hace es aplicar un recargo en el precio de kWh consumido a los clientes que trabajen con un *FP* por debajo del recomendado.

Con este criterio se aplica una bonificación o recargo en la factura según sea el factor de potencia medio en el periodo de facturación. En la Tabla 13.2 se muestra un ejemplo de ello, ya que estos factores dependen de la tarifa eléctrica vigente.

Tabla 13.2. Bonificaciones y recargos por el factor de potencia

	Bonificación (%)								0	2,2	4
Cos φ	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1
	47	35,2	26,2	19,2	13,7	9,2	5,6	2,5	Recargo (%)		

Además en las tarifas eléctricas se indica que, cuando un abonado tenga en su instalación un factor de potencia que sea inferior a 0,55 en tres o más mediciones, la empresa suministradora deberá comunicarlo al organismo competente de la Administración Pública, que podrá establecer al usuario un plazo para la mejora de su factor de potencia, y si no se cumpliera el plazo establecido, resolver la aplicación de recargos pudiendo llegar a ordenar la suspensión del suministro en tanto no se mejore la instalación en la medida precisa.

En resumen, con la mejora del *FP* se consigue reducir la potencia aparente de la red sin modificar la potencia activa, lo que trae consigo una reducción de la intensidad de corriente por la línea de suministro de energía. Ello aporta considerables ventajas, tales como reducción de la sección de los conductores en la línea, reducción de la caída de tensión y reducción de las pérdidas de potencia en los conductores.

13.4.1. Corrección del factor de potencia mediante condensadores

Las instalaciones industriales suelen utilizar normalmente receptores de tipo inductivo, como, por ejemplo, motores, lámparas de descarga (fluorescentes, vapor de mercurio, vapor de sodio, etc.), transformadores, electroimanes, etc. Para compensar la energía reactiva producida por estos elementos utilizaremos un condensador (o varios) acoplado en batería, de tal forma que el coseno de φ final obtenido sea próximo a la unidad.

Para el cálculo de la potencia reactiva de estos condensadores o de su capacidad vamos a utilizar el siguiente ejemplo.

Se trata de mejorar el factor de potencia de un motor monofásico de 1.000 W/230 V con un factor de potencia de 0,6 hasta conseguir un factor de potencia de 0,95. Para ello conectamos un condensador de potencia reactiva Q_C y capacidad C en paralelo con el motor, tal como se muestra en la Figura 13.33.

La solución de este problema comienza con la búsqueda de la potencia reactiva Q_C, que deberá poseer el condensador para pasar de un factor de potencia de 0,6 a 0,95. Para ello nos vamos a valer del triángulo de potencias que hemos dibujado en la Figura 13.33.

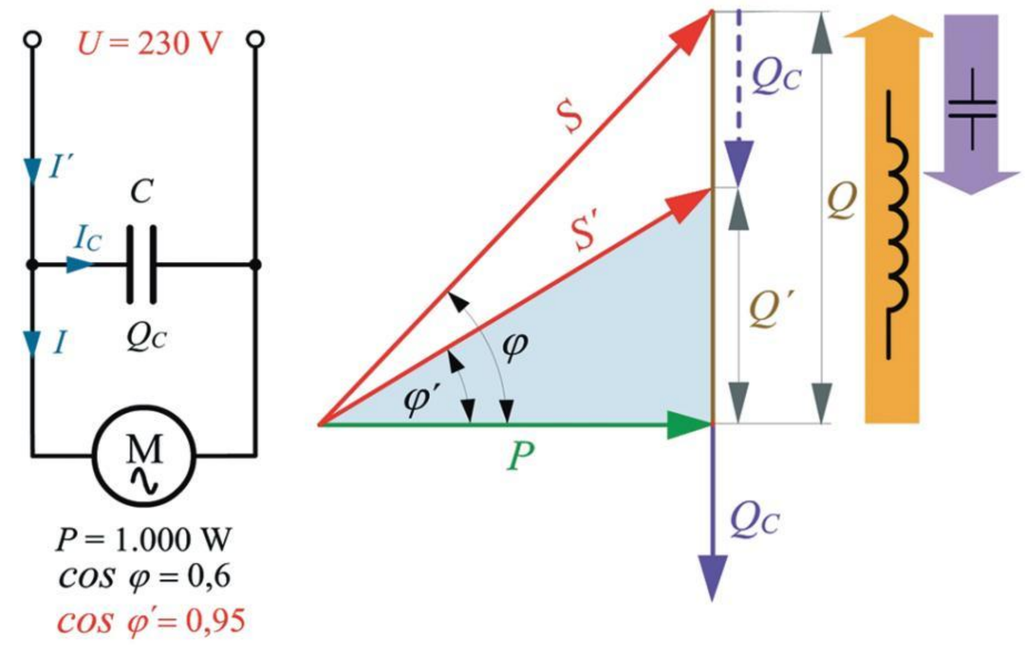


Figura 13.33. Triángulo de potencias en la mejora del factor de potencia.

Llamamos φ al ángulo que corresponde al factor de potencia inicial de 0,6 y φ' al ángulo del factor de potencia que deseamos obtener de 0,95. Q es la potencia reactiva inicial del motor, al que le tenemos que restar la potencia reactiva Q_C del condensador.

Una vez mejorado el factor de potencia obtenemos una potencia reactiva reducida:

$$Q' = Q - Q_C \qquad \text{de donde} \qquad Q_C = Q - Q' \qquad \text{(I)}$$

En los dos triángulos de potencia que se obtienen se cumple que:

$$\text{tg } \varphi = \frac{Q}{P} \qquad \text{de donde} \qquad Q = P \text{ tg } \varphi \qquad \text{(II)}$$

$$\text{tg } \varphi' = \frac{Q'}{P} \qquad \text{de donde} \qquad Q' = P \text{ tg } \varphi' \qquad \text{(III)}$$

Sustituyendo las ecuaciones II y III en la ecuación I obtenemos la expresión final:

$$Q_c = P \cdot \text{tg } \varphi - P \cdot \text{tg } \varphi'$$

$$Q_c = P(\text{tg } \varphi - \text{tg } \varphi')$$

Calcularemos ahora la potencia reactiva que es necesario que tenga la batería de condensadores para corregir el *FP* de nuestro ejemplo:

El ángulo φ que le corresponde al cos 0,6 es 53°.

© Ediciones Paraninfo

El ángulo φ' que le corresponde al cos 0,95 es 18º.

$$Q_c = P(\text{tg}\,\varphi - \text{tg}\,\varphi') = 1.000(\text{tg}\,53^\circ - \text{tg}\,18^\circ) = 1.002\ \text{VAR}$$

Para determinar la capacidad del condensador y la corriente eléctrica que lo alimenta, tenemos en cuenta que el condensador está acoplado directamente a la red a una tensión de 230 V y con una potencia reactiva de 1.002 VAR, tal como se muestra en la Figura 13.34. En este caso se cumple que la potencia reactiva del condensador es igual a:

$$Q_c = UI_C \qquad \text{de donde} \qquad I_C = \frac{Qc}{U} = \frac{1.002}{230} = 4{,}36\ \text{A}$$

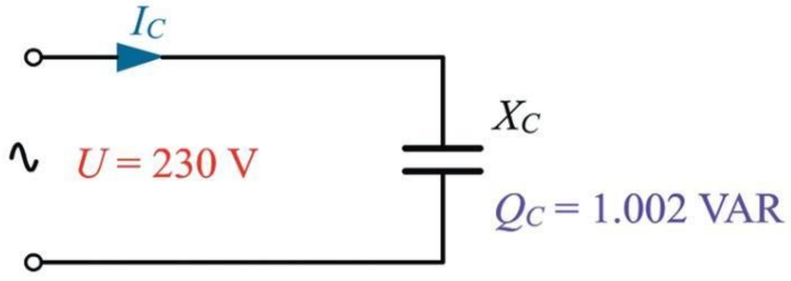


Figura 13.34.

Una vez averiguada la corriente que fluye hacia el condensador, si aplicamos la ley de Ohm para C.A. entre sus extremos, podremos averiguar la reactancia capacitiva de aquel:

$$I_C = \frac{U}{X_C} \qquad \text{de donde} \qquad X_C = \frac{U}{I_C} = \frac{230}{4{,}36} = 52{,}75\ \Omega$$

La capacidad correspondiente al condensador para una frecuencia de 50 Hz es igual a:

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 52{,}75} = 60 \cdot 10^{-6}\ \text{F} = 60\ \mu\text{F}$$

En conclusión, se necesita un condensador de 60 µF a 230 V con una potencia reactiva de 1 kVAR. Si es posible conseguir estas características con un solo condensador, se recurre al acoplamiento de varios condensadores, lo que da como resultado una batería de condensadores.

Actividad resuelta 13.9

En una instalación industrial se mide un factor de potencia de 0,7. Dimensiona la batería de condensadores para mejorar el factor de potencia hasta 0,9. Los datos de dicha instalación son los siguientes: potencia instalada 15 kW, frecuencia 50 Hz, tensión entre fases 400 V. Calcula también la corriente eléctrica por la línea antes y después de mejorar el factor de potencia.

Solución:

Primero determinamos la potencia reactiva de la batería de condensadores para corregir el factor de potencia de 0,7 a 0,9:

El ángulo φ que le corresponde al cos 0,7 es 45,6º.

El ángulo φ' que le corresponde al cos 0,9 es 25,8º.

$$Q_c = P(\text{tg}\,\varphi - \text{tg}\,\varphi') = 15.000\ (\text{tg}\,45{,}6^\circ - \text{tg}\,25{,}8^\circ) =$$
$$= 8.066\ \text{VAR}$$

Como la batería de condensadores está acoplada directamente a la red a una tensión de 400 V y con una potencia reactiva de 8.066 VAR, la corriente por la batería será igual a:

$$I_C = \frac{Q_C}{U} = \frac{8.066}{400} = 20{,}2\ \text{A}$$

El conocimiento del valor de esta corriente es importante para dimensionar los conductores que alimentan a la batería de condensadores, así como para seleccionar las protecciones y dispositivos de control.

La reactancia capacitiva del condensador será entonces:

$$X_C = \frac{U}{I_C} = \frac{400}{20{,}2} = 19{,}8\ \Omega$$

La capacidad correspondiente al condensador para una frecuencia de 50 Hz es igual a:

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 19{,}8} = 161 \cdot 10^{-6}\ \text{F} = 161\ \mu\text{F}$$

La característica de la batería de condensadores es:

161 µF/400 V/8 kVAR

La corriente antes de mejorar el factor de potencia es:

$$I_{\cos\varphi(0{,}7)} = \frac{P}{U \cos\varphi} = \frac{15.000}{400 \cdot 0{,}7} = 53{,}6\ \text{A}$$

La corriente después de mejorar el factor de potencia es:

$$I_{\cos\varphi(0{,}9)} = \frac{P}{U \cos\varphi'} = \frac{15.000}{400 \cdot 0{,}9} = 41{,}7\ \text{A}$$

Actividad resuelta 13.10

Al inspeccionar la instalación de un motor monofásico de las siguientes características: 2 kW; 230 V; 50 Hz y con un *FP* de 0,65, se observa que lleva conectado en paralelo un condensador de 100 µF. Se trata de averiguar cuál sería la mejora del factor de potencia conseguida por el mismo.

Solución:

Primero calculamos la potencia reactiva que va a absorber el condensador:

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 100 \cdot 10^{-6}} = 31{,}83\ \Omega$$

© Ediciones Paraninfo

$$I_C = \frac{U}{X_C} = \frac{230}{31{,}83} = 7{,}23 \text{ A}$$

$$Q_C = X_C \cdot I_C^2 = 31{,}83 \cdot 7{,}23^2 = 1.664 \text{ VAR}$$

La potencia reactiva de tipo inductivo del motor es:

$$\varphi = \text{arc cos}(0{,}65) = 49{,}46°$$

$$Q_M = P\text{tg}\,\varphi = 2.000 \cdot \text{tg } 49{,}46 = 2.338 \text{ VAR}$$

La potencia reactiva del condensador compensa la del motor, quedando como resultado del conjunto el siguiente:

$$Q = Q_M - Q_C = 2.338 - 1.664 = 674 \text{ VAR}$$

El factor de potencia conseguido lo podemos calcular así:

$$\text{tg}\varphi' = \frac{Q}{P} = \frac{674}{2.000} = 0{,}337$$

$$\varphi' = \text{arc tg}(0{,}337) = 18{,}62°$$

$$FP' = \cos\,\varphi' = \cos\,18{,}62° = 0{,}95$$

13.4.2. Tipos de compensación de la energía reactiva

La compensación de energía reactiva se lleva siempre a cabo mediante la conexión de condensadores en paralelo con la carga a compensar. En una instalación eléctrica con muchas cargas de carácter inductivo se puede llevar esta compensación de dos formas diferentes:

a) **Compensación individual:** se conecta un condensador en paralelo con cada carga inductiva a compensar (Figura 13.35).

b) **Compensación central:** se conecta una gran batería de condensadores en paralelo con la línea general para compensar la potencia reactiva de todo el conjunto de la instalación eléctrica (Figura 13.36). Como la potencia reactiva a compensar de la instalación depende de las cargas que estén conectadas en cada momento, se hace necesaria la utilización de baterías automáticas de condensadores que sean capaces de conectar y desconectar escalonadamente grupos de condensadores. Al dispositivo que es capaz de medir en todo momento el *FP* de la instalación y conecta automáticamente los condensadores necesarios, se lo conoce por el nombre de regulador de potencia reactiva.

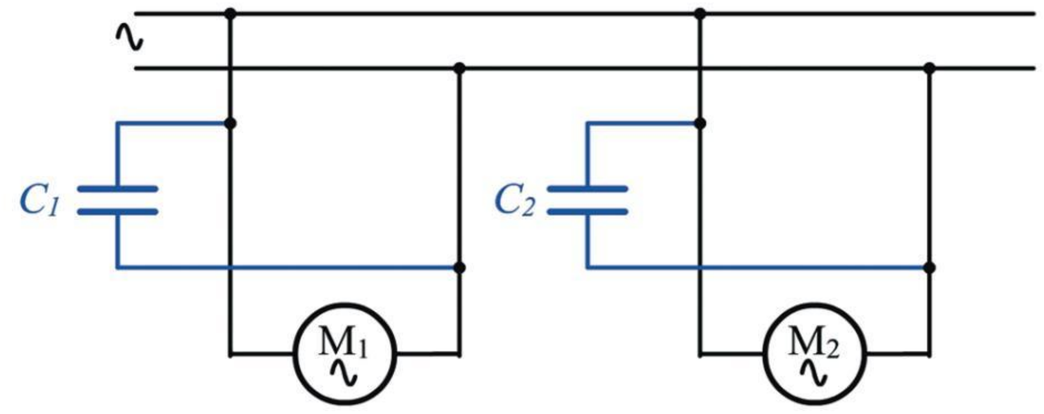


Figura 13.35. Compensación individual de potencia reactiva.

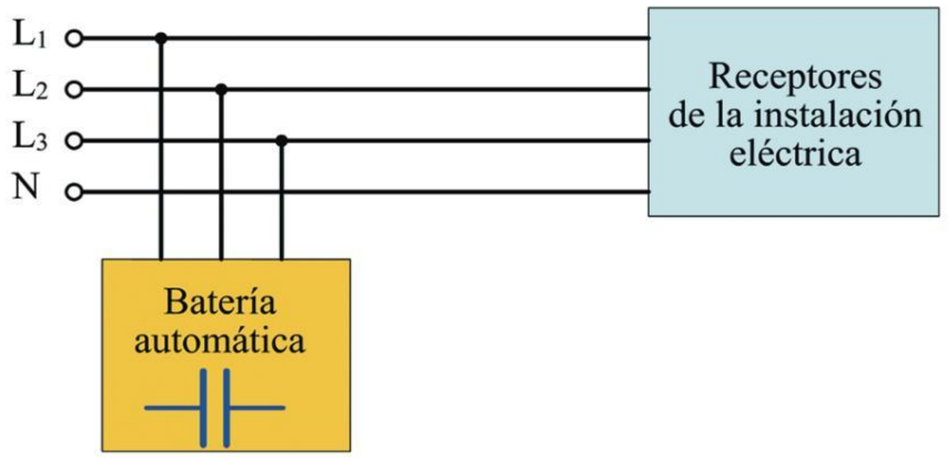
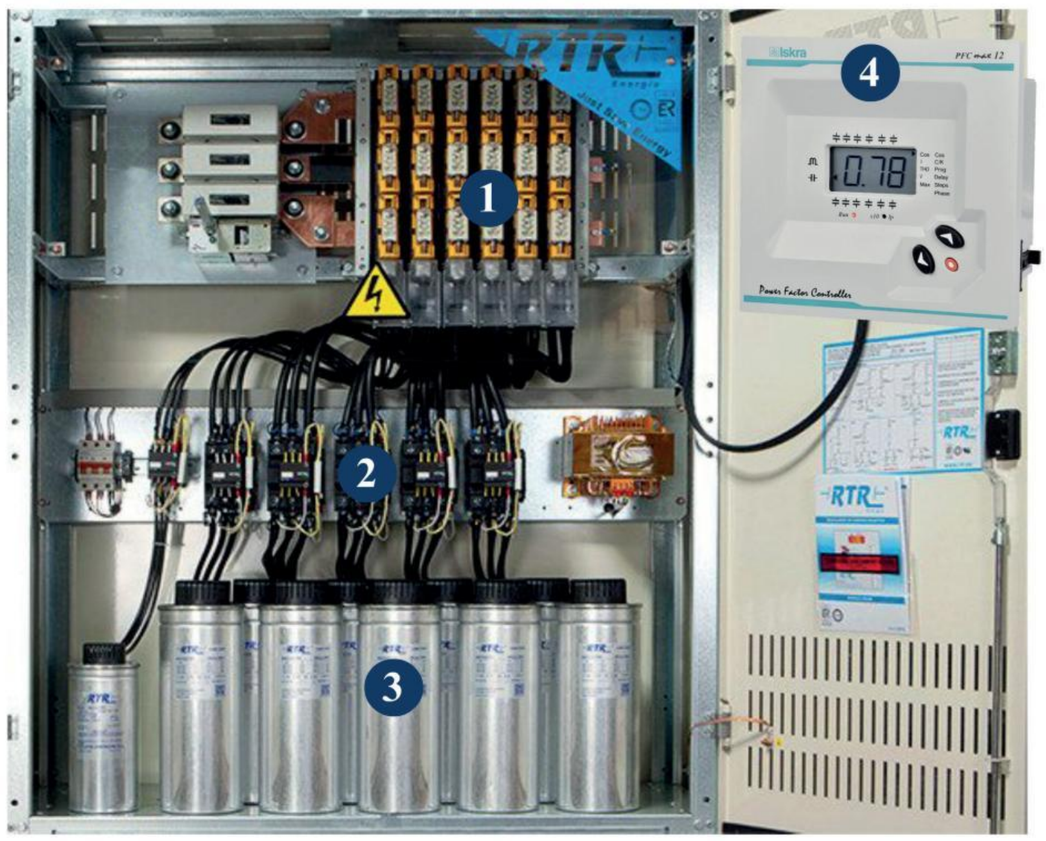


Figura 13.36. Compensación central de potencia reactiva mediante batería automática de condensadores.

La compensación individual resulta muy costosa y se utiliza fundamentalmente para lámparas de descarga; se les incorpora el condensador directamente en el equipo de arranque y se las conoce como lámparas de AF (alto factor). En instalaciones trifásicas industriales con muchos receptores resulta mucho más ventajosa la compensación central con baterías automáticas de condensadores como la que se muestra en la Figura 13.37.



1. Fusibles de protección
2. Contactores para la conexión de los grupos de condensadores
3. Batería de condensadores
4. Relé para el control automático del factor de potencia

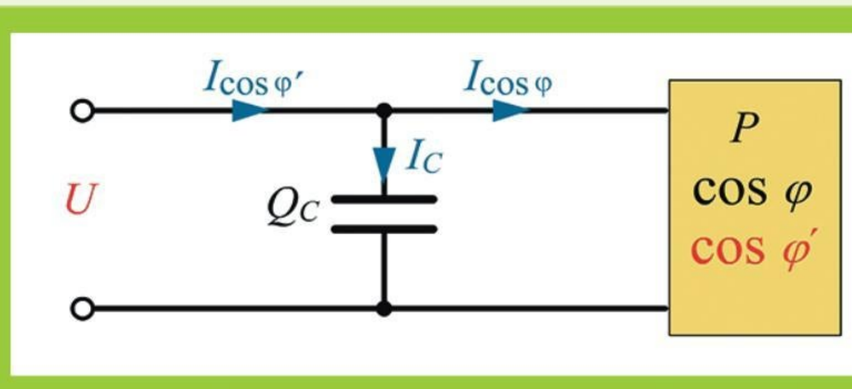
Figura 13.37. Batería automática de condensadores.

© Ediciones Paraninfo

Actividad propuesta 13.2

En la Tabla 13.3 se muestran las características de 5 instalaciones de las que se desea mejorar el factor de potencia de cos φ a cos φ'. Dimensiona la batería de condensadores en cada caso, así como la corriente por la línea, antes y después de la conexión de los condensadores.

Tabla 13.3.



Ejercicio	1.º	2.º	3.º	4.º	5.º
U (V)	230	400	1.000	100	200
f (Hz)	50	50	60	60	50
P (W)	2.000	1.000	9.000	40	100
cos φ	0,55	0,6	0,7	0,8	0,85
cos φ'	0,95	1	0,9	0,99	0,98
Q_c (VAR)	?	?	?	?	?
C (μF)	?	?	?	?	?
I_C (A)	?	?	?	?	?
$I_{\cos\varphi}$ (A)	?	?	?	?	?
$I_{\cos\varphi'}$ (A)	?	?	?	?	?

La solución a esta Actividad propuesta la puedes encontrar dentro del MATERIAL WEB elaborado para este texto.

13.5. Caída de tensión en las líneas eléctricas monofásicas de C.A.

Al igual que ocurría en las líneas bifilares de C.C., en las líneas de C.A. se produce una caída de tensión en los conductores, que habrá que tener en cuenta a la hora de calcular la sección de aquellos. El procedimiento a seguir es muy similar al llevado a cabo para líneas de C.C., aunque difiere en un aspecto: para cargas, por lo general inductivas, aparece un ángulo φ de desfase entre U e I que interviene en el cálculo de la caída de tensión.

En C.C. la caída de tensión se calculaba mediante la expresión:

$$u = R_L I$$

Para una línea monofásica de corriente alterna demostraremos que esta caída de tensión es igual a $u = R_L I \cos \varphi$.

En el circuito de la Figura 13.38 se cumple que:

$$U_0 = U_b + R_L I$$

$R_L I$ representa la caída de tensión óhmica en la línea.

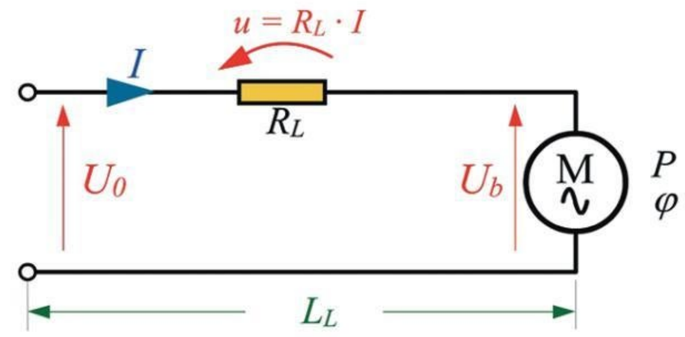


Figura 13.38. Caída de tensión en una línea de C.A.

Dibujamos el diagrama vectorial correspondiente a una carga inductiva, con un desfase de φº entre U e I (Figura 13.39).

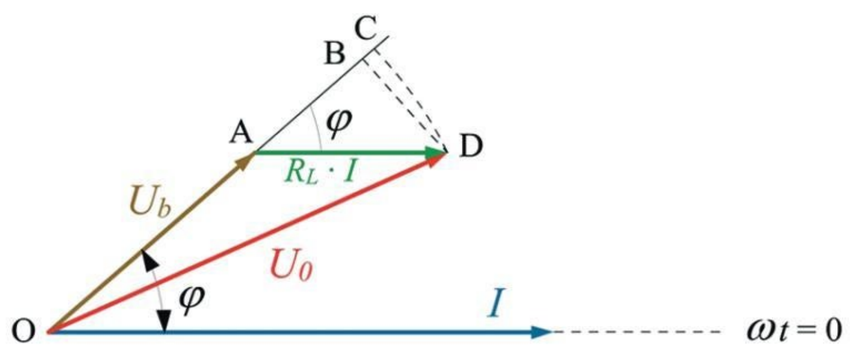


Figura 13.39. Diagrama vectorial para el cálculo de la caída de tensión.

La caída de tensión en la línea es la diferencia, en valores absolutos, entre la tensión U_0 al principio de línea y la del final de la misma U_b:

$$U = U_0 - U_b = \text{OD} - \text{OA} = \text{OC} - \text{OA}$$

Como el tramo BC es muy pequeño, podemos despreciarlo y decir con aproximación que:

$$U = \text{OC} - \text{OA} = \text{OB} - \text{OA} = \text{AB}$$

como $\text{AB} = R_L I \cos \varphi \quad \Rightarrow$

$$u = R_L I \cos \varphi$$

u = Caída de tensión (V).

R_L = Resistencia de la línea (Ω).

I = Corriente eficaz por línea (A).

cos φ = FP de la carga.

Si al igual que hacíamos en C.C. sustituimos la resistencia R_L por la expresión general de resistencia de un

© Ediciones Paraninfo

conductor y despejamos la sección, obtenemos la siguiente expresión:

$$S = \frac{\rho 2 L_L I}{u} \cos \varphi$$

ρ = Resistividad del conductor ($\Omega \cdot mm^2/m$).
u = Caída de tensión máxima en la línea (V).
L_L = Distancia de la carga al punto de alimentación (m).
I = Intensidad por la línea (A).
S = Sección del conductor de la línea (mm^2).
$\cos \varphi$ = FP de la carga.

En el caso de utilizar aquí el concepto de conductividad (γ) en vez del de resistividad (ρ), obtendríamos la siguiente expresión:

$$S = \frac{2 L_L I}{\gamma u} \cos \varphi$$

γ = conductividad del conductor en función de su temperatura máxima de funcionamiento (norma UNE-HD 60364-5-52) (en la Tabla 4.4 del Apartado 4.3.7 de la Unidad 4 de este texto podrás encontrar los valores de la conductividad para los diferentes tipos de conductores).

Actividad resuelta 13.11

Averigua la sección más recomendable para la instalación de un motor de las siguientes características: 10 kW; cos φ = = 0,8; 400 V. La longitud de la línea es de 50 m y se trata de dos conductores de cobre unipolares aislados con PVC bajo tubo empotrado en pared aislante. La caída de tensión máxima admisible es del 1 %.

Solución:

Primero calculamos la corriente por la línea:

$$I = \frac{P}{U \cos \varphi} = \frac{10.000}{400 \cdot 0{,}8} = 31 \text{ A}$$

La caída de tensión máxima admisible en voltios es:

$$u = \frac{400}{100} \cdot 1\ \% = 4 \text{ V}$$

La sección de los conductores para que se produzca como máximo esta caída de tensión es:

$$S = \frac{2 L_L I}{\gamma_{70\,°C}\, u} \cos \varphi = \frac{2 \cdot 50 \cdot 31}{48 \cdot 4} 0{,}8 = 13 \text{ mm}^2$$

La sección comercial que le corresponde es de 16 mm^2. Si consultamos la intensidad máxima admisible para este conductor podremos comprobar que es de 54 A (Tabla 4.3), bastante superior a los 31 A que fluyen por el conductor.

Nota: La conductividad que se ha tomado es la del conductor de PVC de cobre en unas condiciones de temperatura máxima de operación de 70 °C, tal como se indica en la correspondiente norma UNE (Tabla 4.4).

Actividad propuesta 13.3

Calcula la sección de los conductores de las derivaciones individuales de un edificio con viviendas de grado de electrificación básica y elevada según el esquema que se muestra en la Figura 13.40. Los conductores empleados son multiconductores de PVC en montaje empotrado y los contadores están totalmente centralizados. El factor de potencia que se fija para todas las viviendas es de 0,8.

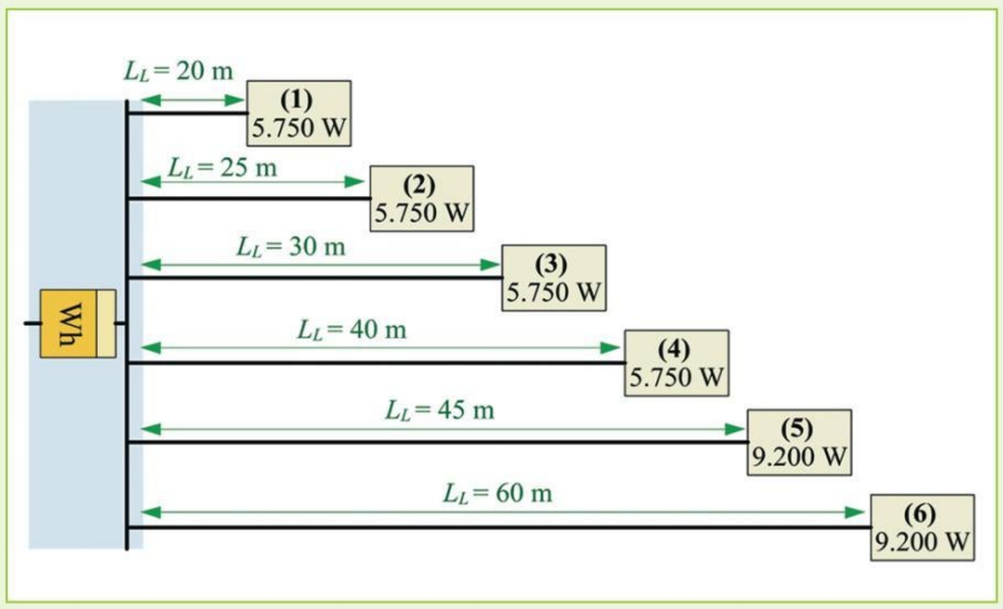


Figura 13.40.

Para resolver este ejemplo se ha tenido en cuenta la Instrucción Técnica Complementaria **ITC-BT-15** del REBT que nos indica que la sección mínima será de 6 mm^2 para este tipo de instalación.

La solución a esta Actividad propuesta la puedes encontrar dentro del MATERIAL WEB elaborado para este texto.

© Ediciones Paraninfo

Comprobación práctica en el laboratorio

13.1. Análisis de circuitos R-L-C. Realiza el montaje de un circuito serie con bobinas, condensadores y resistencias. Utiliza el polímetro para medir las intensidades y tensiones de las diferentes partes del circuito; y con las relaciones estudiadas en apartados anteriores, averigua la impedancia, ángulo de desfase entre *U* e *I* y factor de potencia. Comprueba también las relaciones entre las tensiones del circuito y dibuja los correspondientes diagramas vectoriales. Consigue un osciloscopio y comprueba los ángulos de desfase que se producen en cada uno de los elementos, así como el desfase total entre *U* e *I*.

13.2. Mejora del factor de potencia. Conecta un motor monofásico y mide la tensión, la corriente y la potencia consumida. Calcula el factor de potencia y dimensiona el condensador que sería necesario conectar para mejorar aquel hasta un valor cercano a la unidad. Ahora conecta dicho condensador en paralelo con el motor, repite las medidas y comprueba los efectos de mejora del factor de potencia en el motor.

Como en otras ocasiones, al finalizar cada una de estas actividades deberás elaborar un informe-memoria sobre la actividad desarrollada, indicando los resultados obtenidos y estructurándolos en los apartados necesarios para una adecuada documentación de las mismas (descripción del proceso seguido, medios utilizados, esquemas y planos utilizados, cálculos, medidas, etc.).

© Ediciones Paraninfo

Actividades de comprobación

13.1. ¿Qué elementos producen potencia reactiva en un circuito de C.A.?

a) Un horno eléctrico.

b) Un motor.

c) Un contactor.

13.2. La potencia aparente se mide en:

a) VAR.

b) VA.

c) W.

13.3. ¿Qué nombre se le da a la potencia que realmente se transforma en energía útil en el receptor?

a) Potencia activa.

b) Potencia aparente.

c) Potencia reactiva.

13.4. ¿Cuál es la razón por la que se eleva el factor de potencia de las instalaciones eléctricas?

a) Para reducir la potencia que transportan las líneas eléctricas.

b) Para aumentar la potencia aparente y reducir la corriente por la línea.

c) Para reducir la potencia aparente y la corriente por la línea de alimentación.

13.5. Se conectan en serie una resistencia de 50 Ω y una bobina de 250 mH a una red de C.A. de 230 V, 50 Hz. Averigua Z, I, φ, U_R, U_L, P, Q, S, FP y dibuja el diagrama vectorial.

13.6. Se conectan en serie una resistencia de 10 kΩ y un condensador de 150 nF a una red de C.A. de 100 V, 60 Hz. Averigua I, U_R, U_C, P, Q, S, FP y dibuja el diagrama vectorial.

13.7. Se conectan en serie una resistencia de 10 Ω, un condensador de 100 μF y una bobina de 200 mH a un generador de C.A. de 230 V, 50 Hz. Averigua I, U_R, U_C, U_L, P, Q, S, FP y dibuja el diagrama vectorial. ¿Qué tipo de reactancia predomina en el circuito?

13.8. El motor de un montacargas posee las siguientes características: P = 2 kW; U = 125 V; I = 22 A. Averigua el factor de potencia.

13.9. El alumbrado de una nave industrial consiste en 20 lámparas de vapor de mercurio de 500 W cada una con un factor de potencia de 0,6 a 230 V y 50 Hz. Averigua las características de la batería de condensadores para conseguir elevar el factor de potencia de la instalación hasta 0,95, así como la intensidad de corriente de la instalación antes y después de la corrección del factor de potencia.

13.10. Una lámpara fluorescente de 20 W, 230 V y 50 Hz posee un *FP* de 0,6. ¿Qué condensador habrá que conectar a la lámpara para que trabaje a un *FP* de 0,9?

13.11. Para que una lámpara incandescente de 125 V/60 W/ /50 Hz no se funda al conectarla a una red de 230 V, se conecta en serie con ella un condensador. Averigua las características del condensador.

13.12. Se conectan en serie las bobinas de dos contactores a 230 V, 50 Hz de las siguientes características: bobina número 1 (R = 20 Ω; L = 0,8 H); bobina número 2 (28 Ω; 0,6 H). Calcula la corriente que fluye por las bobinas, la tensión aplicada a cada una, el factor de potencia del conjunto, las potencias del conjunto y la capacidad del condensador que habrá que conectar en paralelo para conseguir corregir el *FP* del conjunto a 0,95.

13.13. Calcula la sección con la que habrá que instalar los conductores de la línea que conecta el contador de energía, situado en el cuarto de contadores, con el cuadro general de mando y protección, instalado en el interior de una vivienda. Para ello tendremos en cuenta los siguientes datos: vivienda situada en el quinto piso de un edificio; la longitud aproximada de la línea es de 25 m, los conductores son de cobre, unipolares, aislados con PVC e instalados bajo tubo empotrado en obra; la demanda de potencia máxima que se prevé es de 5.750 W a 230 V y con un cos φ = 0,8; la caída de tensión máxima que se admite es del 1 %.

13.14. Calcula la sección de una línea monofásica de 250 m que transmite la potencia de 5 kW a 230 V con un *FP* de 0,85. La caída de tensión máxima que se admite es del 5 %. La línea es de dos conductores de cobre unipolares aislados con XLPE e instalados bajo tubo empotrado en pared aislante. Calcula también la densidad de corriente.

© Ediciones Paraninfo

Actividades de evaluación resueltas

A continuación se dan los enunciados de una serie de actividades de evaluación. Estas actividades las podrás encontrar resueltas accediendo al MATERIAL WEB creado para este texto.

13.1. El circuito R-L-C de la Figura 13.41 se encuentra alimentado por una red de 220 V y 50 Hz, halla:

a) Intensidad de corriente que indica el amperímetro.

b) Potencia activa consumida por el circuito.

c) Modificando el valor del condensador variable, determina la capacidad para la cual la intensidad marcada por el amperímetro es máxima, y el valor de esta intensidad.

d) Factor de potencia que presenta el circuito cuando el amperímetro marca la intensidad máxima.

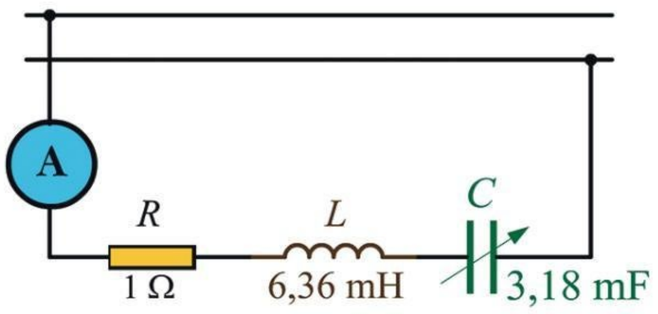


Figura 13.41.

13.2. El circuito de la Figura 13.42 se encuentra en régimen estacionario sinusoidal. Los voltímetros (ideales) indican los siguientes valores (eficaces): V_1 = 3 V, V_2 = = 4 V. Sabiendo que la tensión de la fuente tiene una frecuencia de 50 Hz, calcula:

a) Tomando como origen de fases la intensidad compleja *I*, dibuja un diagrama vectorial con las tensiones en los elementos del circuito (incluida la fuente).

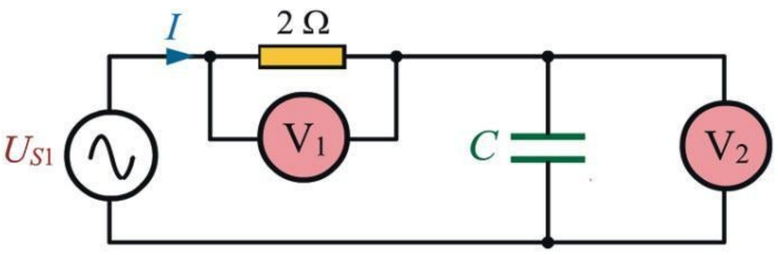


Figura 13.42.

b) Valor eficaz de la tensión de la fuente.

c) Capacidad del condensador.

13.3. El circuito de la Figura 13.43 se alimenta con una fuente de tensión de valor eficaz 100 V.

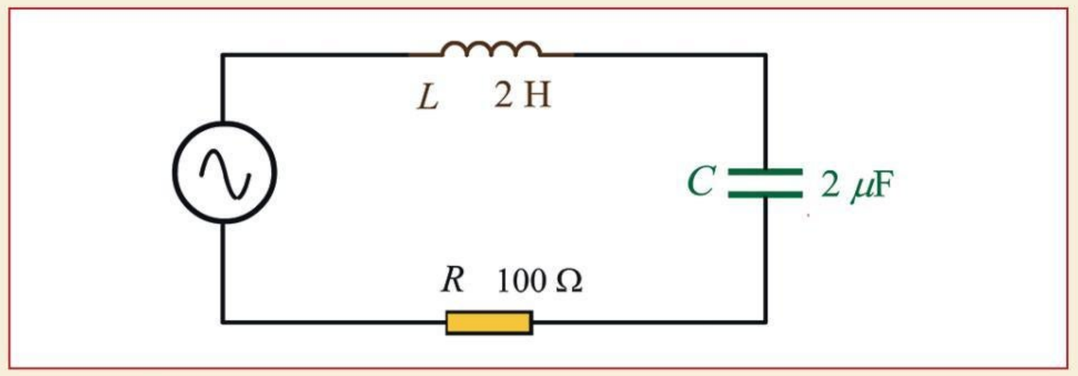


Figura 13.43.

a) Calcula el valor de la intensidad de corriente para los siguientes valores de pulsación (ω), 0 y 500 rad/s. Interpreta el comportamiento del circuito en ambos supuestos.

b) Representa en un esquema cómo ha de conectarse un vatímetro para medir la potencia consumida en la resistencia *R* y calcula el valor de la misma para una pulsación de 400 rad/s.

13.4. Mediante la conexión de unos condensadores se modifica el factor de potencia de una carga de 300 kW desde 0,65 en retraso a 0,9 en retraso. Calcula la potencia reactiva de los condensadores necesarios para obtener dicha modificación y el tanto por ciento en que disminuye la potencia aparente.

13.5. En la Figura 13.44 se muestra una fuente ideal de tensión continua *Us* en serie con una resistencia *Rs*, conectada a una carga resistiva *R*, a través del interruptor *S*. Se ha medido la tensión *U* con el interruptor abierto y resulta ser 10 V. A continuación, se ha cerrado el interruptor. En estas condiciones, la tensión *U* resulta 8 V y la intensidad *I* resulta 10 A. Halla:

a) Valores de *Rs* y *Us*.

b) Potencia absorbida por la carga.

c) Potencia cedida por la fuente ideal de tensión.

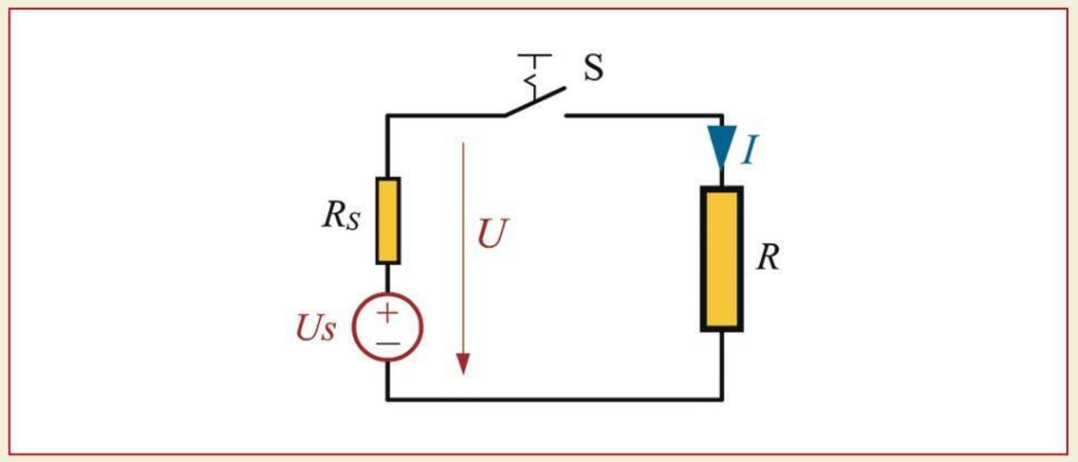


Figura 13.44.

© Ediciones Paraninfo

13.6. En el circuito eléctrico mostrado en la Figura 13.45, la tensión del generador es de 200 V eficaces. Si se desea que entre en resonancia para una pulsación de 1.000 rad/s. Determina:

a) El valor que debe tener la capacidad del condensador.

b) La tensión en bornes de cada elemento del circuito y potencia que suministra el generador.

c) El diagrama vectorial de tensiones e intensidad.

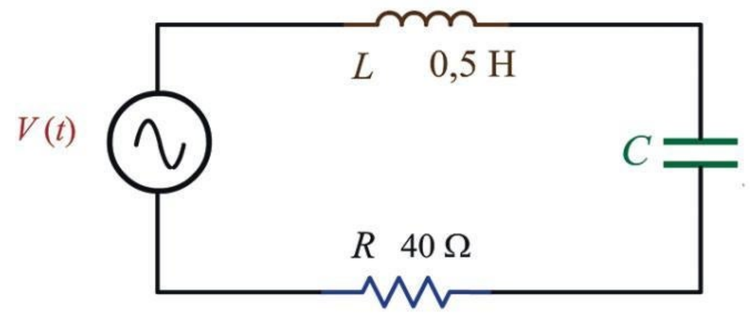


Figura 13.45.

13.7. Se conecta a una línea monofásica de 230 V, 50 Hz, una resistencia óhmica de 1.000 W en serie con una impedancia. El conjunto absorbe 11,5 A y tiene un factor de potencia de 0,45 inductivo. Para mejorar el factor de potencia se instala, en paralelo con el conjunto anterior, un condensador de 85 μF. Determina:

a) La potencia activa suministrada por la línea antes de instalar el condensador.

b) La potencia activa que absorbe la impedancia.

c) La intensidad que suministra la línea después de instalado el condensador y el nuevo factor de potencia de la instalación.

13.8. Una impedancia, formada por una resistencia de 10 Ω en serie con una inductancia de 16 mH, se alimenta mediante una fuente de tensión de alterna de 230 V y 50 Hz. Representa en un diagrama vectorial la tensión de la fuente, la intensidad en la impedancia, la tensión en la resistencia y la tensión en la inductancia.

13.9. En la red de la Figura 13.46, son: $f = 50$ Hz, $X_L = 10\ \Omega$; $X_C = 20\ \Omega$, siendo la potencia consumida por R de 1.000 W, y la lectura del voltímetro V de 100 V. Calcula:

a) Los valores de E y R.

b) Aproximadamente a escala, el diagrama vectorial de tensiones, tomando la intensidad I en el origen de fases.

Manteniendo constante el valor de E hallado en el apartado a) se duplica el valor de su frecuencia. En estas condiciones, calcula:

c) La potencia aparente compleja consumida por la red.

d) La lectura del voltímetro V.

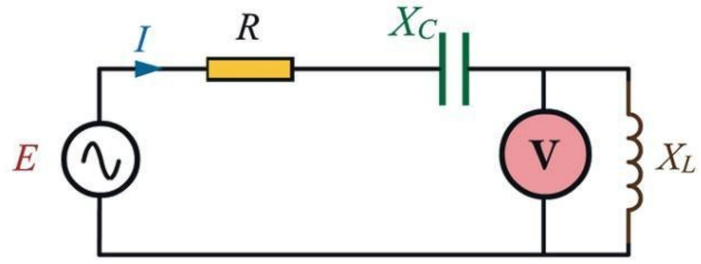


Figura 13.46.

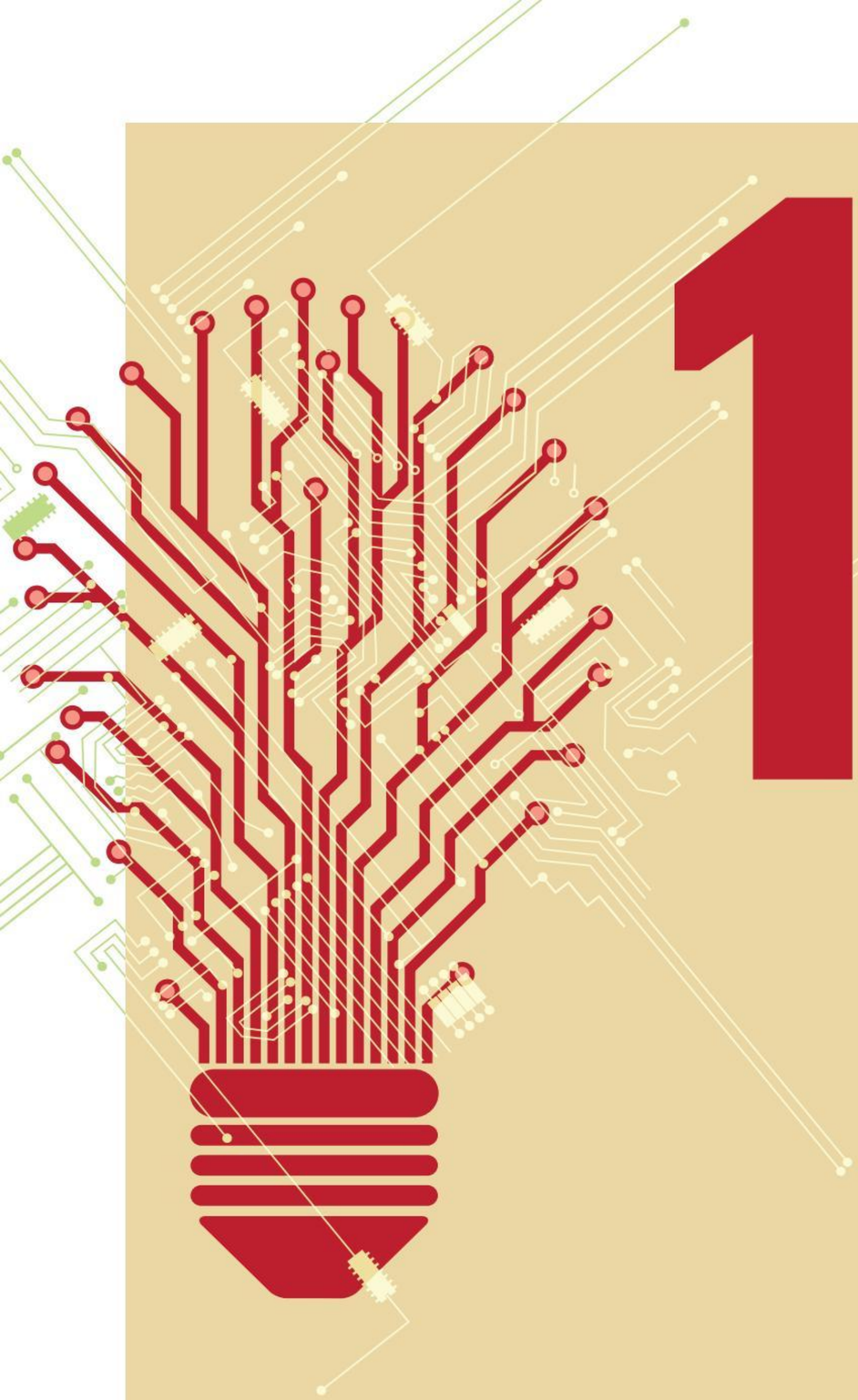
Actividades de ampliación

13.1. Con el fin de conseguir una mayor profundización en la materia, se han incluido los enunciados de una serie de ***«actividades de evaluación propuestas de ampliación (13)»*** para esta unidad que podrás encontrar dentro del MATERIAL WEB elaborado para este texto. Selecciona alguna de estas actividades y encuentra su solución.

13.2. Busca en internet catálogos comerciales sobre condensadores y baterías automáticas de condensadores para la mejora del factor de potencia. Observa sus características y haz una relación con las actividades realizadas en esta unidad.

© Ediciones Paraninfo

14 Resolución de circuitos paralelos y mixtos en C.A.



Contenidos

- **14.1.** Acoplamiento de receptores en paralelo en C.A.
- **14.2.** Instalaciones monofásicas de varios receptores
- **14.3.** Resolución de circuitos de C.A. mediante el cálculo vectorial con números complejos
- **14.4.** Circuitos oscilantes

La característica fundamental en los sistemas donde conectamos los receptores en paralelo es que estos quedan sometidos a la misma tensión. Esta forma de conexión es la que se utiliza cuando se conectan varios receptores a una línea eléctrica en una instalación eléctrica.

Para el cálculo de circuitos mixtos utilizaremos el cálculo vectorial con números complejos, que, como ya veremos más adelante, consiste en tratar las impedancias, tensiones y corrientes como vectores representados por un número complejo. Por lo demás, la resolución de estos circuitos es similar a la de los ya estudiados en C.C.

Objetivos

- Resolver problemas prácticos de instalaciones eléctricas con redes monofásicas de C.A.; cálculo de protecciones, sección de conductores, etcétera.
- Calcular las magnitudes eléctricas en circuitos paralelos y mixtos de C.A.
- Interpretar los procesos que se dan en un circuito resonante.

14.1. Acoplamiento de receptores en paralelo en C.A.

La característica fundamental en los sistemas donde conectamos los receptores en paralelo es que estos quedan sometidos a la misma tensión. En la Figura 14.1 se muestra un circuito donde se ha conectado una rama R -C en paralelo con una rama R -L.

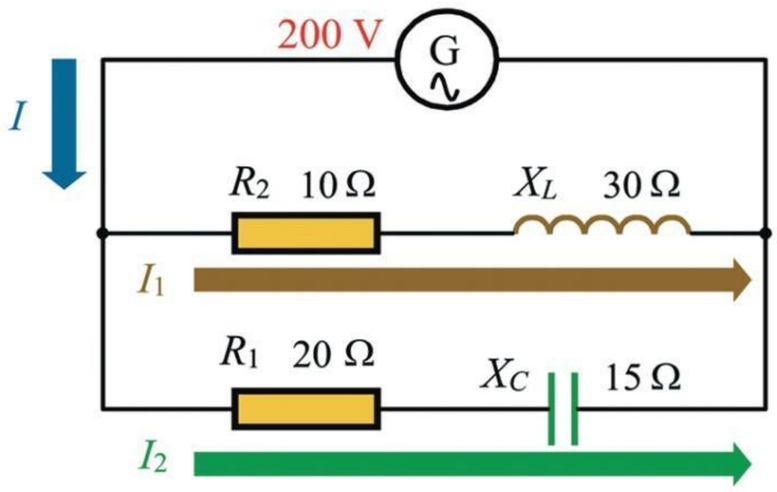


Figura 14.1. Acoplamiento de receptores en paralelo en C.A.

Para resolver este circuito, en el diagrama vectorial (Figura 14.2), se toma como referencia la tensión U en común con las dos ramas y se calculan por separado las intensidades I_1 e I_2 de cada circuito derivado. La intensidad total I que debe suministrar el generador al circuito se obtiene de la suma vectorial de ambas intensidades:

$$I_1 = U/Z_1 \qquad I_2 = U/Z_2 \qquad \vec{I} = \vec{I}_1 + \vec{I}_2$$

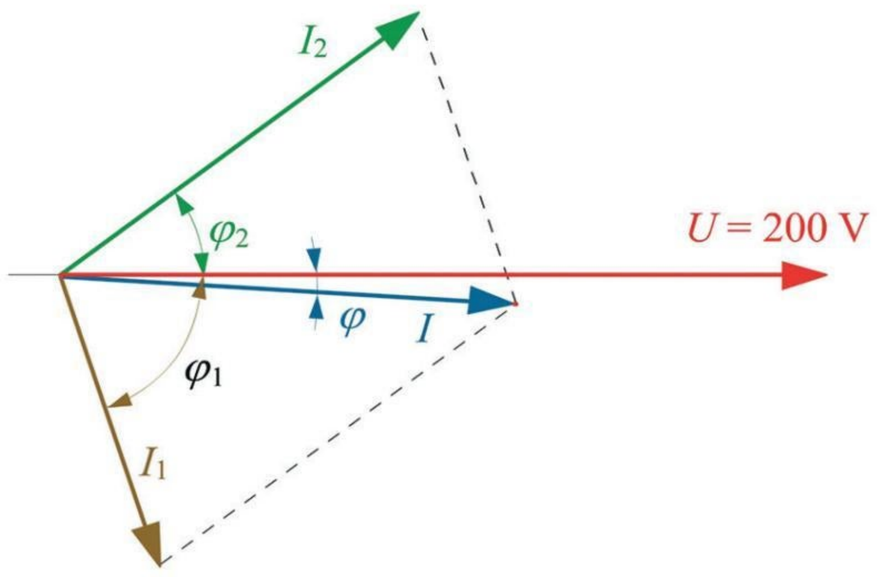


Figura 14.2. Diagrama vectorial del circuito de la Figura 14.1.

La resolución de este tipo de circuitos se complica todavía mucho más cuando se interconectan receptores en forma mixta. Por esta razón vamos a utilizar los números complejos para resolver estos ejercicios. Los números complejos, que estudiaremos en siguientes apartados, se comportan como vectores. Las operaciones básicas de suma, multiplicación y división de estos números simplifica enormemente los cálculos de este tipo de circuitos.

Seguidamente estudiaremos un caso particular y de carácter práctico de receptores acoplados en paralelo, en el que la resolución vendrá dada por el método de la suma de potencias.

14.2. Instalaciones monofásicas de varios receptores

En este caso se trata de calcular la potencia total instalada, el factor de potencia y la intensidad total de una instalación monofásica en la que se conectan varias cargas de potencia activa y *FP* conocidos, como por ejemplo en la instalación de la Figura 14.3.

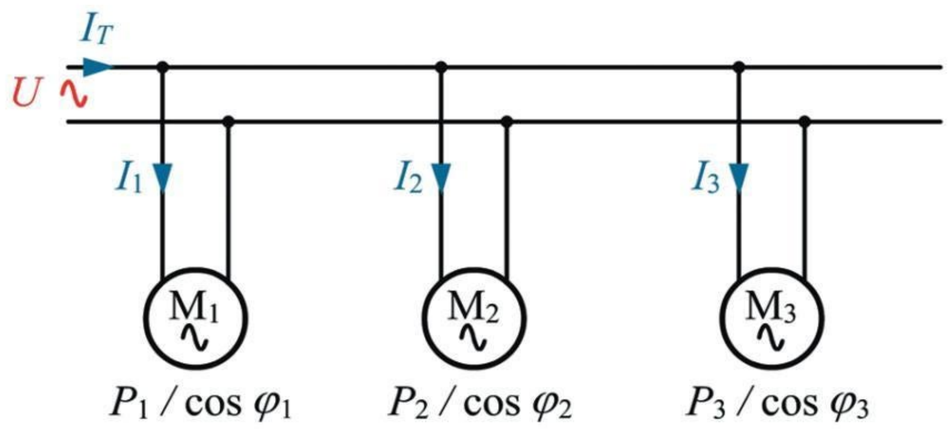


Figura 14.3. Instalaciones monofásicas de varios receptores.

El principal problema para resolver estos circuitos está en encontrar el factor de potencia total para el conjunto de los receptores. Para resolver estos circuitos basta con averiguar la potencia activa y reactiva de cada uno de los receptores. Seguidamente, se dibuja el triángulo de potencias de cada una de las cargas y se procede a la suma vectorial de las potencias, tal como se muestra en la Figura 14.4.

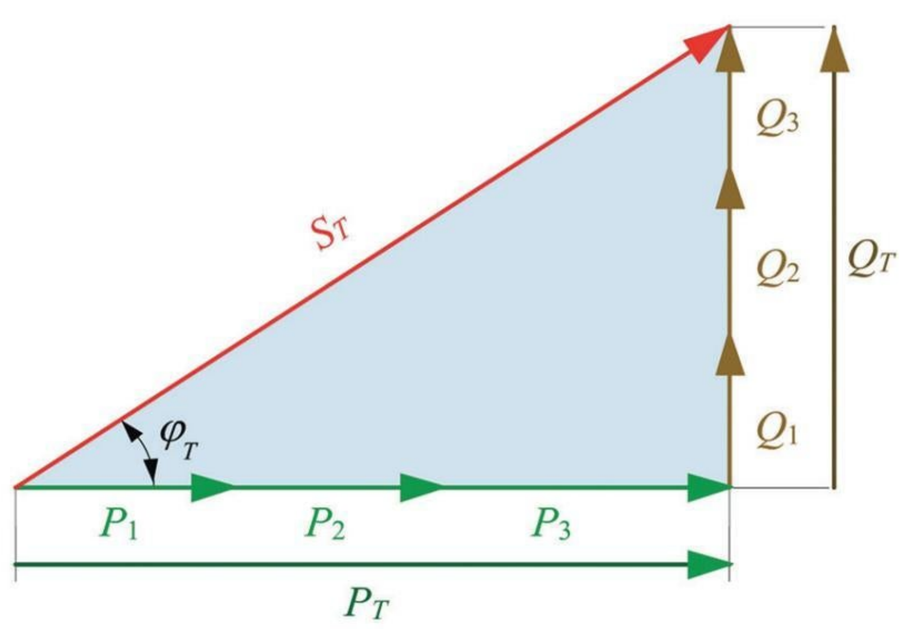


Figura 14.4. Suma vectorial de potencias.

De esta suma se obtiene el triángulo de potencias correspondiente a la potencia total, donde se cumple que:

$$Q_T = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

© Ediciones Paraninfo

(Si hubiese una carga de carácter capacitivo su potencia reactiva se restaría a las de carácter inductivo.)

$$P_T = P_1 + P_2 + P_3$$

$$S_T = \sqrt{P_T^2 + Q_T^2}$$

$$\cos \varphi_T = \frac{P_T}{S_T}$$

Actividad resuelta 14.1

La instalación eléctrica de una nave industrial consta de los siguientes receptores, conectados a una línea monofásica de 400 V, 50 Hz: (1) motor monofásico de 10 kW, cos $\varphi = 0{,}7$; (2) 30 lámparas incandescentes de 60 W cada una; (3) 50 lámparas de vapor de mercurio de 200 W, cos $\varphi = 0{,}6$ cada una (Figura 14.5).

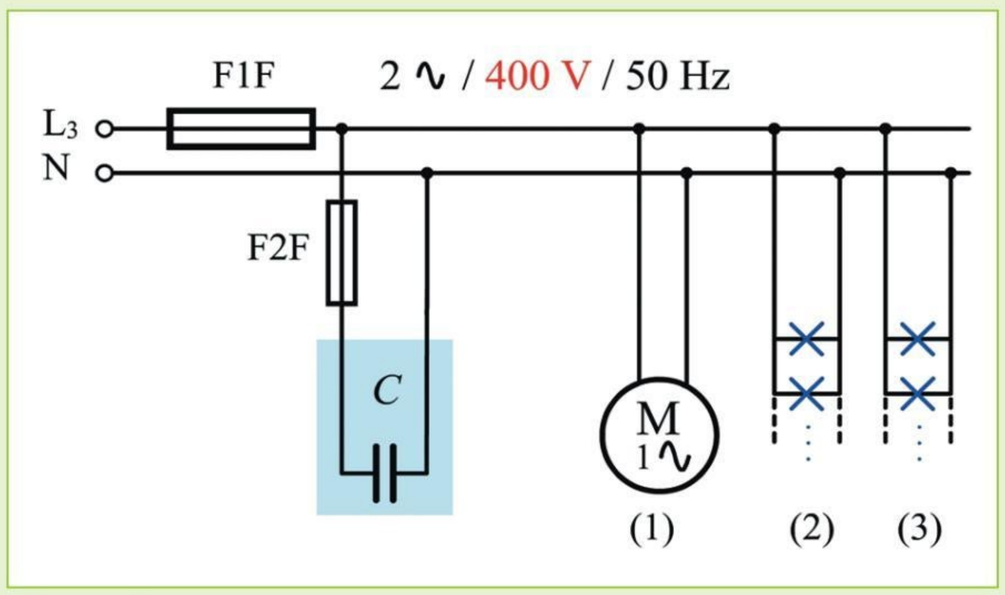


Figura 14.5.

Averigua: **a)** potencia total de la instalación y *FP*; **b)** intensidad de corriente por la línea general; **c)** sección de los conductores, teniendo en cuenta que la línea consta de dos conductores unipolares de PVC instalados bajo tubo empotrado en paredes aislantes; **d)** características de la batería de condensadores para corregir el *FP* hasta 0,95; **e)** calibre de los fusibles de la batería de condensadores; **f)** porcentaje de reducción de la intensidad de corriente por la línea principal al conectar la batería de condensadores.

Solución:

(1) Determinamos primero la potencia reactiva del motor:

Según el triángulo de potencias (Figura 14.6):

$$Q_1 = P_1 \operatorname{tg} \varphi_1 = 10.000 \cdot \operatorname{tg} 45{,}57° = 10.202 \text{ VAR}$$

$$\varphi_1 = \arccos 0{,}7 = 45{,}57°$$

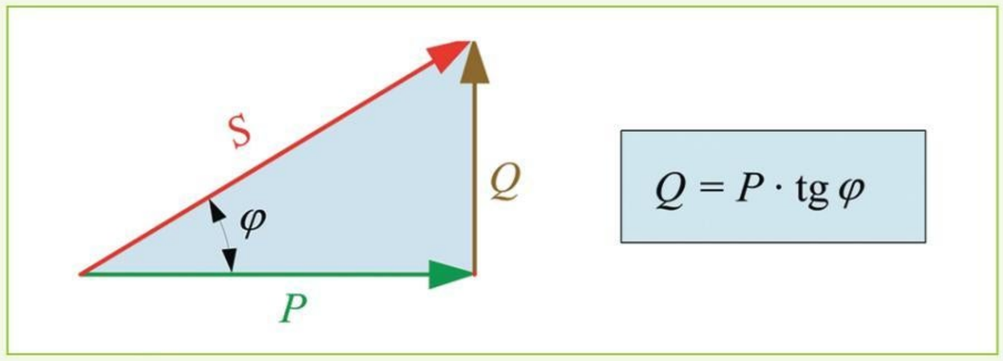


Figura 14.6.

(2) Hacemos lo mismo para las lámparas incandescentes:

$$P_2 = 30 \cdot 60 \text{ W} = 1.800 \text{ W}$$

$Q_2 = 0$ VAR (las lámparas incandescentes poseen una carga resistiva pura y no producen potencia reactiva; su factor de potencia es igual a la unidad).

(3) Las lámparas de vapor de mercurio poseen una reactancia para el arranque y sí producen potencia reactiva.

$$P_3 = 50 \cdot 200 \text{ W} = 10.000 \text{ W}$$

$$Q_3 = P_3 \operatorname{tg} \varphi_3 = 10.000 \cdot \operatorname{tg} 53{,}13° = 13.333 \text{ VAR}$$

$$\varphi_3 = \arccos 0{,}6 = 53{,}13°$$

Ahora sumamos las potencias:

$$P_T = P_1 + P_2 + P_3 = 10.000 + 1.800 + 10.000 = 21.800 \text{ W}$$

$$Q_T = Q_1 + Q_2 + Q_3 = 10.202 + 0 + 13.333 = 23.535 \text{ VAR}$$

$$S_T = \sqrt{P_T^2 + Q_T^2} = \sqrt{21.800^2 + 23.535^2} = 32.080 \text{ VA}$$

$$\cos \varphi_T = \frac{P_T}{S_T} = \frac{21.800}{32.080} = 0{,}68$$

$$I_T = \frac{P_T}{U \cdot \cos \varphi_T} = \frac{21.800}{400 \cdot 0{,}68} = 80 \text{ A}$$

a) Potencia instalada: 32,08 kVA; FP = 0,68.

b) Intensidad por la línea general = 80 A.

c) Sección de los conductores de la línea general: 35 mm^2 (para este cálculo solo se ha tenido en cuenta la $I_{\text{máx. adm.}}$, que según recomendaciones del REBT es de 86 A para dos conductores de PVC y de 35 mm^2 instalados bajo tubo empotrado en obra).

Calculamos ahora la batería de condensadores:

$$Q_C = P_T (\operatorname{tg} \varphi_T - \operatorname{tg} \varphi'_T) =$$

$$= 21.800 \cdot (\operatorname{tg} 47{,}16° - \operatorname{tg} 18{,}19°) = 16.346 \text{ VAR}$$

$$\varphi_T = \arccos 0{,}68 = 47{,}16°$$

$$\varphi'_T = \arccos 0{,}95 = 18{,}19°$$

$$Q_C = U_C I_C \Rightarrow I_C = \ldots = \ldots = 41 \text{ A}$$

$$I_C = \frac{U_C}{X_C} \Rightarrow X_C = \ldots = \ldots = 9{,}76\ \Omega$$

$$C = \ldots = \ldots = 326\ \mu\text{F}$$

Batería de condensadores: (16,3 kVAR, 326 μF, 400 V).

© Ediciones Paraninfo

e) Calibre de los fusibles de los condensadores:

$$1{,}8 \cdot 41 = 73{,}8 \text{ A} \Rightarrow (80 \text{ A})$$

Nota: Según el Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión (ITC-BT 48): «los aparatos de mando y protección de los condensadores deberán soportar en régimen permanente, de 1,5 a 1,8 veces la intensidad nominal asignada del condensador, a fin de tener en cuenta los armónicos y las tolerancias sobre las capacidades»; de esta forma evitaremos la fusión intempestiva de los fusibles en la conexión (al conectarse los condensadores a la red, aparece una corriente de carga muy brusca que puede fundir los fusibles).

Consulta en el REBT la Instrucción Técnica ITC-BT 48 sobre Instalaciones Interiores o Receptoras.

f) Intensidad con la batería de condensadores conectada:

$$P_T = UI'_T \cos \varphi'_T \Rightarrow I'_T = \ldots = \ldots = 57 \text{ A}$$

Porcentaje de reducción de la corriente:

$$\frac{80 - 57}{80} \cdot 100 = 28{,}8\ \%$$

Actividad propuesta 14.1

La instalación eléctrica de una cafetería consta de los siguientes receptores, conectados a una línea monofásica de 230 V, 50 Hz: (1) lavavajillas de 5 kW, cos $\varphi = 0{,}8$; (2) 20 lámparas incandescentes de 25 W cada una; (3) 100 lámparas fluorescentes de 40 W, cos = 0,6 cada una, y (4) horno monofásico con una resistencia de caldeo de 25 ohmios.

Averigua: **a)** potencia total de la instalación y *FP*; **b)** intensidad de corriente por la línea general; **c)** sección de los conductores, teniendo en cuenta que la línea consta de cable multiconductor de 2xXLPE de 30 metros de longitud instalado bajo tubo en montaje superficial y se admite una caída máxima de tensión del 1,5 % (realiza el cálculo para la intensidad antes de corregir el *FP*); **d)** características de la batería de condensadores para corregir el *FP* hasta 0,95; **e)** calibre de los fusibles de la batería de condensadores; **f)** porcentaje de reducción de la intensidad de corriente por la línea principal al conectar la batería de condensadores.

La solución a esta Actividad propuesta la puedes encontrar dentro del MATERIAL WEB elaborado para este texto.

14.3. Resolución de circuitos de C.A. mediante el cálculo vectorial con números complejos

Mediante la utilización de los números complejos podremos resolver, sin dificultad, circuitos en los que aparecen combinaciones de circuitos en serie y paralelo, como por ejemplo el circuito de la Figura 14.7.

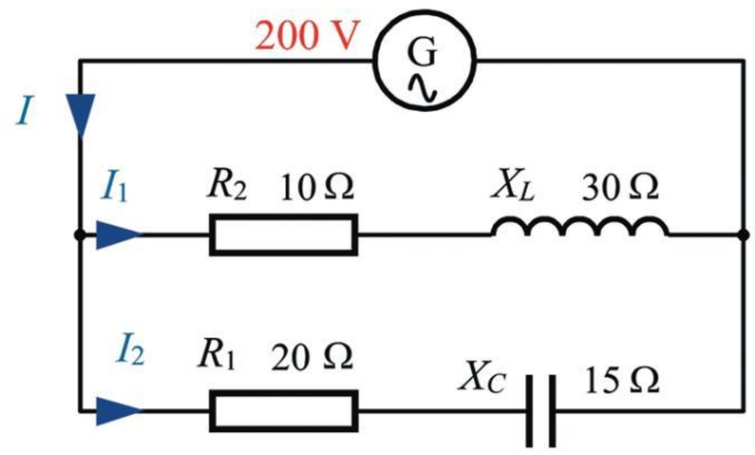


Figura 14.7.

Un número complejo puede representar un vector en un sistema cartesiano. Como todas las magnitudes en C.A. se pueden trazar como vectores, si aprendemos a operar con los números complejos, podremos resolver los circuitos de C.A. aplicando los mismos métodos que para C.C.; en vez de utilizar números reales en las operaciones utilizaremos números complejos.

Los números complejos, como por ejemplo $a + jb$, constan de una parte real (a) y una parte imaginaria (b) (Figura 14.8).

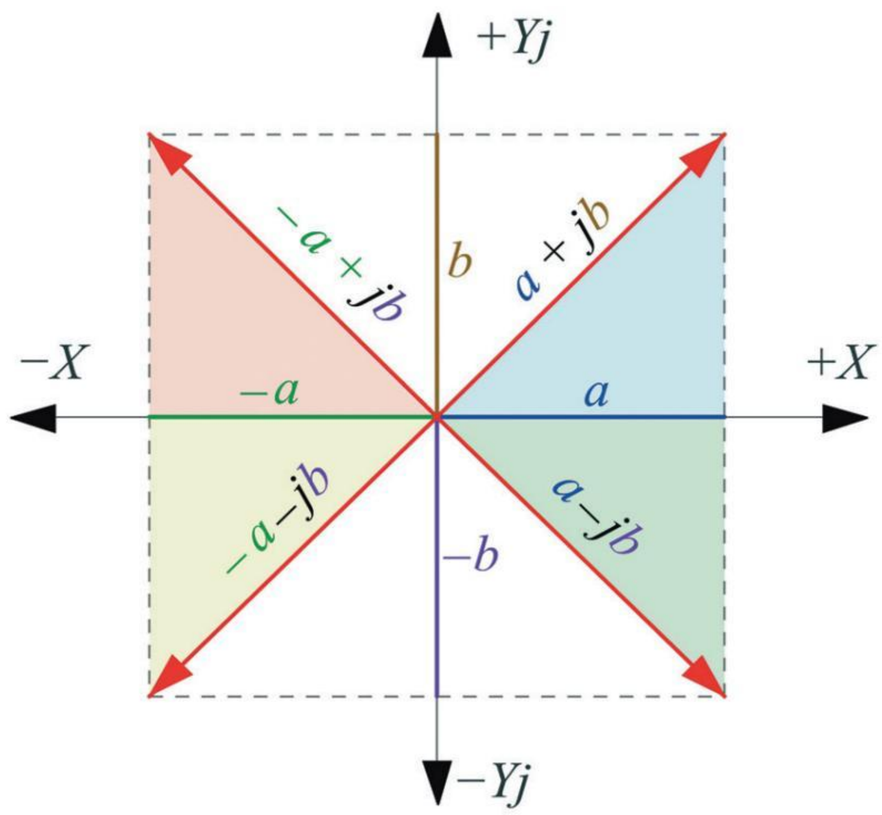


Figura 14.8. Representación vectorial de un número complejo.

Los números reales positivos se representan sobre la derecha del eje (x), y los negativos a la izquierda de este mismo eje.

© Ediciones Paraninfo

Los números imaginarios positivos se representan sobre la parte superior del eje (y), y los negativos en su parte inferior.

Los números imaginarios representan a la raíz cuadrada de los números negativos: $j = \sqrt{-1}$

De esta forma tenemos que: $j \cdot j = -1$.

14.3.1. Representación de un número complejo

Sea, por ejemplo, el circuito serie R-L de la Figura 14.9, del cual se quiere determinar su impedancia en forma compleja.

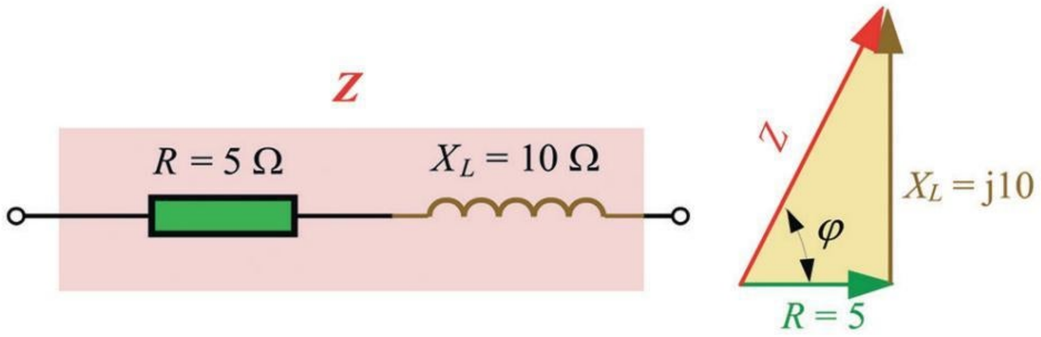


Figura 14.9.

Su representación en forma **algebraica** sería:

$$Z = a + jb = 5 + j10;\ R = \text{es la parte real} = 5$$

$$X_L = \text{es la parte positiva imaginaria} = j\ 10$$

Su representación **módulo argumental** o **polar** sería:

$Z = m \angle \varphi$, donde m es el módulo y φ el ángulo o argumento (Figura 14.10).

$$m = \sqrt{a^2 + b^2}$$

$$\varphi = \text{arc tg}\ \frac{b}{a}$$

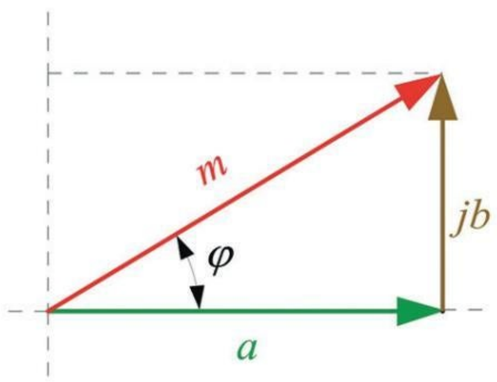


Figura 14.10. Representación de un número complejo.

En nuestro ejemplo, la impedancia Z sería:

$$m = \sqrt{5^2 + 10^2} = 11{,}18\ \Omega$$

$$\varphi = \text{arc tg}\ 10 = 63{,}4^\circ$$

$$Z = 11{,}18 \angle 63{,}4^\circ$$

Actividad resuelta 14.2

Representa en forma algebraica y en forma módulo argumental la impedancia del circuito R-C de la Figura 14.11.

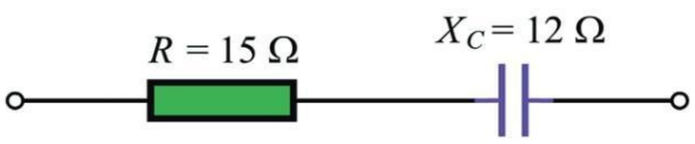


Figura 14.11.

Solución:

Primero dibujamos el triángulo de impedancias (Figura 14.12).

$$Z = 15 - j12$$

R = parte real = 15

X_C = parte imaginaria negativa = $-j12$

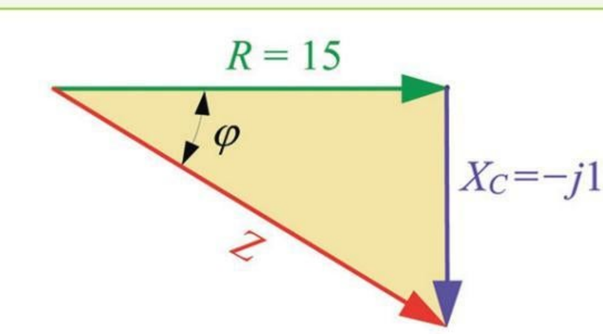


Figura 14.12.

La representación en forma polar quedaría así:

$$m = \sqrt{15^2 + 12^2} = 19{,}2\ \Omega;\ \ \varphi = \text{arc tg}\ \frac{-12}{15} = -38{,}7^\circ$$

$$Z = 19{,}2 \angle -38{,}7^\circ$$

Para transformar un número complejo de forma polar a forma algebraica operaremos de la siguiente forma:

$$Z = m \angle \varphi = m(\cos \varphi + j\ \text{sen}\ \varphi) = a + jb$$

14.3.2. Operaciones con números complejos

Antes de pasar a la resolución de circuitos eléctricos, nos será muy útil repasar las operaciones básicas con números complejos.

Suma: de la suma de dos números complejos se obtiene otro número complejo, que tiene por parte real la suma de las partes reales y por parte imaginaria la suma de las partes imaginarias. Por ejemplo:

$$(5 + j\ 10) + (15 - j12) = (5 + 15) + j(10 - 12) = 20 - j2$$

La forma algebraica es la única forma práctica de sumar y restar.

© Ediciones Paraninfo

Producto: para la forma **algebraica,** el resultado es otro número complejo que se obtiene utilizando las reglas habituales del álgebra junto con las reglas correspondientes de los números imaginarios. Por ejemplo:

$$(4 + j\,5) \cdot (3 + j\,2) = 4 \cdot 3 + 4 \cdot j2 + j5 \cdot 3 + j5 \cdot j2 =$$

$$= 12 + j8 + j15 - 10 = 2 + j23$$

Para la forma **polar,** el resultado es otro número complejo, cuyo módulo se obtiene multiplicando los módulos y el ángulo mediante la suma de los ángulos. Por ejemplo:

$$4 \angle 30^\circ \cdot 5 \angle 25^\circ = 4 \cdot 5 \angle (30 + 25)^\circ = 20 \angle 55^\circ$$

Cociente: para la forma **algebraica,** el resultado se obtiene multiplicando el numerador y el denominador por el conjugado del denominador; de esta forma se consigue transformar este último en un número real, para posteriormente llevar a cabo el cociente de la manera algebraica habitual.

NOTA

El conjugado de un número complejo se consigue invirtiendo el signo de la parte imaginaria. Así, por ejemplo, el conjugado de $7 + j\,9$ será $7 - j\,9$.

Al multiplicar un número complejo por su conjugado, se obtiene un número real, y su valor es la suma de los cuadrados de la parte real e imaginaria. Por ejemplo:

$$(7 + j9) \cdot (7 - j9) = 7^2 - j63 + j63 + 9^2 = 7^2 + 9^2 = 130$$

Veamos un ejemplo de cociente:

$$\frac{4 + j5}{2 + j3} = \frac{(2 - j3) \cdot (4 + j5)}{(2 - j3) \cdot (2 + j3)} = \frac{23 - j2}{2^2 + 3^2} = \frac{23 - j2}{13} =$$

$$= 1{,}77 - j0{,}15$$

Para la forma **polar,** el resultado es otro número complejo, cuyo módulo se obtiene del cociente de los módulos y el ángulo mediante la resta de los ángulos. Por ejemplo:

$$\frac{20 \angle 80^\circ}{5 \angle 60^\circ} = \frac{20}{5} \angle (80 - 60)^\circ = 4 \angle 20^\circ$$

NOTA

En la actualidad, algunas calculadoras científicas nos brindan la posibilidad de operar con números complejos de forma rápida y sencilla. Estudia las instrucciones de tu calculadora e intenta realizar operaciones con números complejos.

14.3.3. Aplicación de los números complejos a la resolución de circuitos

Como ya hemos visto en los ejemplos utilizados, la impedancia Z de un circuito se escribe como un número imaginario, que tiene por parte real el valor óhmico de la resistencia R, y por parte imaginaria el valor de la reactancia X, siendo esta positiva para las inductivas puras y negativa para las capacitivas (Figura 14.13).

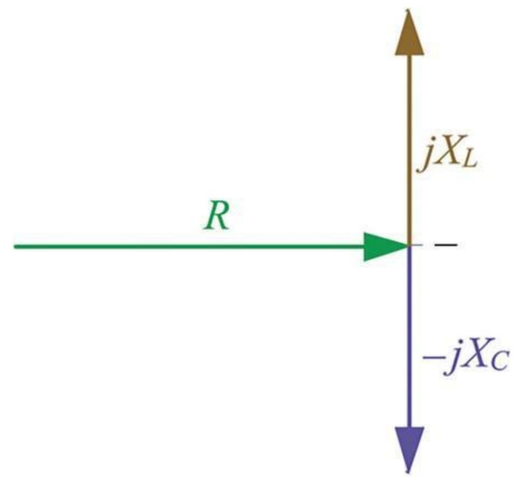


Figura 14.13. Valor complejo de las impedancias de un circuito.

Como la impedancia es una cantidad compleja, se puede expresar en forma algebraica y en forma polar:

$$Z = R + jX = \sqrt{R^2 + X^2} \angle \text{ arc tg } X/R$$

Los acoplamientos en serie y paralelo en C.A. se resuelven utilizando los mismos procedimientos que para C.C., teniendo en cuenta que en todas las operaciones utilizaremos números complejos.

Impedancias en serie (Figura 14.14):

$$\vec{Z}_T = \vec{Z}_1 + \vec{Z}_2 + \vec{Z}_3$$

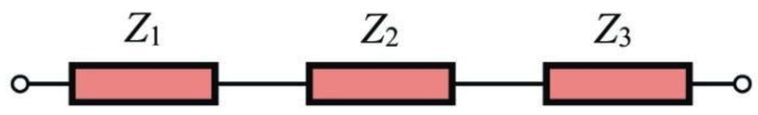


Figura 14.14.

Impedancias en paralelo (Figura 14.15):

$$\frac{1}{\vec{Z}_T} = \frac{1}{\vec{Z}_1} + \frac{1}{\vec{Z}_2} + \frac{1}{\vec{Z}_3}$$

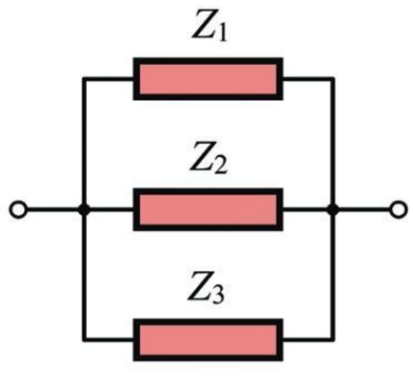


Figura 14.15.

© Ediciones Paraninfo

Actividad resuelta 14.3

Del circuito serie R-L-C de la Figura 14.16, averigua la impedancia, la intensidad, el ángulo de desfase y las potencias.

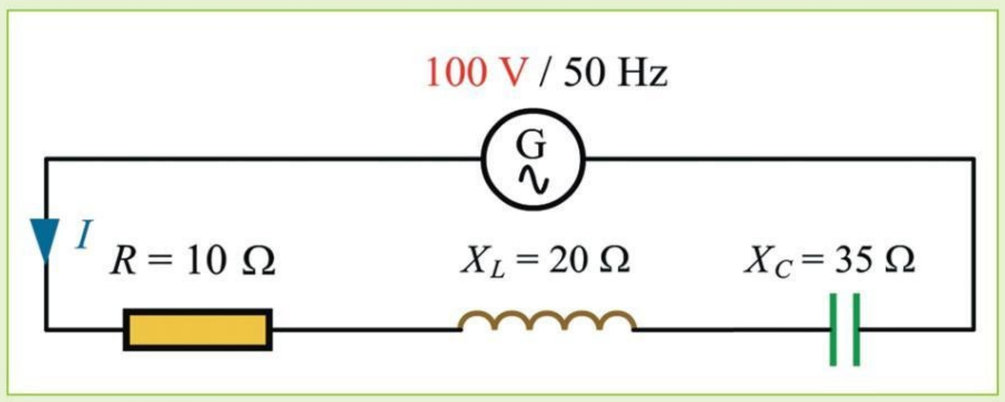


Figura 14.16.

Solución:

La impedancia equivalente o total en forma algebraica será:

$$Z = 10 + j20 - j35 = 10 - j15$$

(Esta expresión nos indica que la impedancia equivalente consta de una resistencia de 10 Ω en serie con un condensador de 15 Ω de reactancia capacitiva.)

Pasamos la impedancia a forma polar:

$$Z = \sqrt{10^2 + 15^2} \angle \text{ arc tg } (-15/10) = 18 \angle -56{,}3°$$

(Esta expresión indica que el valor modular de la impedancia es de 18 Ω y que el ángulo φ es de –56,3°; Figura 14.17.)

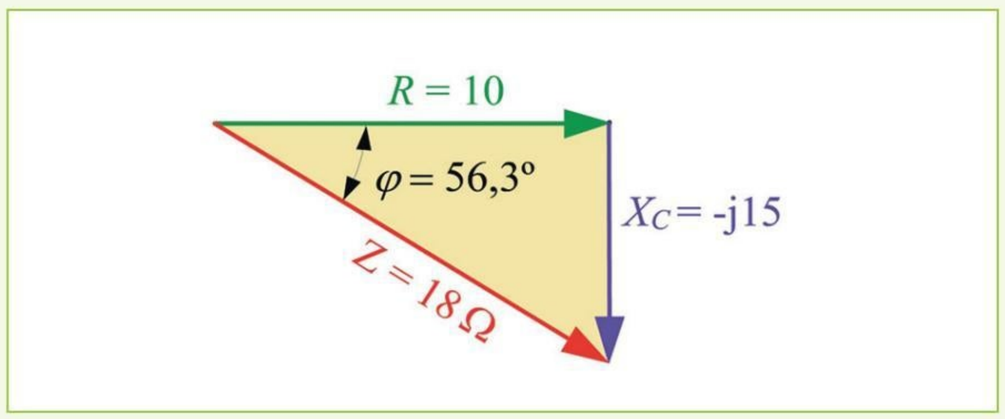


Figura 14.17.

La corriente la determinamos mediante la ley de Ohm:

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{100 \angle 0°}{18 \angle -56{,}3°} = 5{,}6 \angle 56{,}3°$$

(Esta expresión indica que el valor modular de la corriente es de 5,6 A y que la corriente va adelantada un ángulo φ de 56,3° respecto de la tensión aplicada, como corresponde a un circuito capacitivo.)

Calculamos ahora la potencia del sistema aplicando las expresiones habituales:

$$P = UI \cos \varphi = 100 \cdot 5{,}6 \cdot \cos 56{,}3 = 311 \text{ W}$$

$$Q = UI \text{ sen } \varphi = 100 \cdot 5{,}6 \cdot \text{sen } 56{,}3 = 466 \text{ VAR}$$

$$S = UI = 100 \cdot 5{,}6 = 560 \text{ VA}$$

Para dibujar el diagrama vectorial bastará con representar en el sistema cartesiano los vectores *U* e *I* en su forma polar (Figura 14.18).

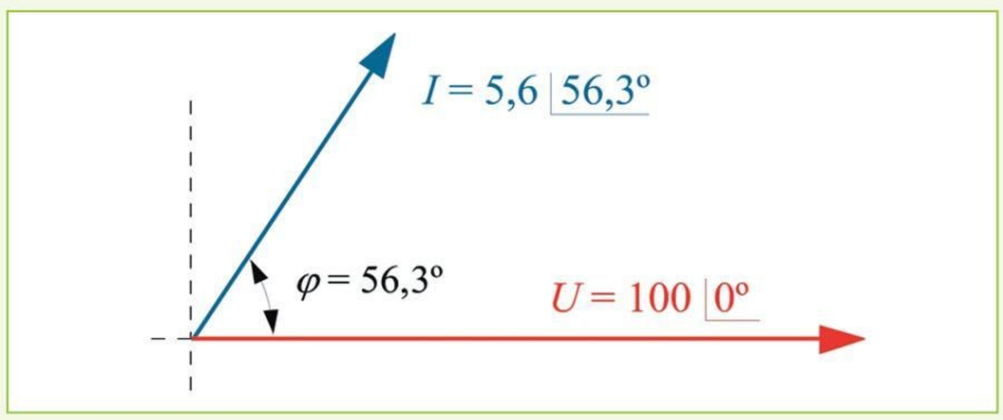


Figura 14.18.

Actividad resuelta 14.4

Resolvamos ahora el circuito de la Figura 14.19 planteado al principio de este apartado:

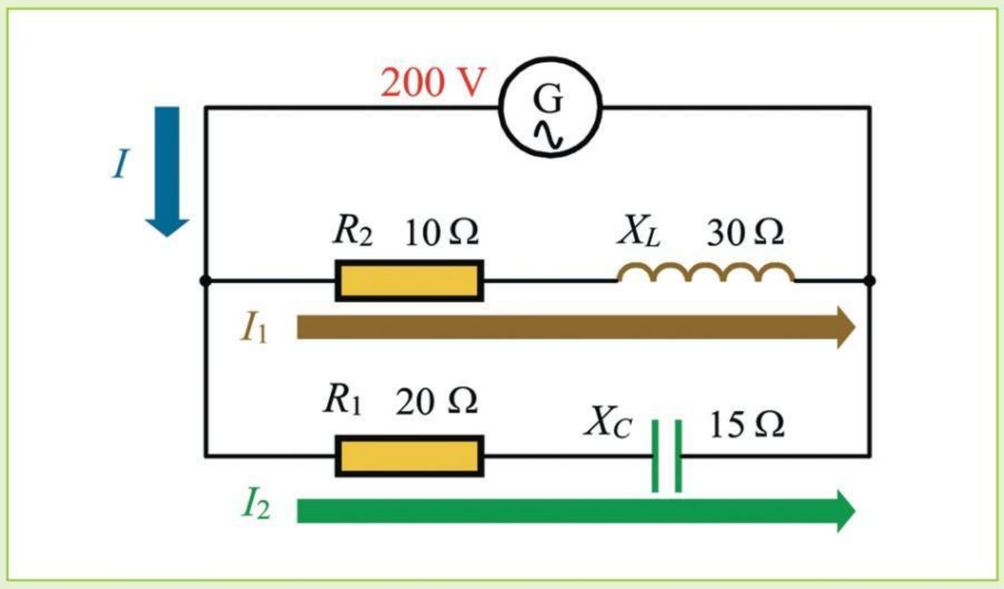


Figura 14.19.

Averigua I_T, I_1, I_2, P_T, Q_T, S_T, cos φ_T y la lectura de un voltímetro conectado en paralelo con la reactancia X_C.

Solución:

Calculamos primero la impedancia equivalente del circuito. A la impedancia resultante de cada una de las ramas la llamaremos:

$$Z_1 = R_1 + jX_L = 10 + j30$$

$$Z_2 = R_2 - jX_C = 20 - j15$$

Estas impedancias están, a su vez, conectadas en paralelo. Como son solo dos cargas podremos aplicar la expresión:

$$Z_T = \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{(10 + j30) \cdot (20 - j15)}{10 + j30 + 20 - j15} =$$

$$= \frac{650 + j450}{30 + j15} = \frac{(30 - j15) \cdot (650 + j450)}{30^2 + 15^2} =$$

$$= 23{,}3 + j3{,}33$$

© Ediciones Paraninfo

¿De qué carácter es la impedancia, inductiva o capacitiva?

Aplicando la ley de Ohm calculamos ahora las intensidades del circuito:

$$I_T = \frac{U}{Z_T} = \frac{200}{23{,}3 + j3{,}33} = \ldots = 8{,}4 - j1{,}2 = 8{,}5 \angle -8{,}1°$$

(La intensidad total es de 8,5 A y está retrasada un ángulo $\varphi = 8{,}1°$ respecto a la tensión, como corresponde a los circuitos inductivos).

$$I_1 = \frac{U}{Z_1} = \frac{200}{10 + j30} = \ldots = 2 - j6 = 6{,}3 \angle -71{,}6°$$

$$I_2 = \frac{U}{Z_2} = \frac{200}{20 - j15} = \ldots = 6{,}4 + j4{,}8 = 8 \angle 36{,}9°$$

Comprueba si se cumple la primera ley de Kirchhoff:

$$\vec{I}_T = \vec{I}_1 + \vec{I}_2 = \ldots$$

La lectura del voltímetro se calcula aplicando la ley de Ohm entre los extremos de la carga donde está conectado:

$$U = X_C I_2 = 15 \angle -90° \cdot 8 \angle 36{,}9° = 120 \angle -53{,}1°$$

(La lectura del voltímetro será de 120 V y su ángulo de desfase respecto a la tensión principal de –53,1°).

Habrás podido comprobar que, para operar los números complejos, unas veces utilizamos la forma algebraica y otras la polar. Cualquiera de estas dos formas es válida para resolver los problemas que se nos planteen, teniendo en cuenta que:

- Para operaciones de suma solo se puede utilizar la forma algebraica compleja.
- Para presentar los resultados en amperios, ohmios y voltios, con sus correspondientes ángulos de desfases, es más conveniente la forma polar.

Calculemos ahora las potencias del circuito:

$$P = UI \cos \varphi = 200 \cdot 8{,}5 \cdot \cos 8{,}1° = 1.683 \text{ W}$$

$$Q = UI \operatorname{sen} \varphi = 200 \cdot 8{,}5 \cdot \operatorname{sen} 8{,}1° = 240 \text{ VAR}$$

$$S = UI = 200 \cdot 8{,}5 = 1.700 \text{ VA}$$

$$FP = \cos \varphi = 0{,}99$$

Por último, situamos cada una de las magnitudes en el diagrama vectorial, fijándonos para ello en la forma polar de aquellas (Figura 14.20).

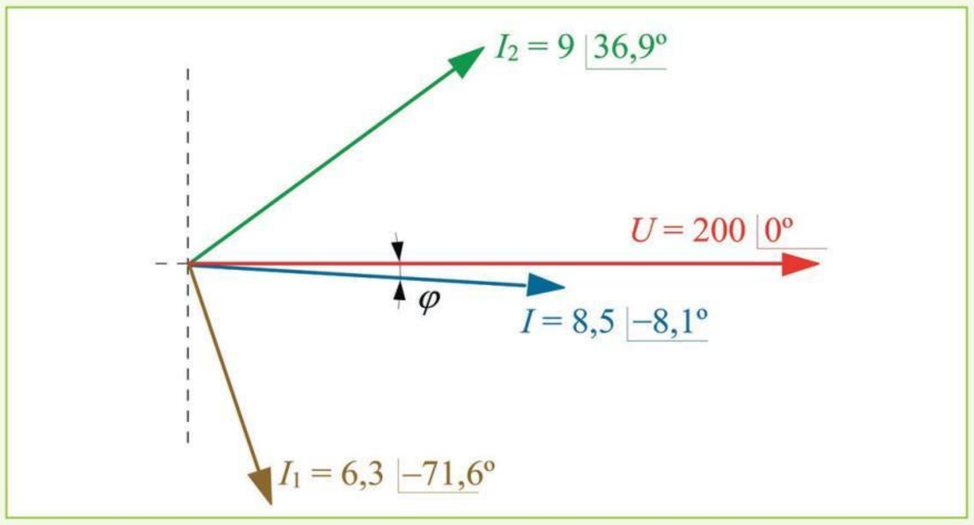


Figura 14.20.

Actividad resuelta 14.5

Averigua la impedancia equivalente y las corrientes I_T, I_1 e I_2 que aparecerán en el circuito mixto de la Figura 14.21. Determina, también, las potencias y el *FP* del conjunto.

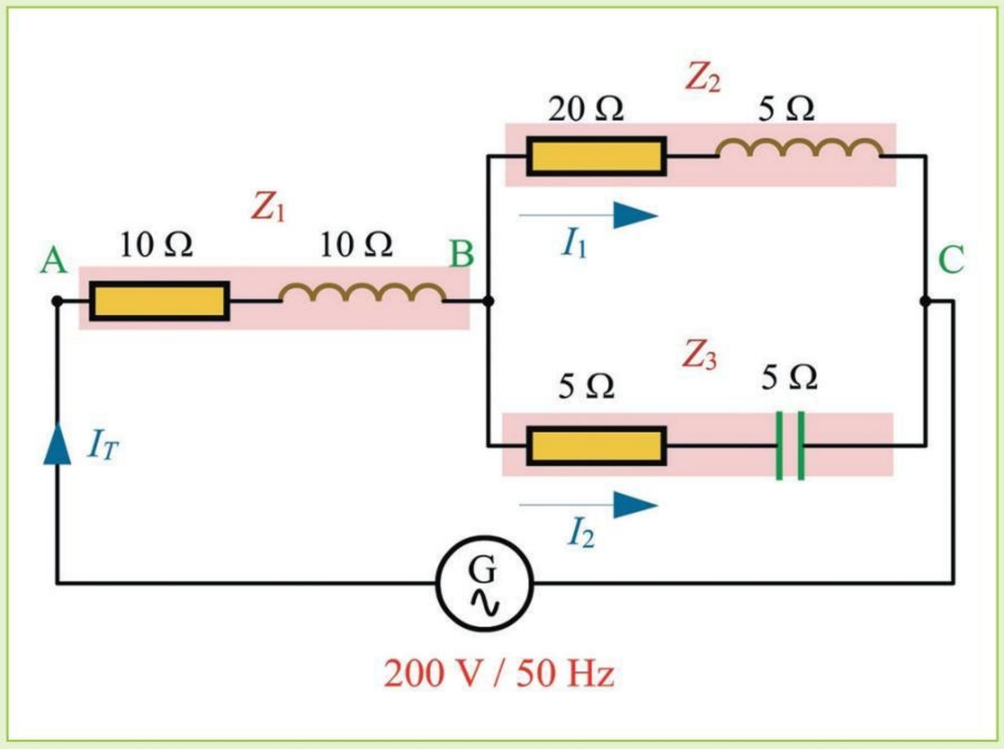


Figura 14.21.

Solución:

Primero determinamos la impedancia equivalente de las ramas que están en paralelo entre los extremos (B-C) (Figura 14.22).

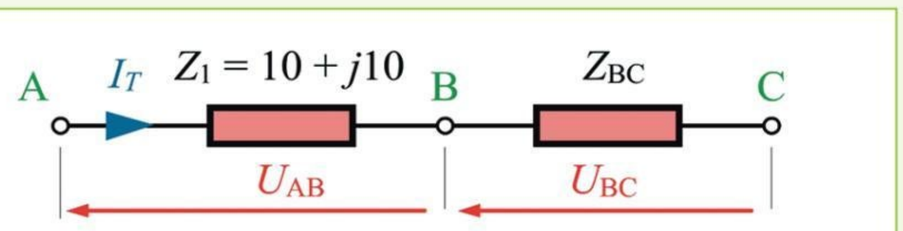


Figura 14.22.

$$Z_{BC} = \frac{Z_2 Z_3}{Z_2 + Z_3} = \frac{(20 + j5) \cdot (5 - j5)}{20 + j5 + 5 - j5} = \ldots = 5 - j3$$

$$Z_T = Z_1 + Z_{BC} = 10 + j10 + 5 - j3 = 15 + j7$$

$$I_T = \frac{U}{Z_T} = \frac{200}{15 + j7} = \ldots = 10{,}9 - j5{,}1 = 12 \angle -25°$$

Para poder calcular las intensidades I_1 e I_2, necesitaremos conocer primero la tensión U_{BC}, que está aplicada a cada una de las cargas Z_2 y Z_3.

$$U_{BC} = Z_{BC} I_T = (5 - j3) \cdot (10{,}9 - j5{,}1) = 39{,}2 - j58{,}2$$

$$I_1 = \frac{U_{BC}}{Z_2} = \frac{39{,}2 - j58{,}2}{20 + j5} = \ldots = 1{,}2 - j3{,}2 = 3{,}4 \angle -69{,}2°$$

$$I_2 = \frac{U_{BC}}{Z_3} = \frac{39{,}2 - j58{,}2}{5 - j5} = \ldots = 9{,}7 - j1{,}9 = 9{,}9 \angle -11{,}1°$$

© Ediciones Paraninfo

Dibuja tú mismo el diagrama vectorial con todas las magnitudes que se han calculado.Para calcular las potencias tendremos en cuenta el ángulo φ de desfase entre U e I_T, que en nuestro caso es de –25°. Esto nos indica que la carga del circuito es inductiva.

$$P = UI \cos \varphi = \ldots = 2.175 \text{ W}$$

$$Q = UI \text{ sen } \varphi = \ldots = 1.014 \text{ VAR}$$

$$S = UI = \ldots = 2.400 \text{ VA}$$

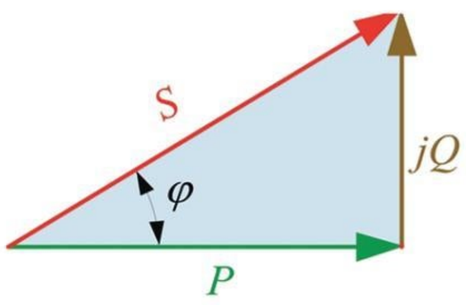
$$\text{FP} = \cos 25° = 0,9$$

14.3.4. Potencia compleja

La potencia de un circuito también se puede calcular y expresar en forma compleja. En la Figura 14.23 se ha representado el triángulo de potencias en forma compleja.

El triángulo de potencias nos indica que la potencia aparente compleja se expresa de la siguiente forma:

$$S = P + jQ$$



$$S = P + jQ$$

Figura 14.23. Triángulo de potencias en forma compleja.

- P es la parte real de S.
- Q es la parte imaginaria de S.

Para obtener la potencia se aplica la siguiente expresión:

$$\vec{S} = \vec{U} + \vec{I}^{\,*}$$

donde I^* es el conjugado de I.

Actividad resuelta 14.6

Averigua la potencia compleja de la Actividad resuelta 14.5.

Solución:

$$S_T = UI_T^* = 200 \cdot (10,9 + j5,1) = 2.180 + j1.020$$

Expresión de la potencia que nos indica que (Figura 14.24):

$$P_T = 2.180 \text{ W} \qquad Q_T = 1.020 \text{ VAR}$$

$$S_T = \sqrt{2.180^2 + 1.020^2} = 2.406 \text{ VA}$$

$$\cos \varphi_T = \frac{2.180}{2.406} = 0,9$$

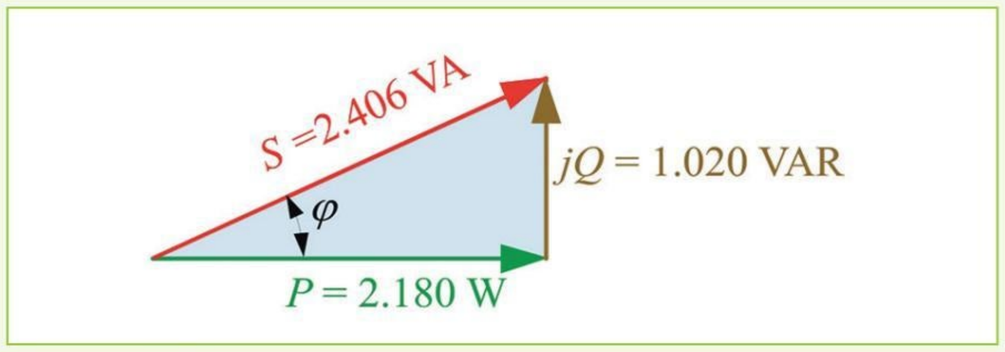


Figura 14.24.

¿Cuál será la potencia compleja en la carga Z_2 de este mismo circuito?

Dado que esta carga es recorrida por la corriente I_1 y está sometida a la tensión U_{BC}, su potencia compleja es:

$$S_2 = U_{BC}I_1^* = (39,2 - j58,2)(1,2 + j3,2) = 233,3 + j55,6$$

$$P_2 = 233,3 \text{ W} \qquad Q_2 = 55,6 \text{ VAR}$$

$$S_2 = \sqrt{233,3^2 + 55,6^2} = 603 \text{ VA}, \cos \varphi_2 = \frac{233,3}{603} = 0,39$$

Actividad propuesta 14.2

Determina las intensidades por cada rama, intensidad total, potencias totales, factor de potencia y medida de los voltímetros de los circuitos de las Figuras 14.25, 14.26 y 14.27. Representa en todos los casos el diagrama vectorial de tensiones y corrientes.

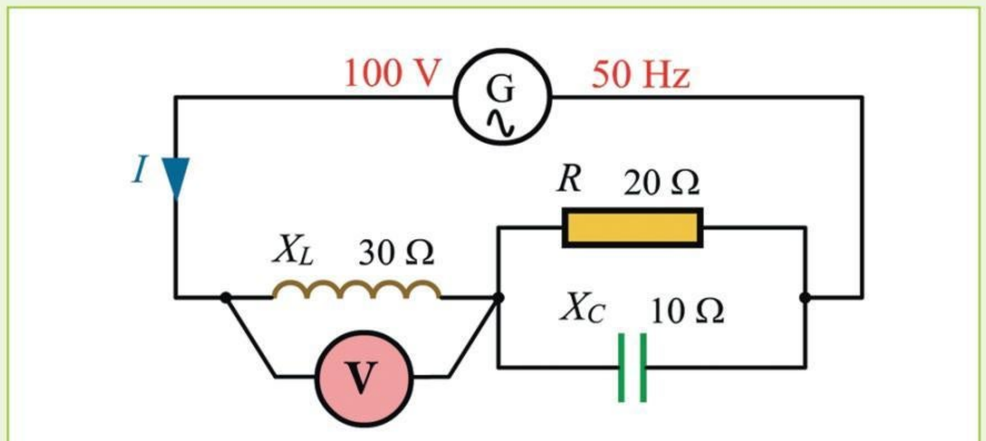


Figura 14.25.

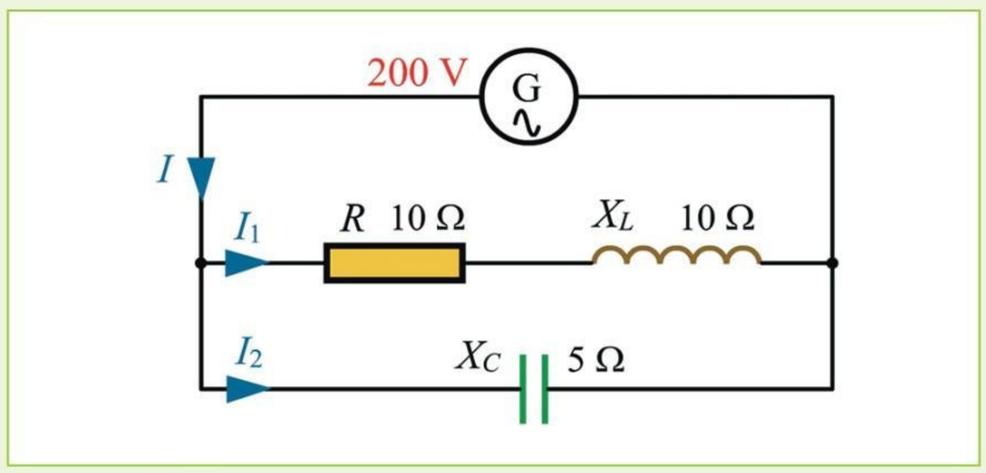


Figura 14.26.

© Ediciones Paraninfo

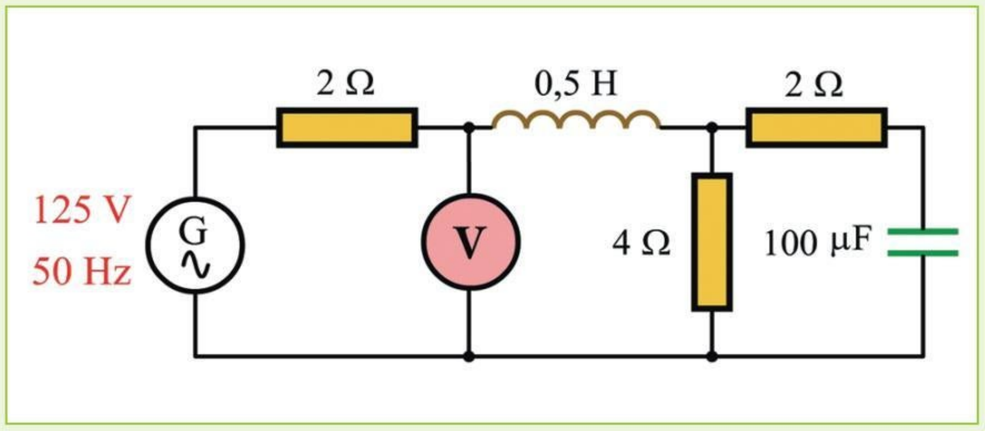


Figura 14.27.

Actividad propuesta 14.3

En el circuito de la Figura 14.28 el voltímetro conectado a la bobina indica un valor eficaz de 300 V.

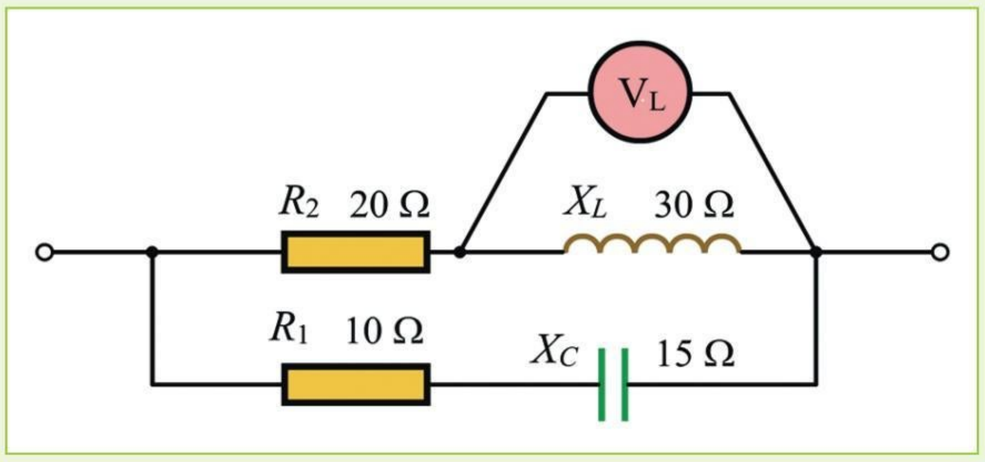


Figura 14.28.

Calcula el valor de la intensidad y tensión aplicada al conjunto del circuito, así como la tensión a la que queda sometido el condensador.

La solución a esta Actividad propuesta la puedes encontrar dentro del MATERIAL WEB elaborado para este texto.

14.4. Circuitos oscilantes

Un circuito oscilante se forma cuando se interconectan bobinas y condensadores, de tal forma que se intercambien entre ellos energía eléctrica.

Si cargamos un condensador, tal como se indica en el esquema de la Figura 14.29, y posteriormente lo conectamos en paralelo con una bobina que posea la misma reactancia inductiva que la capacitiva del condensador ($X_L = X_C$), al conectar un osciloscopio podremos observar que aparecen oscilaciones que se amortiguan al poco tiempo, tal como se muestra en la Figura 14.30.

Este fenómeno se debe a que aparecen sucesivos ciclos de carga y descarga entre la bobina y el condensador. Estos ciclos repetidos de carga y descarga se van amortiguando por la presencia de la resistencia óhmica del circuito (conductores, bobina, etc.), que hace que la energía se vaya transformando en calor en cada uno de los ciclos.

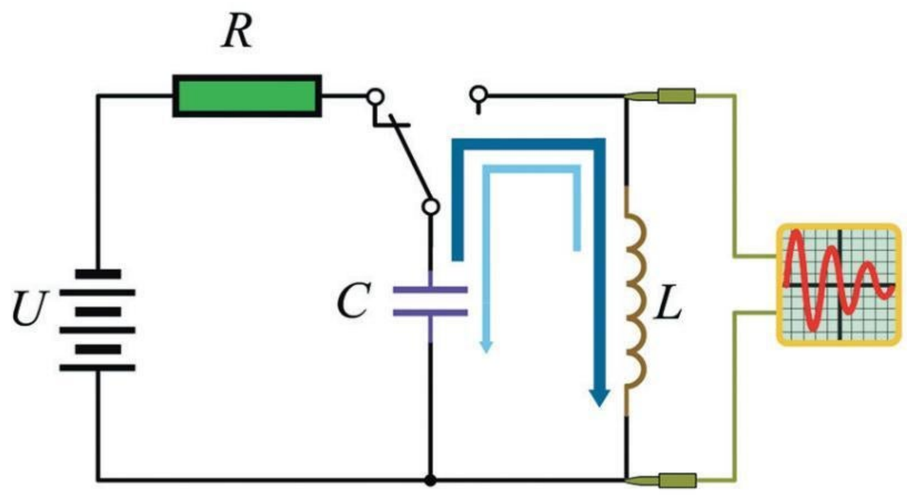


Figura 14.29. Comprobación experimental de un circuito oscilante.

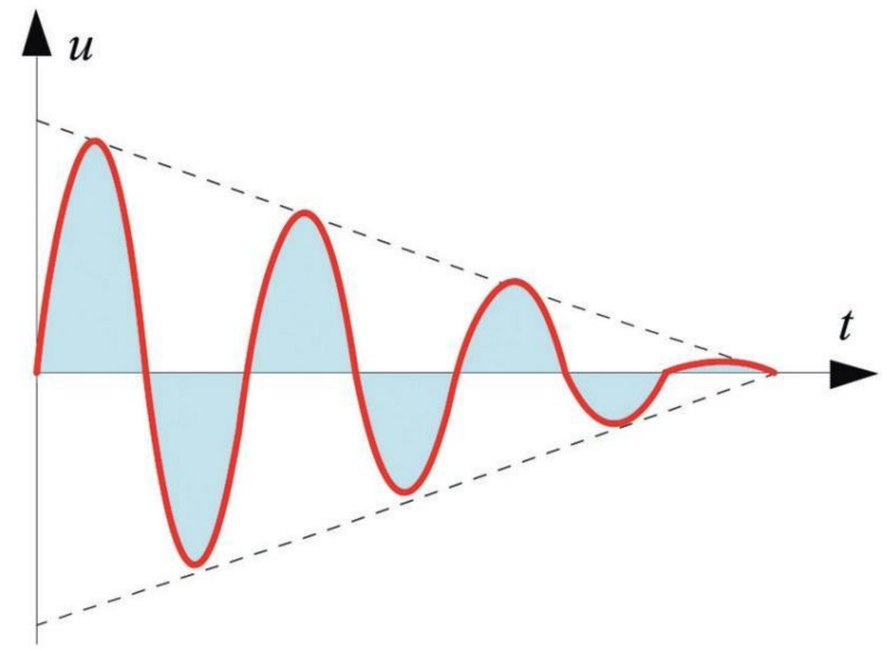


Figura 14.30. Oscilación amortiguada.

14.4.1. Resonancia

El intercambio constante de energía entre una bobina y un condensador en un circuito oscilante se produce a una determinada frecuencia, conocida por el nombre de frecuencia de resonancia.

Se alcanza la resonancia cuando el valor de la reactancia inductiva es igual al de la reactancia capacitiva:

$$X_L = X_C$$

O lo que es lo mismo:

$$2\pi f_r L = \frac{1}{2\pi f_r C}$$

de donde:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

f_r = Frecuencia de resonancia (Hz).

L = Inductancia (H).

C = Capacidad (F).

© Ediciones Paraninfo

Para evitar que las oscilaciones no desaparezcan es necesario alimentar al circuito con una tensión alterna que posea la misma frecuencia que el circuito resonante.

Existen dos posibilidades de conseguir un circuito resonante: en serie o paralelo.

14.4.2. Variación de la impedancia con la frecuencia. Representación gráfica

En la Figura 14.31 se ha representado la variación de la reactancia inductiva de una bobina en función de la frecuencia. Observa cómo la reactancia tiende a aumentar con la frecuencia. En la misma figura se ha representado también la variación de la reactancia capacitiva de un condensador con la frecuencia, dando como resultado una disminución de la reactancia al aumentar la frecuencia.

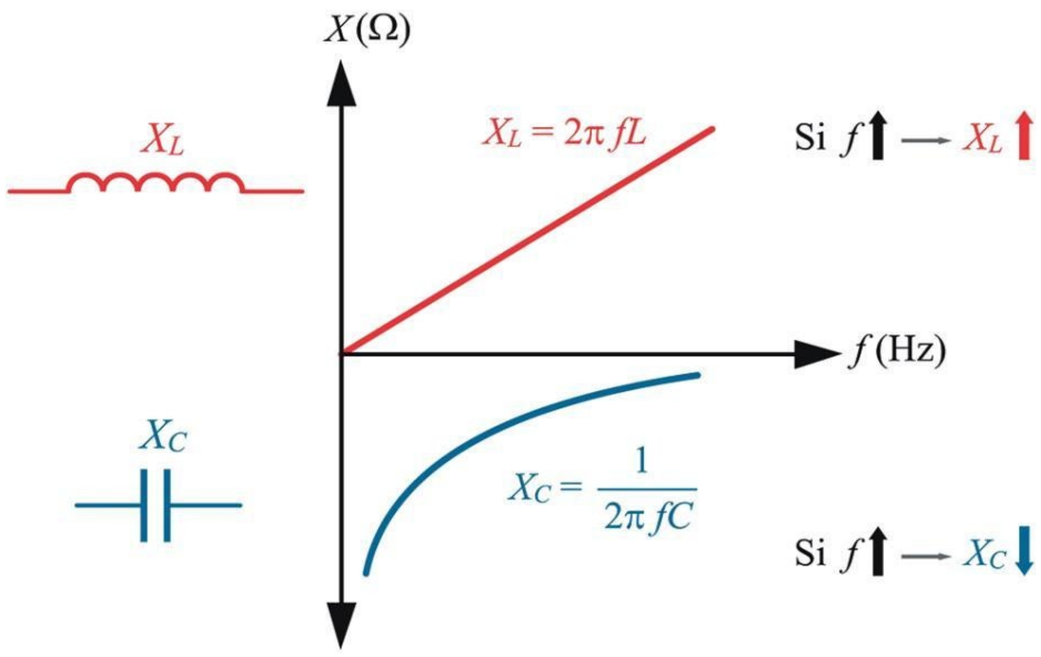


Figura 14.31. Variación de la reactancia inductiva y capacitiva con la frecuencia.

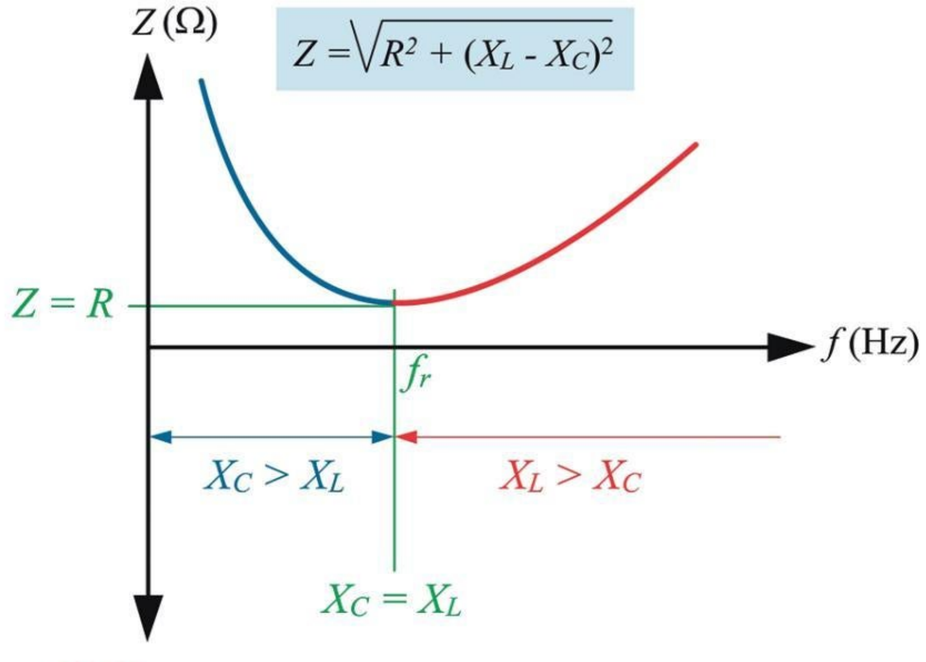


Figura 14.32. Variación de la impedancia con la frecuencia en un circuito R-L-C.

En el caso de que dispongamos de un circuito serie R-L-C, al ir aumentando paulatinamente la frecuencia aplicada, el circuito irá reduciendo su impedancia hasta la frecuencia de resonancia f_r. En este punto, las reactancias inductivas y capacitivas se hacen iguales, y la impedancia del circuito se hace totalmente resistiva, tal como se muestra en la Figura 14.32.

14.4.3. Resonancia en serie

Para conseguir que un circuito como el de la Figura 14.33 se ponga en resonancia, se debe cumplir que la reactancia de la bobina sea igual a la del condensador.

Cuando un circuito en serie entra en resonancia la corriente se hace muy elevada, ya que al anularse las reactancias el único elemento que limita la corriente es la resistencia del circuito. Además se cumple que las caídas de tensión en la bobina y el condensador son iguales.

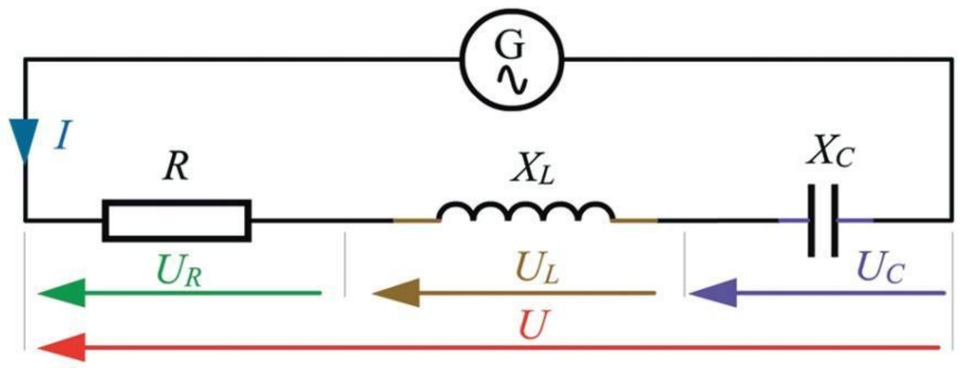


Figura 14.33. Circuito resonante en serie.

Actividad resuelta 14.7

El circuito serie de la Figura 14.33 está formado por una resistencia de 10 Ω, una bobina de 1 mH y un condensador de 1 µF. Averigua cuál será la frecuencia de la tensión que habrá que aplicar para que el circuito entre en resonancia. Si el valor de la tensión aplicada es de 100 V, calcula el valor de la corriente y de las caídas de tensión en la bobina y el condensador para la frecuencia de resonancia. Dibuja de forma aproximada cómo sería la representación gráfica de la intensidad de corriente por el circuito en función de la variación de frecuencia.

Solución:

La frecuencia de resonancia la calculamos con la expresión ya conocida:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{1 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot 10^{-6}}} = 5.033 \text{ Hz}$$

Dado que las reactancias se anulan, el único valor que limita la corriente es la resistencia:

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{R} = \frac{100}{10} = 10 \text{ A}$$

Al ser iguales la reactancia inductiva y la capacitiva, las caídas de tensión también lo son:

© Ediciones Paraninfo

$$U_C = U_L = X_L I = 2\pi f LI = 2 \cdot \pi \cdot 5.033 \cdot 1 \cdot 10^{-3} \cdot 10 = 316 \text{ V}$$

En la Figura 14.34 se ha representado la variación de la corriente con la frecuencia. Observa cómo la corriente se hace máxima (10 A) para la frecuencia de resonancia (5.033 Hz).

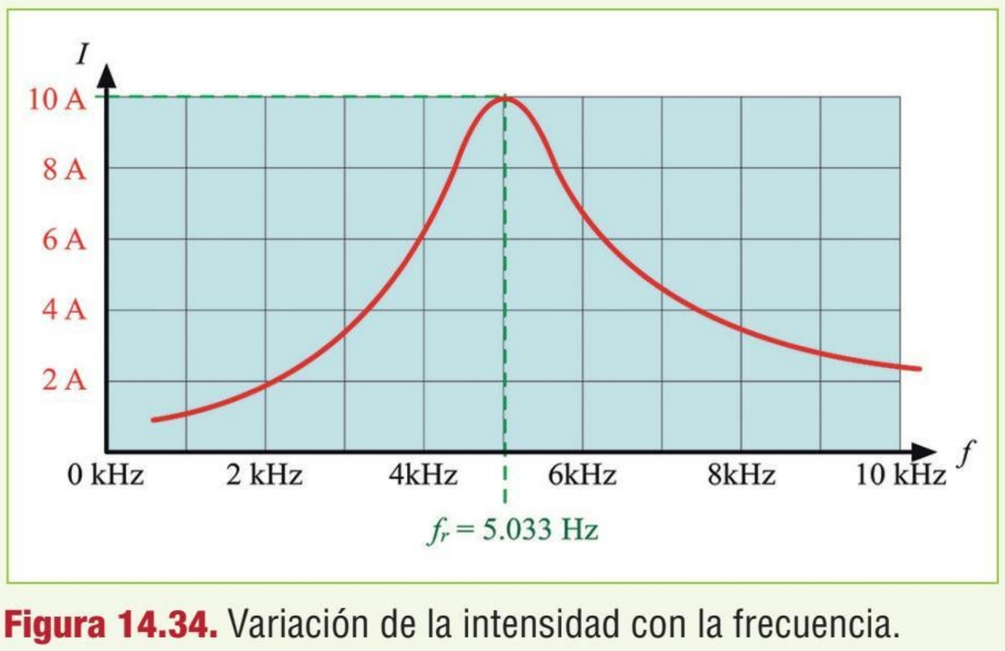


Figura 14.34. Variación de la intensidad con la frecuencia.

El circuito oscilante en serie posee varias aplicaciones prácticas. Por ejemplo, se puede usar para eliminar una determinada frecuencia (la frecuencia de resonancia) en una señal que esté compuesta por multitud de frecuencias. Para ello lo que se hace es poner un circuito oscilante en paralelo con la señal, de tal forma que cortocircuita aquella señal que posea la frecuencia de resonancia.

14.4.4. Resonancia en paralelo

Para conseguir que un circuito como el de la Figura 14.35 oscile en paralelo, se ha de conseguir que las reactancias del condensador y de la bobina sean iguales.

En el caso de que la resistencia óhmica de la bobina sea prácticamente nula, la intensidad total absorbida por el conjunto es también prácticamente nula y el circuito se comporta como si estuviese abierto, es decir, con una impedancia infinita.

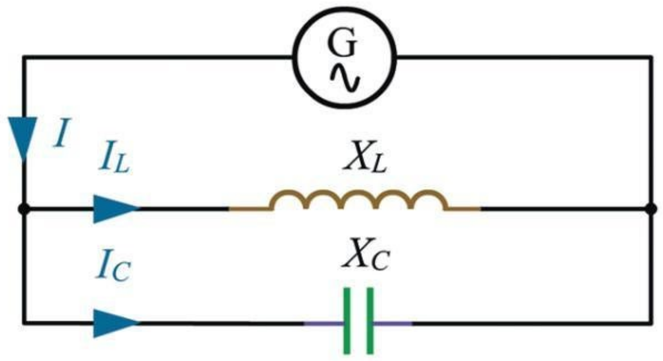


Figura 14.35. Circuito resonante en paralelo.

Actividad resuelta 14.8

Determina la frecuencia de resonancia de un circuito paralelo como el de la Figura 14.35 si está compuesto por una bobina de 10 mH de inductancia y un condensador de 100 μF.

Solución:

Al igual que en el circuito serie, la frecuencia de resonancia se alcanza para:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{10 \cdot 10^{-3} \cdot 100 \cdot 10^{-6}}} = 159 \text{ Hz}$$

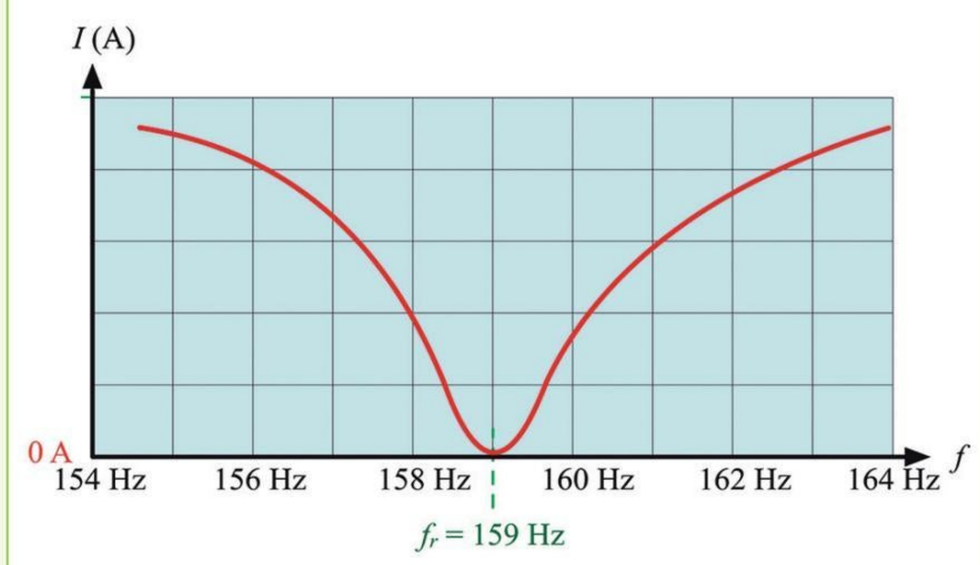


Figura 14.36.

© Ediciones Paraninfo

Comprobación práctica en el laboratorio

14.1. **Comprobación experimental de un circuito oscilante.** Consigue los elementos necesarios para realizar el montaje de la Figura 14.29 y comprueba experimentalmente el efecto de oscilación amortiguada que aparece al aplicar un condensador cargado a una bobina.

14.2. **Circuito resonante.** Se trata de que consigas poner en resonancia a un circuito serie. Para ello conecta en serie una resistencia, una bobina y un condensador a un generador de señales. Mide la tensión que aparece en la bobina y el condensador, así como la corriente y frecuencia aplicada. Comienza el ensayo aplicando una frecuencia muy baja, aumentando dicha frecuencia muy poco a poco hasta conseguir que las tensiones que aparecen en la bobina y el condensador sean iguales. Una vez conseguido, anota la frecuencia de resonancia a la que se ha conseguido. Observa cómo en todo el proceso la corriente por el circuito ha alcanzado su valor máximo para la frecuencia de resonancia. En previsión de que las tensiones alcanzadas sean elevadas, conviene tomar las precauciones necesarias para evitar accidentes o daños en los aparatos de medida.

Actividades de comprobación

14.1. La instalación eléctrica de un taller electromecánico consta de los siguientes receptores, conectados a una línea eléctrica de C.A. de 230 V, 50 Hz: (1) 5 calefactores de 1.500 W cada uno; (2) 3 motores monofásicos de inducción de 5 CV, cos $\varphi = 0{,}75$; (3) 60 lámparas fluorescentes de 40 W, cos $\varphi = 0{,}6$; (4) un horno con una resistencia equivalente a 15 Ω; (5) un electroimán con un circuito equivalente R-L igual a $R = 20\ \Omega$, $L = 500$ mH. Averigua:

a) Esquema eléctrico de la instalación, incluyendo interruptores automáticos para la protección de la línea general y de cada uno de los circuitos, así como una batería automática para la corrección del factor de potencia.

b) Potencia total instalada y *FP*.

c) Intensidad de corriente por los diferentes circuitos.

d) Sección de los conductores de la línea general, si esta consta de un cable bipolar de cobre aislado con PVC, instalado al aire, de 125 m de longitud y con una caída de tensión máxima admisible del 3 %.

e) Batería automática de condensadores para corregir el *FP* a 0,98.

f) Intensidad de corriente por dicha batería.

14.2. En la Figura 14.37 se muestra el esquema eléctrico, en representación unifilar, de una línea monofásica que alimenta a 230 V, 50 Hz, a la instalación interior de un pequeño taller de reparaciones.

Seguidamente se indican las características de los receptores (1), (2), (3) y (4):

- (1) 7 lámparas incandescentes de 100 W; 230 V.
- (2) 100 lámparas fluorescentes de 40 W; cos $\varphi = 0{,}9$; 230 V.
- (3) Horno eléctrico con una resistencia equivalente de 50 Ω.
- (4) Motor monofásico de 3.025 W; cos $\varphi = 0{,}7$; 230 V.

Averigua:

a) P_T, S_T, cos φ_T, I_T.

b) Intensidad por los fusibles F1F, F2F, F3F, F4F y F5F.

c) Sección de la línea general si esta consta de un cable multiconductor de 2xPVC de 125 m de longitud instalado bajo tubo en montaje superficial y la caída máxima que se admite es del 2 %.

d) Características de la batería de condensadores que habrá que conectar al principio de línea general para corregir el *FP* a 0,99.

e) ¿Qué sección sería suficiente para la línea general una vez conectada la batería de condensadores?

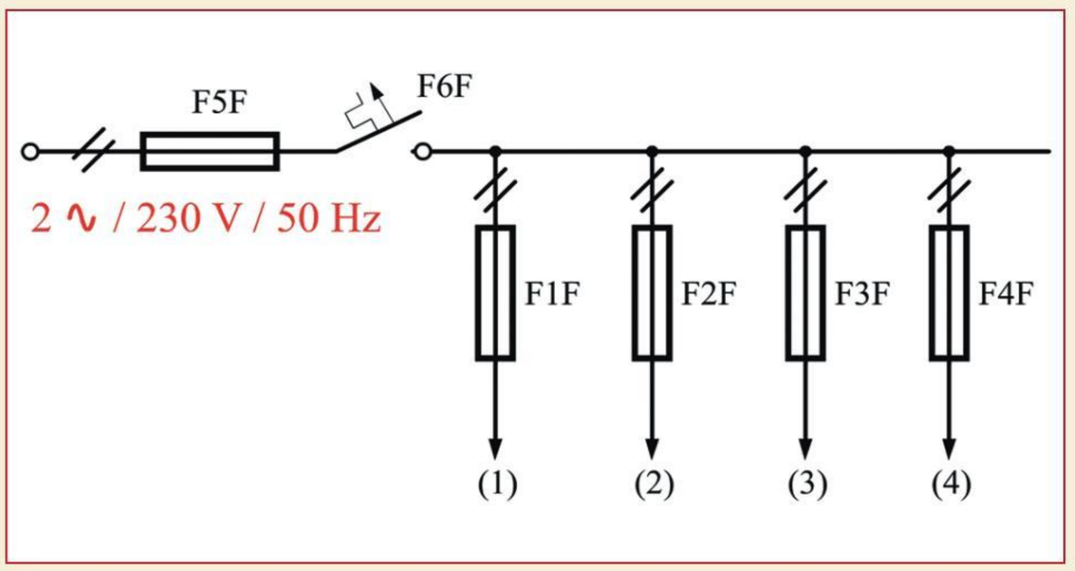


Figura 14.37.

© Ediciones Paraninfo

14.3. La impedancia equivalente de un circuito es $Z = 50\angle 45°$. Expresa el resultado en forma algebraica e indica los valores de la resistencia y de la reactancia.

14.4. Se conecta a una red de 400 V, 50 Hz, una resistencia óhmica de 200 Ω en paralelo con una bobina de 140 Ω de resistencia y 1,96 H de coeficiente de autoinducción. Averigua las intensidades del circuito. Dibuja el diagrama vectorial.

14.5. Se conecta a una red de C.A. de 120 V, 50 Hz, un circuito compuesto por tres receptores en paralelo de las siguientes características: un condensador de 66,3 µF, una resistencia de 400 Ω y una bobina de 159 mH. Averigua la corriente total y por cada una de las cargas, las potencias totales y dibuja el diagrama vectorial.

14.6. Averigua la impedancia equivalente del circuito de la Figura 14.38, así como los valores de I_T, I_1, I_2, I_3, P_T, Q_T, S_T, *FP*. Dibuja el diagrama vectorial.

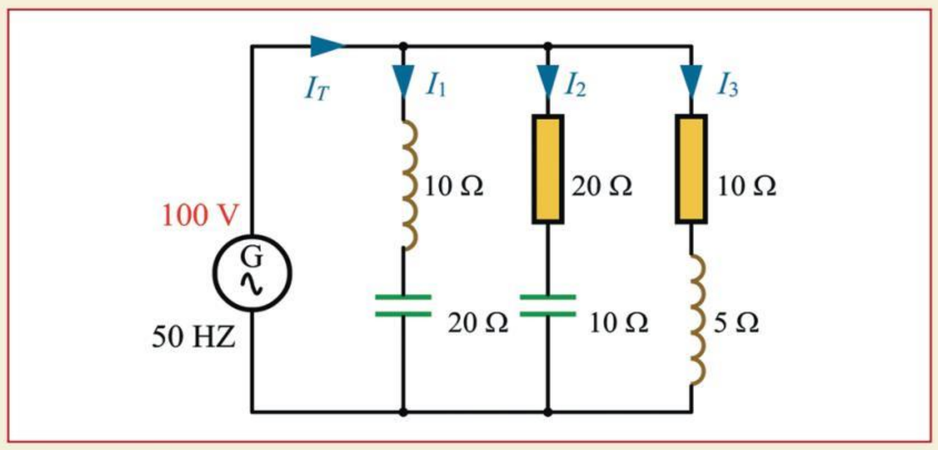


Figura 14.38.

14.7. Del circuito mixto mostrado en la Figura 14.39, averigua la lectura de A y de V, así como P_T, Q_T, S_T y dibuja el diagrama vectorial.

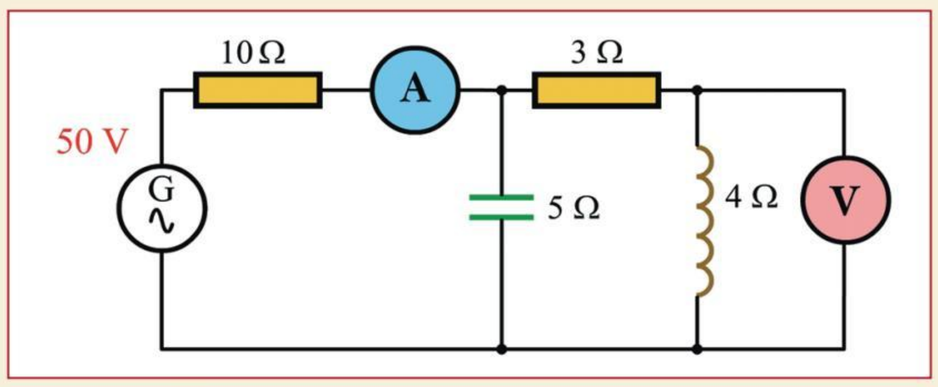


Figura 14.39.

14.8. En el circuito mixto de la Figura 14.40, el amperímetro indica una lectura de 10 A. Determina I_T, I_1, U_T, P_T, Q_T, S_T, *FP* y dibuja el diagrama vectorial.

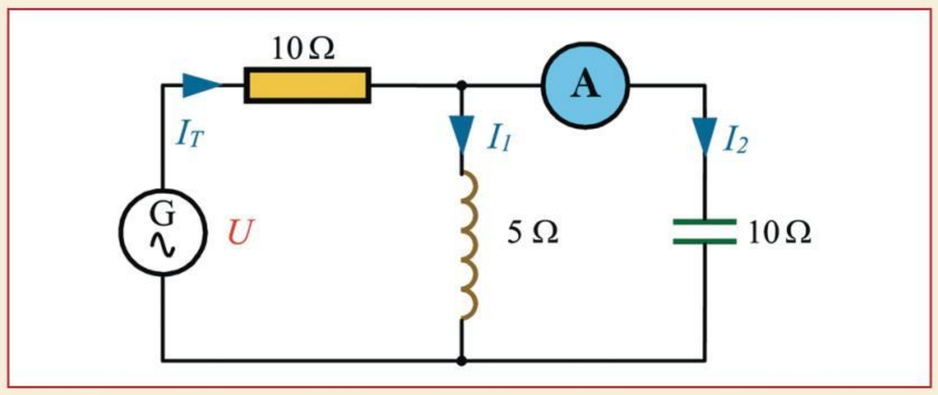


Figura 14.40.

14.9. La bobina de un electroimán posee un coeficiente de autoinducción de 0,4 henrios y una resistencia óhmica de 100 ohmios. Calcula la intensidad, factor de potencia y potencias al aplicar una C.A. senoidal de $\upsilon = 311 \text{ sen } 314t$. Dibuja los diagramas vectoriales.

14.10. Se conectan en paralelo las bobinas de dos contactores a una red monofásica de C.A. de 230 V, 50 Hz. Si las características de las bobinas son: bobina número 1 (R = 80 Ω, L = 0,8 H), bobina número 2 (R = 120 Ω, L = 0,6 H), averigua las corrientes por cada bobina, *FP* de cada una y total, potencia activa de cada una y total.

14.11. Se conecta en serie, con la resistencia de un calefactor de 160 Ω, un condensador de 35 µF a una red de C.A. de 230 V, 50 Hz. Averigua la tensión a la que quedará sometido el calefactor. ¿Qué frecuencia habrá que aplicar al conjunto para conseguir que el calefactor trabaje a 110 V sin modificar el valor de la tensión aplicado al conjunto?

14.12. Se conectan en serie las bobinas de dos electroválvulas a 230 V, 50 Hz, de las siguientes características: bobina número 1 (R = 20 Ω; 0,8 H), bobina número 2 (28 Ω; 0,6 H). Calcula la corriente por las mismas, la tensión aplicada a cada bobina, el factor de potencia del conjunto, las potencias del conjunto y la capacidad del condensador que habrá que conectar en paralelo para conseguir corregir el *FP* del conjunto a 0,95.

14.13. La bobina de un contactor de 110 V posee una resistencia de 60 Ω y un coeficiente de autoinducción de 0,2 H. ¿Cuál será el valor de la resistencia óhmica que habrá que conectar en serie para poder conectar dicha bobina a una red de 230 V, 50 Hz, sin que se vea afectado su funcionamiento?

14.14. A una bobina de 200 Ω de resistencia y 0,8 H de coeficiente de autoinducción se le conecta en paralelo un condensador de 2 µF. Calcula las intensidades del circuito al conectar el conjunto a 230 V, 50 Hz.

14.15. Calcula la sección de una línea monofásica de 100 m que alimenta a dos motores de las siguientes características: motor número 1 (5 kW; 230 V; cos φ = 0,6), motor número 2 (7 kW; 230 V; cos φ = 0,65). La caída de tensión máxima que se admite es del 5 %. La línea consta de un cable bipolar aislado con PVC instalado bajo tubo empotrado en pared aislante. Posteriormente, a la instalación de la línea se conecta una batería de condensadores al final de ella con la idea de elevar el factor de potencia de la instalación hasta 0,95. ¿Cuál sería ahora la sección recomendable para los conductores de línea?

© Ediciones Paraninfo

14.16. Averigua la frecuencia de resonancia de un circuito serie formado por un condensador de 20 µF, una bobina de 80 mH y una resistencia de 2 Ω. ¿Qué valor tendrán las caídas de tensión en la bobina y el condensador si se aplica al conjunto una tensión de 100 V?

14.17. Se desea conseguir que un circuito paralelo entre en resonancia a una tensión alterna de 50 Hz, para lo que se dispone de una bobina de 1 H. ¿Qué capacidad deberá poseer el condensador?

Actividades de evaluación resueltas

A continuación se dan los enunciados de una serie de actividades de evaluación. Estas actividades las podrás encontrar resueltas accediendo al MATERIAL WEB creado para este texto.

14.1. Las intensidades en corriente alterna en los elementos de un circuito R-L-C paralelo son 4, 6 y 9 A (valores eficaces), respectivamente. Dibuja el diagrama vectorial de intensidades y calcula el valor eficaz de la intensidad total del circuito, tomando como origen de fases la intensidad en la resistencia.

14.2. El circuito serie R-L-C de la Figura 14.41 está en resonancia. La pulsación de la fuente ideal de tensión es 1.000 rad/s y su valor eficaz 100 V. Se sabe, además, que, a la pulsación de resonancia, $I = 5$ A (valor eficaz) y $U_C = 20.000$ V (valor eficaz). Halla:

a) La tensión compleja U_R.

b) La tensión compleja U_L.

c) Valores de R, L y C.

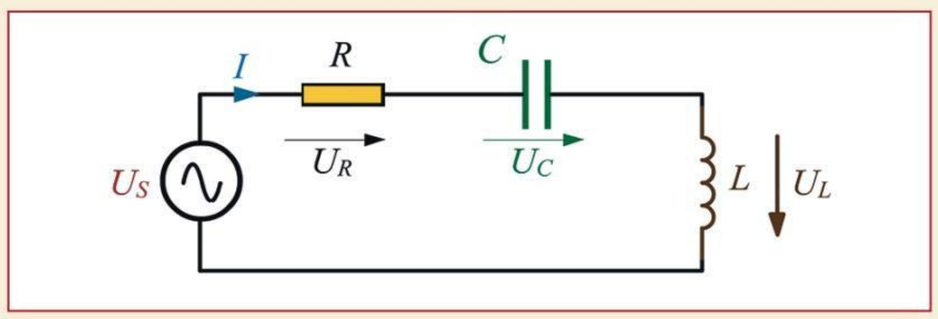


Figura 14.41.

Nota: Indica las tensiones complejas U_R y U_L, tomando como origen de fases la intensidad I.

14.3. En el circuito paralelo de la Figura 14.42, calcula:

a) Impedancia total compleja del circuito.

b) Corrientes I_1, I_2 e I.

c) Potencia activa, reactiva y aparente suministrada por el generador al circuito.

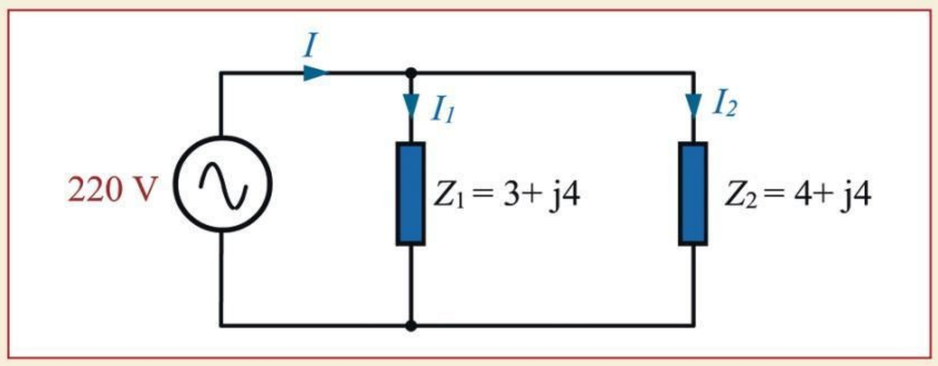


Figura 14.42.

14.4. En un circuito formado por el paralelo de una impedancia $Z_1 = 800 + j400$ Ω, un condensador $C = 1$ µF y una fuente de tensión de 400 V a 50 Hz, determina:

a) Intensidad compleja en cada rama.

b) Intensidad total compleja.

c) Factor de potencia total.

d) Potencia activa total.

14.5. El circuito paralelo R-L-C de la Figura 14.43 se encuentra alimentado por una red de 220 V y 50 Hz, halla:

a) Intensidad de corriente que indica el amperímetro.

b) Potencia activa consumida por el circuito.

c) Modificando el valor del condensador variable, determina la capacidad para la que el cos φ que presenta el circuito es igual a 1.

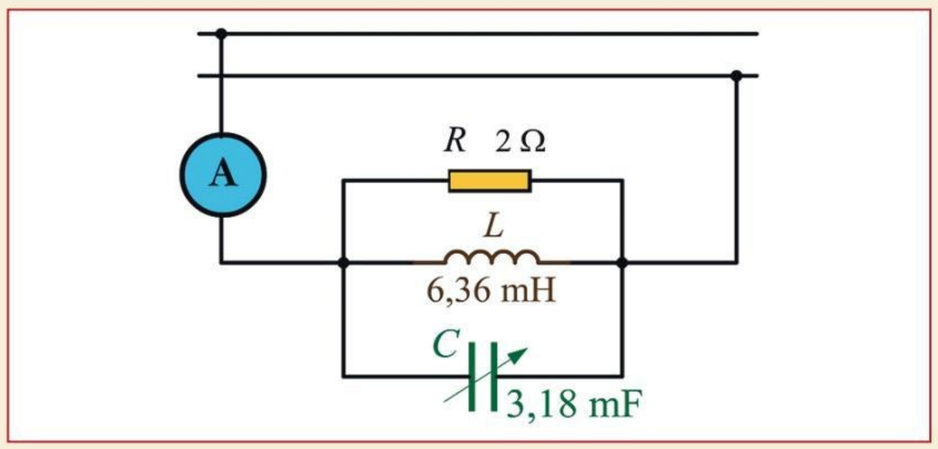


Figura 14.43.

14.6. Un generador de corriente alterna de 230 V y 50 Hz, alimenta un circuito formado por una impedancia $z_1 = 40\angle 30°$ Ω conectada en serie con una resistencia óhmica de 60 Ω. Calcula:

a) La impedancia compleja total del circuito.

b) La intensidad de corriente compleja del circuito.

c) Las potencias activa, reactiva y aparente del conjunto.

d) El valor del condensador conectado en paralelo necesario para mejorar el factor de potencia a la unidad.

14.7. Una fuente de tensión alterna de 230 V y 50 Hz, alimenta un circuito formado por una impedancia $z_1 = 80\angle 30°$ Ω conectada en serie con otra de valor $z_2 = 20\angle 60°$ Ω. Calcula:

a) La impedancia compleja del circuito.

b) La intensidad de corriente compleja del circuito.

c) El triángulo de potencias del circuito.

d) La caída de tensión en cada una de las impedancias.

© Ediciones Paraninfo

14.8. Un circuito R-L-C en serie con $R = 20\ \Omega$, $L = 40$ mH, $C = 250\ \mu$F se conecta a una fuente de tensión alterna de frecuencia 50 Hz. Al conectar un voltímetro al generador se obtiene una medida de 240 V. Calcula:

a) La impedancia compleja y máxima que circula por el circuito.

b) La intensidad eficaz y máxima que circula por el circuito.

c) La frecuencia de resonancia.

d) Dibuja el triángulo de potencias.

14.9. En el circuito de corriente alterna de la Figura 14.44 de terminales A-C, que forma parte de un circuito más amplio, la impedancia compleja Z_1 absorbe una potencia activa igual a 27 W. Tomando U_{AB} como origen de fases, determina:

a) Tensión indicada por el voltímetro V_1.

b) Intensidad de corriente que marca el amperímetro.

c) Tensión indicada por el voltímetro V_2.

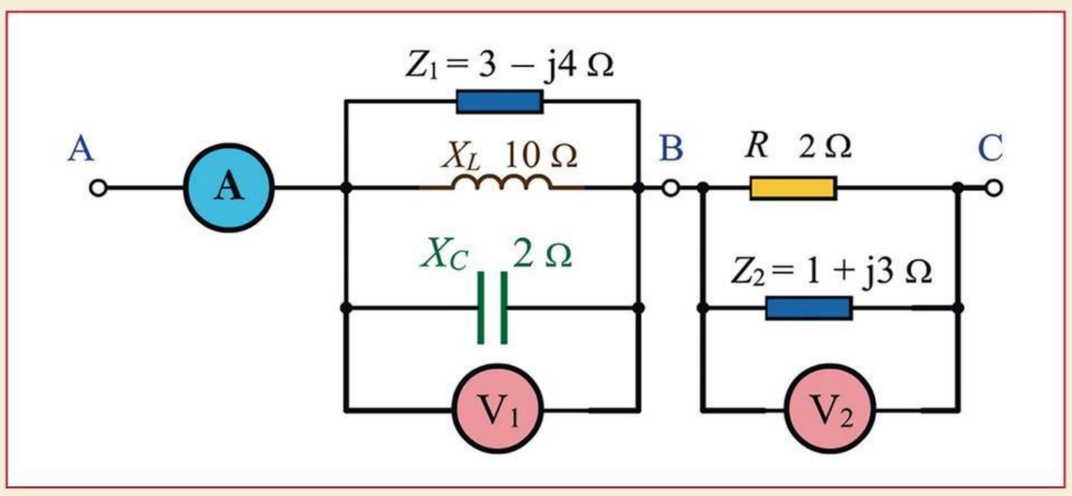


Figura 14.44.

14.10. El circuito de corriente alterna de la Figura 14.45 está alimentado por una fuente de tensión de 50 Hz y 75 V de valor eficaz. Se pide:

a) El valor eficaz de la tensión U_{AB}.

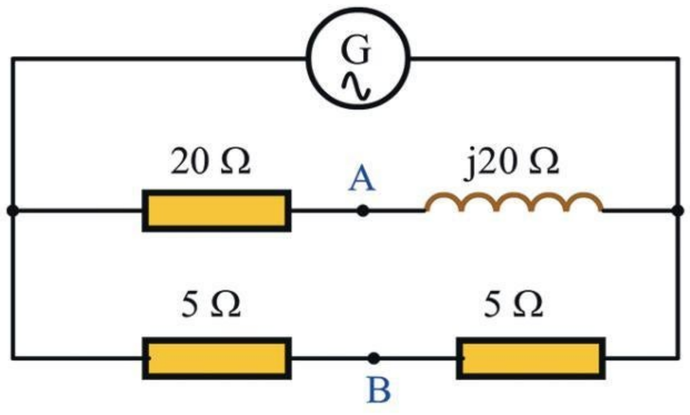


Figura 14.45.

b) El factor de potencia del circuito conectado a la fuente ideal de tensión.

c) La capacidad del condensador que debería conectarse en paralelo con la fuente de tensión, para evitar que dicha fuente ceda potencia reactiva al resto del circuito.

14.11. En el circuito de corriente alterna de 50 Hz de la Figura 14.46 el valor eficaz de la tensión en el condensador es 10 V. Si se toma como origen de fases la tensión compleja en el condensador U_C, halla:

a) Tensión compleja U_{AB}.

b) Tensión compleja *Us* de la fuente de tensión.

c) Potencias activa y reactiva cedidas o absorbidas por los elementos del circuito.

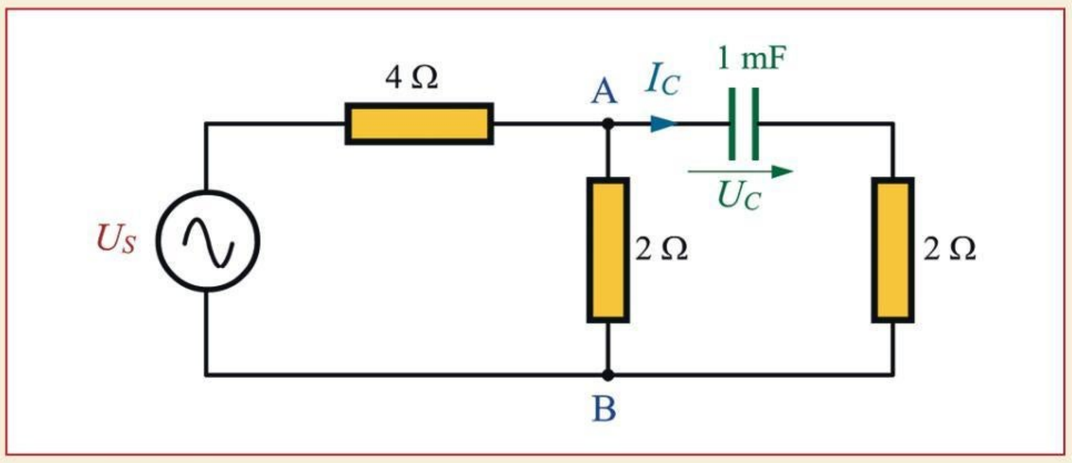


Figura 14.46.

14.12. Dado el circuito de la Figura 14.47, calcula:

a) La impedancia equivalente vista por el generador.

b) La corriente que circula por cada una de las tres ramas del circuito.

c) Las potencias aparente, activa y reactiva, así como el factor de potencia del circuito.

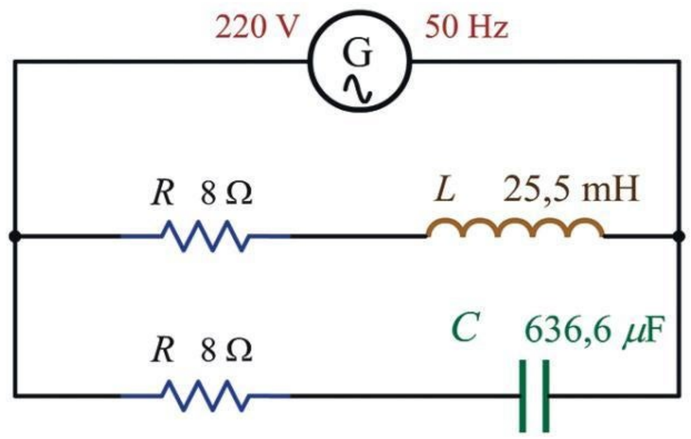


Figura 14.47.

14.13. Una planta industrial consta de un conjunto de receptores eléctricos cuyas características son: (1) 50 luminarias fluorescentes (cada una de ellas constituida por una resistencia de 200 Ω en serie con una reactancia $X_L = 150\ \Omega$); (2) 5 motores eléctricos de 800 W, 230 V, cos $\varphi = 0{,}8$ (inductivo), cada uno de ellos; (3) un sistema de calefacción eléctrica de 10 kW, 230 V.

La planta está conectada a una alimentación monofásica de 230 V, 50 Hz, y los motores a plena carga tienen un rendimiento de un 80 %; halla:

a) Potencia activa y reactiva consumida por el conjunto de luminarias.

b) Potencia activa y reactiva consumida por el grupo de motores, a plena carga.

© Ediciones Paraninfo

c) Intensidad de corriente absorbida por la planta en estas condiciones.

d) Factor de potencia que presenta la instalación.

14.14. En el circuito de corriente alterna de la Figura 14.48 las indicaciones de los instrumentos de medida son: $V = 200$ V, $W = 4$ kW, A = 10 A, $V_C = 100\sqrt{5}$ V. Halla:

a) Valor de R y X_L.

b) Intensidad de corriente que circula por la fuente.

c) Valor de la reactancia del condensador X_C.

d) Potencia reactiva que suministra la fuente.

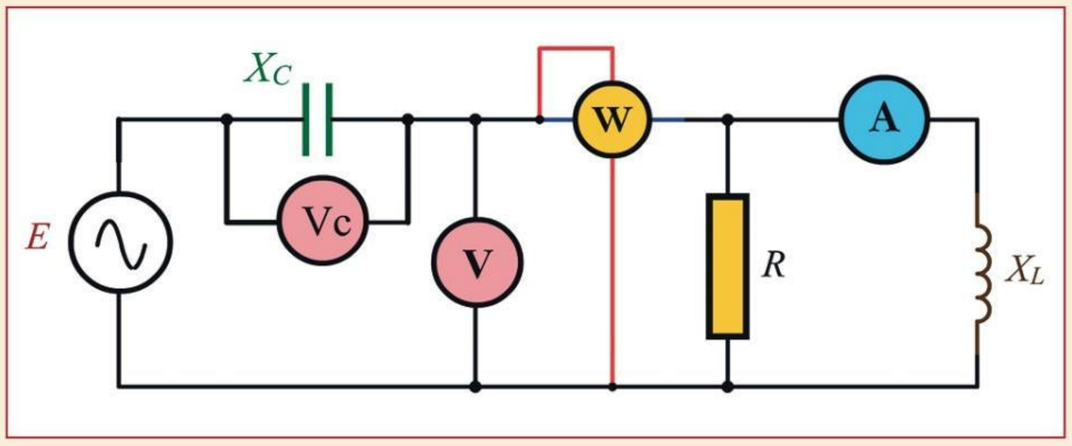


Figura 14.48.

14.15. En el circuito de la Figura 14.49 ($V_1 = 230$ V eficaces), determina en régimen permanente sinusoidal:

a) La impedancia equivalente de R_2, R_3 y L_1.

b) La tensión o *ddp* en la resistencia R_3.

c) La corriente que circula por L_1.

d) La corriente suministrada por el generador.

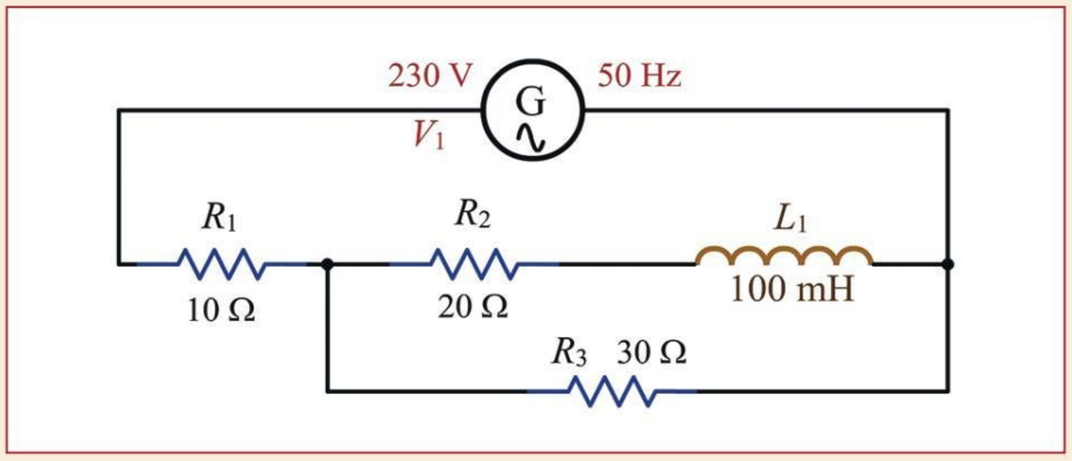


Figura 14.49.

14.16. En el circuito de la Figura 14.50 la fuente de alimentación tiene una pulsación de 1.000 rad/s y la resistencia consume una potencia de 125 W. Determina:

a) Las intensidades que circulan por cada una de las ramas.

b) La tensión de la fuente de alimentación y la potencia activa y reactiva que suministra.

c) El diagrama vectorial de tensión e intensidades.

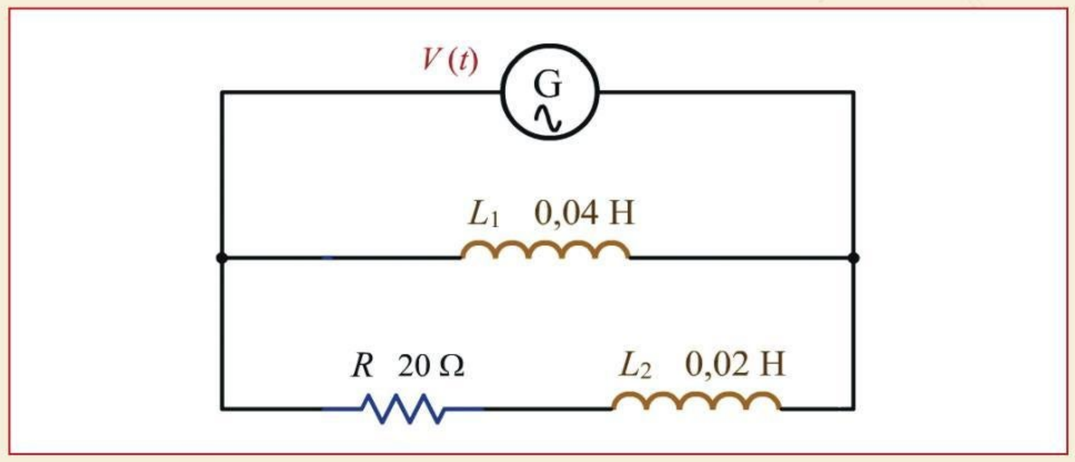


Figura 14.50.

14.17. En el circuito representado en la Figura 14.51 la intensidad que suministra la fuente es de $6\sqrt{5}$ A, y está adelantada 26,57° con respecto a su tensión en bornes. Si la intensidad que circula por la resistencia R_1 es de 6 A. Determina:

a) El valor de R_2 de X_C y de la impedancia equivalente del circuito.

b) La potencia activa y reactiva que suministra la fuente.

c) El diagrama vectorial de tensión e intensidades.

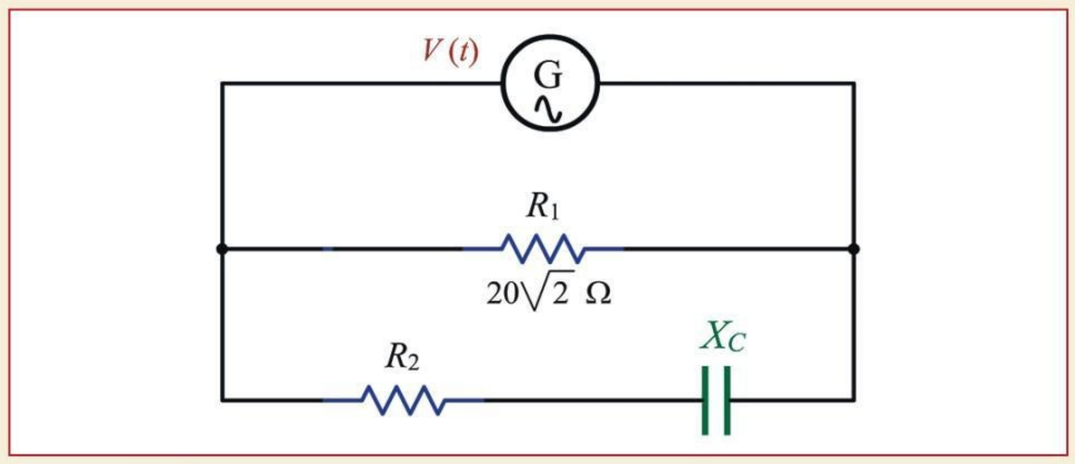


Figura 14.51.

14.18. En la red de corriente alterna de la Figura 14.52 son $R_1 = R_2 = 10\ \Omega$, $X_L = X_C = 10\ \Omega$. Siendo la lectura del amperímetro A de 20 A, calcula:

a) Las lecturas de los restantes aparatos de medida: V, A_1 y A_2.

b) La potencia aparente compleja suministrada por la red.

c) Aproximadamente a escala, diagrama vectorial de tensiones e intensidades.

d) Los valores de X_L y X_C, que sin modificar R_1 y R_2, den lugar a que los tres amperímetros marquen idéntica lectura.

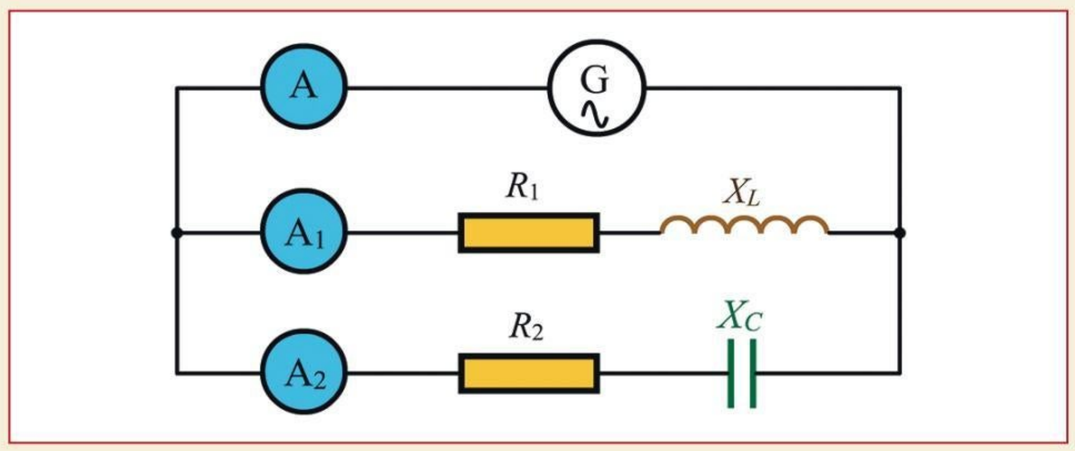


Figura 14.52.

© Ediciones Paraninfo

14.19. En el circuito de la Figura 14.53, calcula:

a) Intensidades (módulo y fase) en todas las ramas, representa aproximadamente a escala, su diagrama vectorial tomando como origen de fase la tensión *V*.

b) Potencia consumida y factor de potencia.

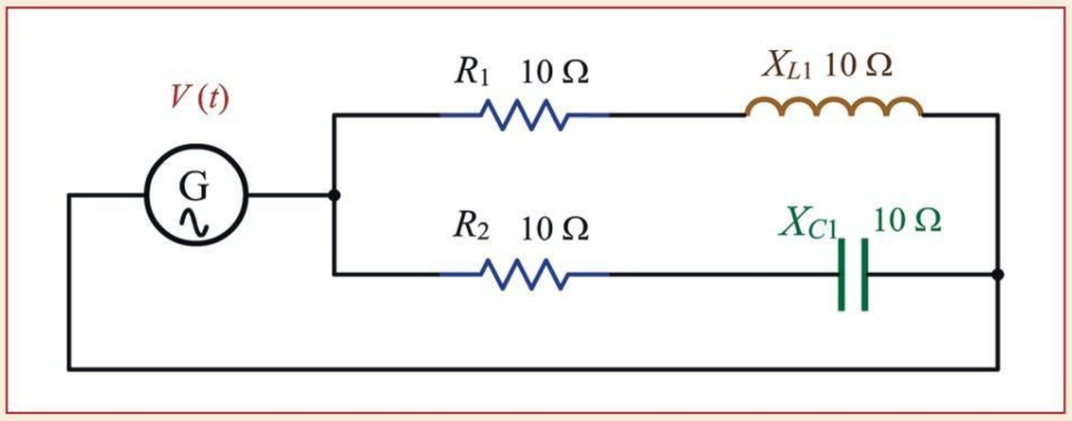


Figura 14.53.

14.20. En el circuito de la Figura 14.54, calcula:

a) Impedancia equivalente entre A y B (indica si es inductiva o capacitiva).

b) Intensidad (módulo y fase) por cada una de las tres impedancias.

c) Tensión (módulo y fase) en bornas de cada una de las tres impedancias.

d) Potencias totales (*S*, *P*, *Q*).

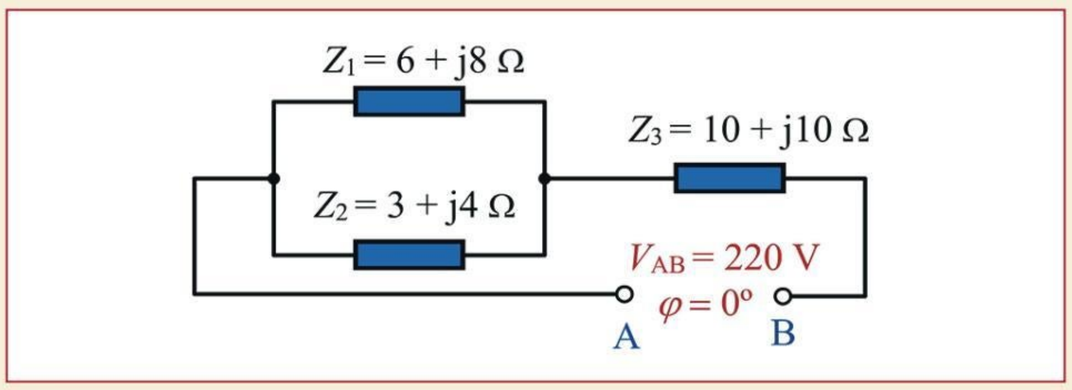


Figura 14.54.

14.21. En el circuito del Figura 14.55, calcula:

a) Impedancia equivalente del circuito (vista por generador).

b) Corrientes (módulo y fase) I, I_1 e I_2.

c) Tensiones (módulo y fase) en bornas del condensador y de la bobina.

d) Potencias totales (*S*, *P*, *Q*).

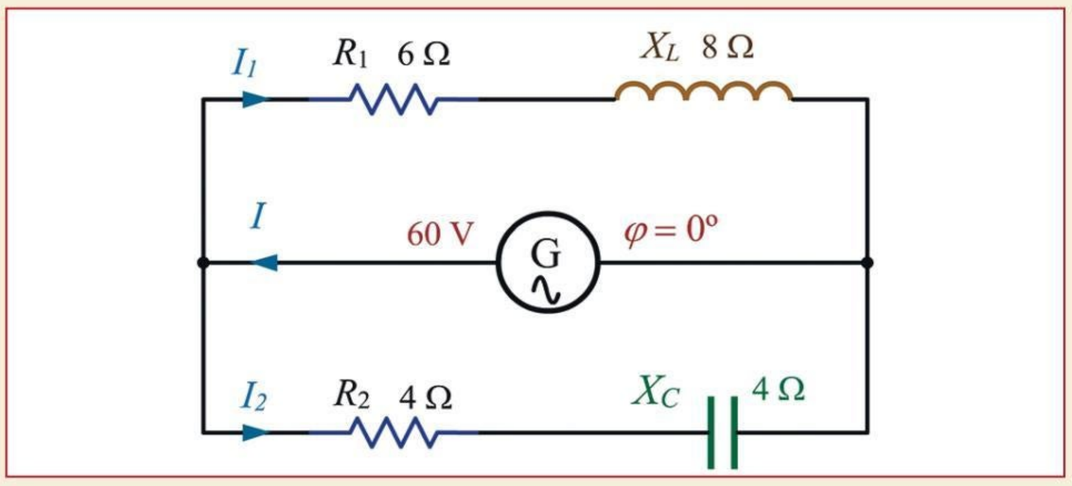


Figura 14.55.

14.22. Tres receptores están conectados en serie a una tensión alternа senoidal de 50 Hz. Las características de los receptores son: el 1.° consume 75 W, con factor de potencia de 0,8 inductivo; el 2.° consume 80 W y 60 VAR capacitivos; y el 3.° es una impedancia de $Z = 4 + j13{,}4\ (\Omega)$. Si un amperímetro colocado en serie con los receptores indica un valor de 5 A, calcula:

a) La potencia total que consumen.

b) La diferencia de potencial entre los extremos del conjunto de las tres cargas.

c) La capacidad de la batería de condensadores necesaria para que colocada en paralelo con el conjunto de receptores dé lugar a un factor de potencia de 0,9 inductivo.

14.23. Una bobina tiene una impedancia $Z = 3 + 4j$ en corriente alterna. Calcula la corriente que circularía al conectarla a una batería de 12 voltios.

14.24. En el circuito de la Figura 14.56, para una frecuencia determinada, la impedancia de cada uno de los elementos es de 10 Ω, siendo la lectura del amperímetro de 10 A. Determina la tensión eficaz *V* de la fuente.

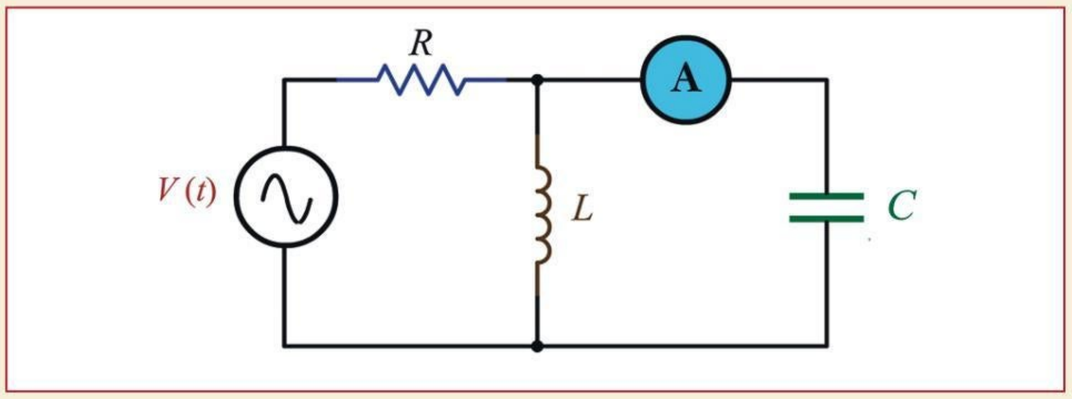


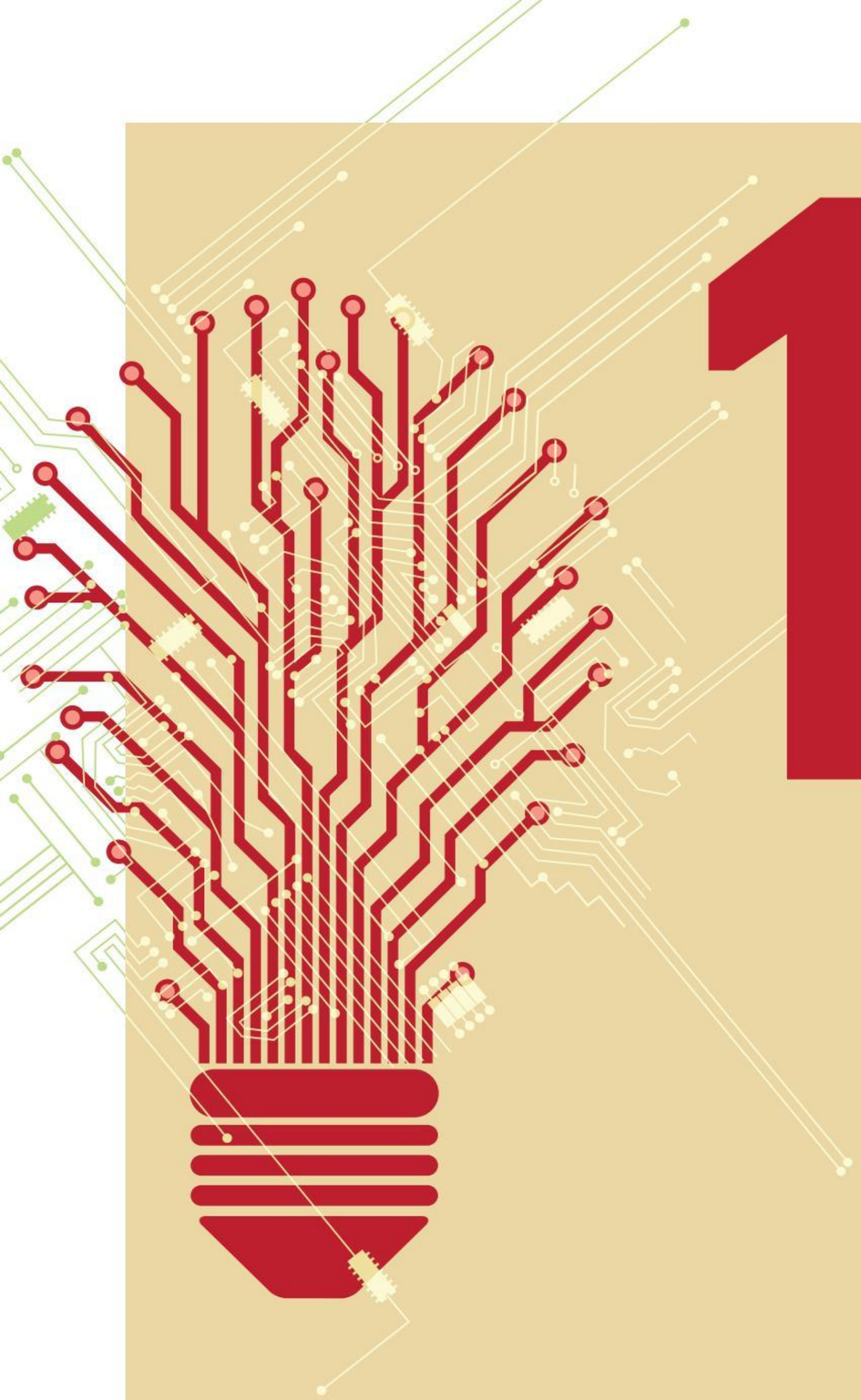
Figura 14.56.

Actividades de ampliación

Con el fin de conseguir una mayor profundización en la materia, se han incluido los enunciados de una serie de «***actividades de evaluación propuestas de ampliación (14)***» para esta unidad que podrás encontrar dentro del MATERIAL WEB elaborado para este texto. Selecciona alguna de estas actividades y encuentra su solución.

© Ediciones Paraninfo

15 Sistemas trifásicos



Contenidos

- **15.1.** Ventajas del uso de sistemas trifásicos
- **15.2.** Generación de un sistema de C.A. trifásica
- **15.3.** Conexión de los receptores
- **15.4.** Corrección del factor de potencia
- **15.5.** Instalaciones trifásicas de varios receptores
- **15.6.** Caída de tensión en las líneas trifásicas de C.A.
- **15.7.** Cálculo de la sección de conductores en líneas con varios receptores según el REBT
- **15.8.** Componentes armónicas en C.A.

A diferencia de los sistemas monofásicos de C.A., estudiados hasta ahora, que utilizan dos conductores eléctricos para su distribución y consumo, los sistemas trifásicos utilizan tres o cuatro conductores. En la práctica, no existen alternadores monofásicos para la producción de grandes cantidades de energía. Las centrales eléctricas se valen de alternadores trifásicos para la generación de la electricidad que posteriormente se consume en el sector industrial y doméstico, tanto en forma trifásica como monofásica. Como estudiaremos a continuación, las líneas monofásicas se obtienen a partir de un sistema trifásico.

Objetivos

- Distinguir los sistemas trifásicos de los monofásicos, describiendo los procesos de generación de la energía eléctrica de los primeros.
- Enumerar las ventajas de los sistemas trifásicos de C.A. frente a otro tipo de sistemas de producción, transporte y consumo de la electricidad.
- Resolver problemas prácticos de instalaciones eléctricas con redes trifásicas de C.A., cálculo de protecciones, sección de conductores, corrección del factor de potencia, etcétera.

15.1. Ventajas del uso de sistemas trifásicos

Lo más característico de los sistemas trifásicos es que las líneas utilizan tres o cuatro hilos (tres fases más el neutro), con lo que se pueden obtener dos tensiones diferentes.

En la Figura 15.1 se muestra el aspecto de una línea de C.A. trifásica. Los conductores marcados con los números 1, 2 y 3 pertenecen a cada una de las tres fases del sistema. El conductor marcado con el número 0 pertenece al neutro. En esta línea se han conectado tanto receptores trifásicos como monofásicos.

Se puede comprobar experimentalmente que en un sistema trifásico existen dos tensiones diferentes. Así, por ejemplo, si tomamos un voltímetro y medimos la tensión que existe entre cualquiera de las fases y el neutro de un sistema de distribución de baja tensión (por ejemplo, en el cuarto de contadores de un edificio de viviendas) obtendremos un resultado de 230 V. Sin embargo, si medimos la tensión que aparece entre cualquiera de las fases, comprobaremos que existe una tensión de 400 V (Figura 15.2).

De aquí se deduce que en un sistema trifásico existen en una misma línea dos tensiones diferentes. También se puede comprobar que la tensión entre fases es $\sqrt{3}$ veces mayor que la que aparece entre las fases y el neutro:

$$\frac{400\ \text{V}}{230\ \text{V}} = \sqrt{3}$$

El hecho de que en una misma línea tengamos dos tensiones resulta muy ventajoso, ya que por ejemplo podemos utilizar la tensión más elevada en el sector industrial y, por seguridad, la tensión más baja en el sector doméstico.

Aparte de esta ventaja que nos aportan los sistemas trifásicos, existen otras muchas que expondremos a continuación:

Tanto los alternadores como los transformadores y motores de C.A. trifásica poseen un mayor rendimiento y, por lo general, son mucho más sencillos y económicos que los monofásicos. Esto se aprecia fundamentalmente en los motores trifásicos de inducción, que son de los más utilizados en el sector industrial. Este motor posee unas características mucho mejores que el monofásico, como: par de arranque muchísimo más fuerte, mejor rendimiento y mejor factor de potencia.

Los sistemas trifásicos consiguen transportar la energía eléctrica con un ahorro considerable en la sección de los conductores.

Todas estas ventajas hacen que en la actualidad toda la energía eléctrica se produzca, transporte, distribuya y consuma en forma de C.A. alterna trifásica.

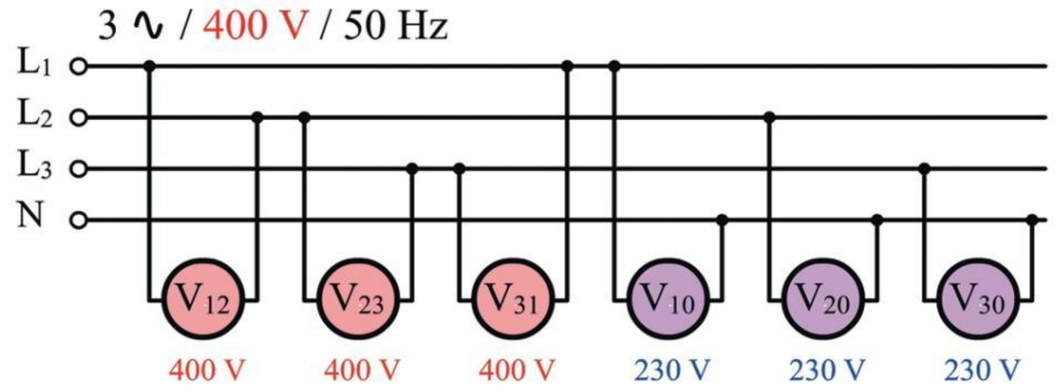


Figura 15.2. Red trifásica de 400/230 V.

15.2. Generación de un sistema de C.A. trifásica

Para conseguir una C.A. monofásica se hacía girar una espira en el seno de un campo magnético fijo.

En un sistema trifásico se hacen girar tres espiras en torno a un eje común en el seno de un campo magnético (Figura 15.3). Estas espiras se sitúan repartidas equitativamente sobre un núcleo cilíndrico de chapas de hierro, es decir, cada:

$$\frac{360^\circ}{3} = 120^\circ$$

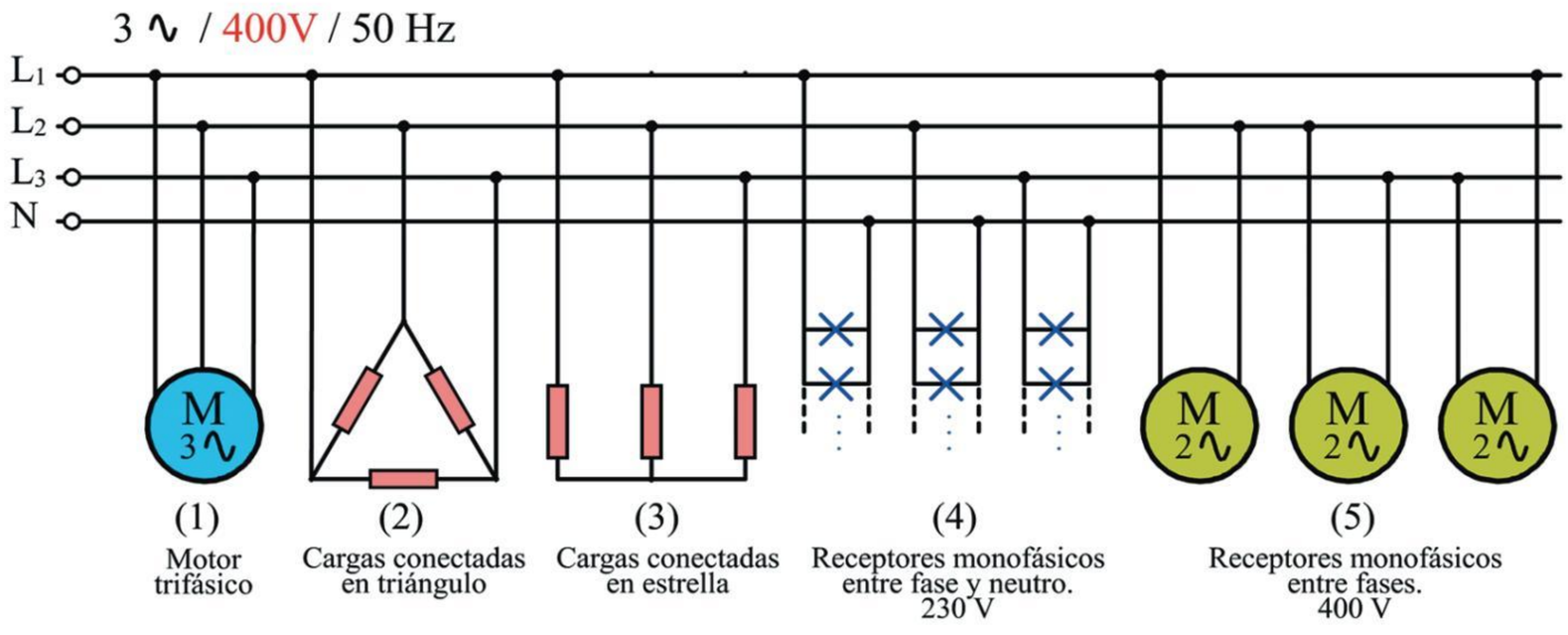


Figura 15.1. Receptores conectados a una línea trifásica.

© Ediciones Paraninfo

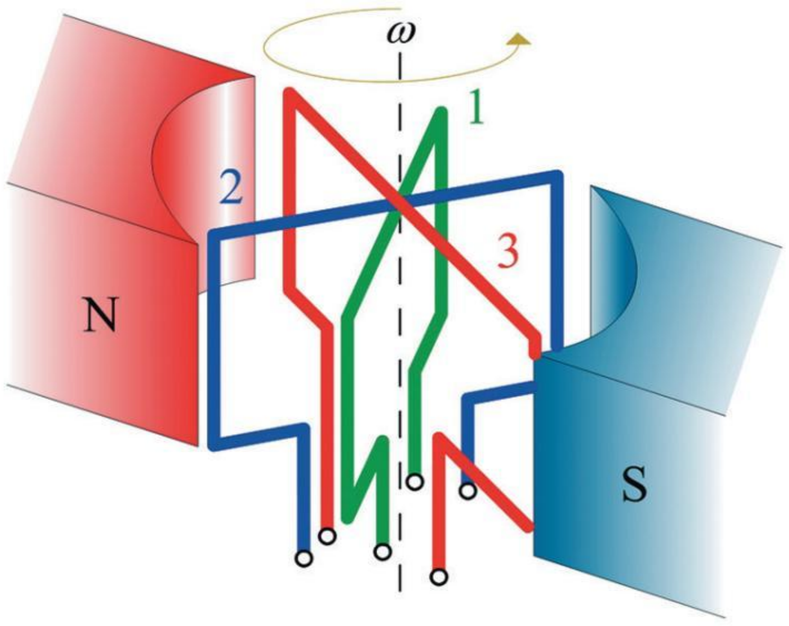


Figura 15.3. Alternador trifásico elemental.

La corriente puede pasar desde las espiras al circuito exterior por medio de un sistema de anillos colectores y escobillas frotantes.

Al moverse cada una de las espiras en el seno del campo magnético se inducirá en cada una de ellas una f. e. m. senoidal del mismo valor eficaz y frecuencia. Al estar situada cada espira 120º en el rotor, cada una de las f. e. m. (e_1, e_2 y e_3) inducidas quedan desfasadas temporalmente entre sí también 120º eléctricos.

El valor instantáneo de cada una de estas f. e. m. tendrá la siguiente forma:

$$e_1 = E_{máx} \text{ sen } \omega t$$
$$e_2 = E_{máx} \text{ sen } (\omega t - 120º)$$
$$e_3 = E_{máx} \text{ sen } (\omega t - 240º)$$

En la Figura 15.4 se muestran los diagramas vectoriales pertenecientes a estas fuerzas electromotrices.

Como se puede comprobar en los diagramas vectoriales, la suma de las tres f. e. m. es cero en cualquier momento. Esto constituye una de las características principales del sistema trifásico.

En los alternadores modernos se sitúan las tres bobinas en el estator, con lo que se evita el complejo sistema de anillos colectores para la extracción de la gran energía eléctrica que se produce en las bobinas (las tensiones son del orden de los 10 a 20 kV y las corrientes de hasta cientos de amperios) (Figura 15.5).

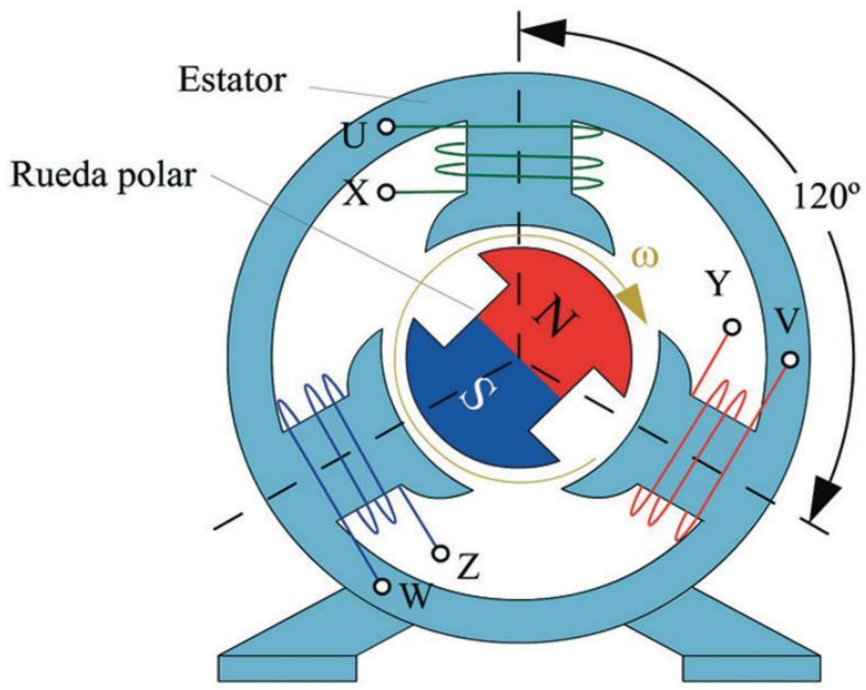


Figura 15.5. Alternador trifásico con campo magnético inductor móvil.

En el rotor se sitúa un potente electroimán que, al ser alimentado por una corriente continua, genera el campo magnético. En su movimiento de rotación, el campo magnético corta los conductores de las tres bobinas consecutivamente, induciendo en ellas las tres f. e. m. desfasadas entre sí 120º.

De las tres bobinas del alternador se consiguen seis terminales. Existen dos formas básicas de conexión de estas bobinas: conexión en estrella y conexión en triángulo (Figura 15.6).

La forma más utilizada, y la que estudiaremos a continuación, es la conexión en estrella, ya que permite el uso del conductor neutro (0) y, con él, el uso de dos tensiones diferentes. El neutro se conecta a tierra junto con el chasis del alternador para garantizar la seguridad eléctrica de las instalaciones.

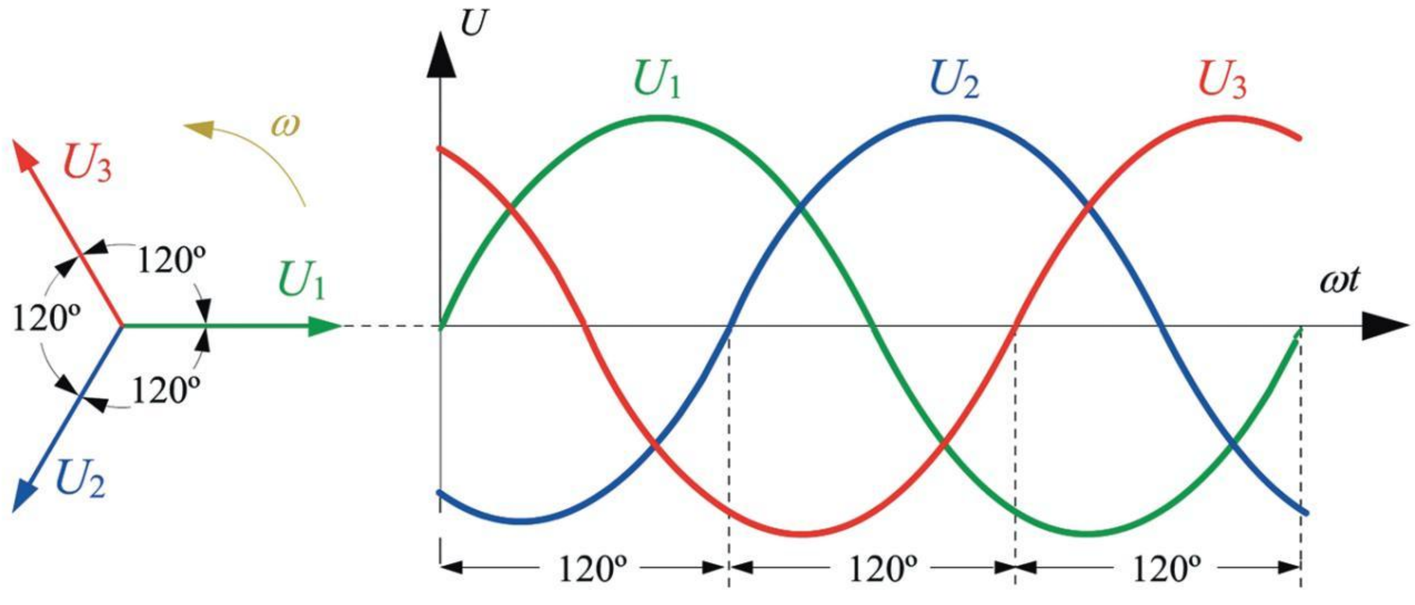


Figura 15.4. Diagrama vectorial de las fuerzas electromotrices generadas por un alternador trifásico.

© Ediciones Paraninfo

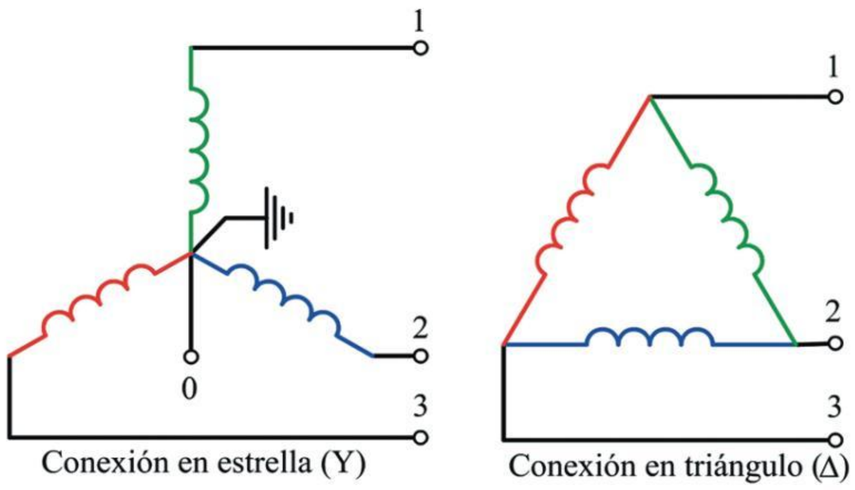


Figura 15.6. Conexiones de los bobinados de un alternador.

15.2.1. Conexión del alternador en estrella

En esta conexión se han unido los tres terminales libres de las bobinas del alternador a un punto común para formar el conductor neutro (0). Las otras partes activas de las bobinas (1), (2) y (3) forman los conductores de cada una de las fases del sistema trifásico. Para hacer un estudio completo de esta conexión, se ha conectado el alternador a un receptor que consta de tres cargas óhmico inductivas (Z_1, Z_2 y Z_3) conectadas entre sí en estrella, tal como se muestra en la Figura 15.7.

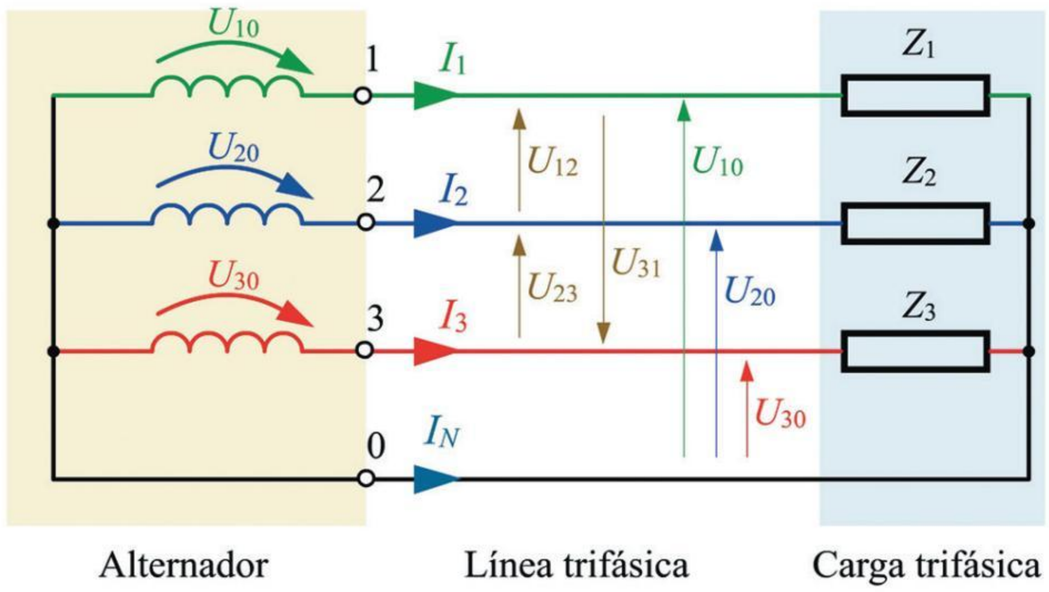


Figura 15.7. Tensiones y corrientes en un alternador en estrella.

Tensiones de fase o simples: cada bobina del alternador trifásico se comporta como un generador monofásico, que genera entre sus terminales una tensión denominada simple o de fase (U_f): U_{10}, U_{20} y U_{30}.

Intensidades de línea: las tensiones de fase quedan aplicadas a cada una de las cargas del receptor, y aparece una corriente por cada conductor de línea (I_L): I_1, I_2 y I_3. La suma de estas tres corrientes dará como resultado la corriente de retorno del neutro I_N. En un principio podría parecer que el conductor del neutro debe conducir una gran corriente eléctrica. Como ya podremos comprobar en los diagramas vectoriales, en el caso de que las cargas sean todas iguales (cargas equilibradas) esta corriente es cero, lo que podría llevar a la anulación de este conductor en determinadas aplicaciones.

Tensiones de línea o compuestas: son las tensiones que aparecen entre cada una de las fases (U_L): U_{12}, U_{23} y U_{31}. Estas tensiones reciben el nombre de tensiones compuestas porque aparecen gracias a la composición de las tensiones de fase, o tensión de línea, porque es la tensión que aparece entre los conductores de la línea trifásica.

Con ayuda de las leyes de Kirchhoff y del diagrama vectorial, demostraremos que todas estas tensiones poseen el mismo valor eficaz y que están desfasadas entre sí 120º, así como que se cumple que $U_L = \sqrt{3}\ U_f$.

Si aplicamos la segunda ley de Kirchhoff a cada una de las mallas que se forman entre las tensiones de fase y las de línea, tendremos que (Figura 15.8):

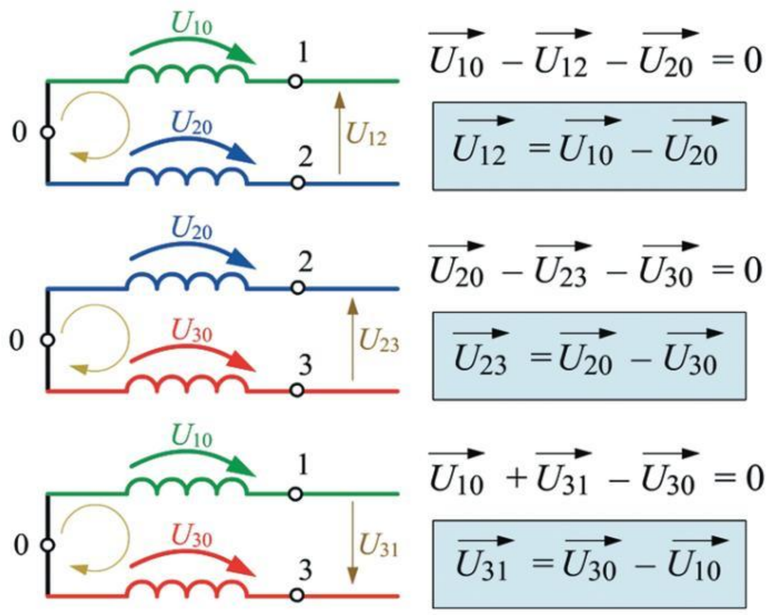


Figura 15.8. Obtención de las tensiones de línea.

Ahora dibujamos el diagrama vectorial (Figura 15.9) con las tensiones de fase desfasadas unas de otras 120º.

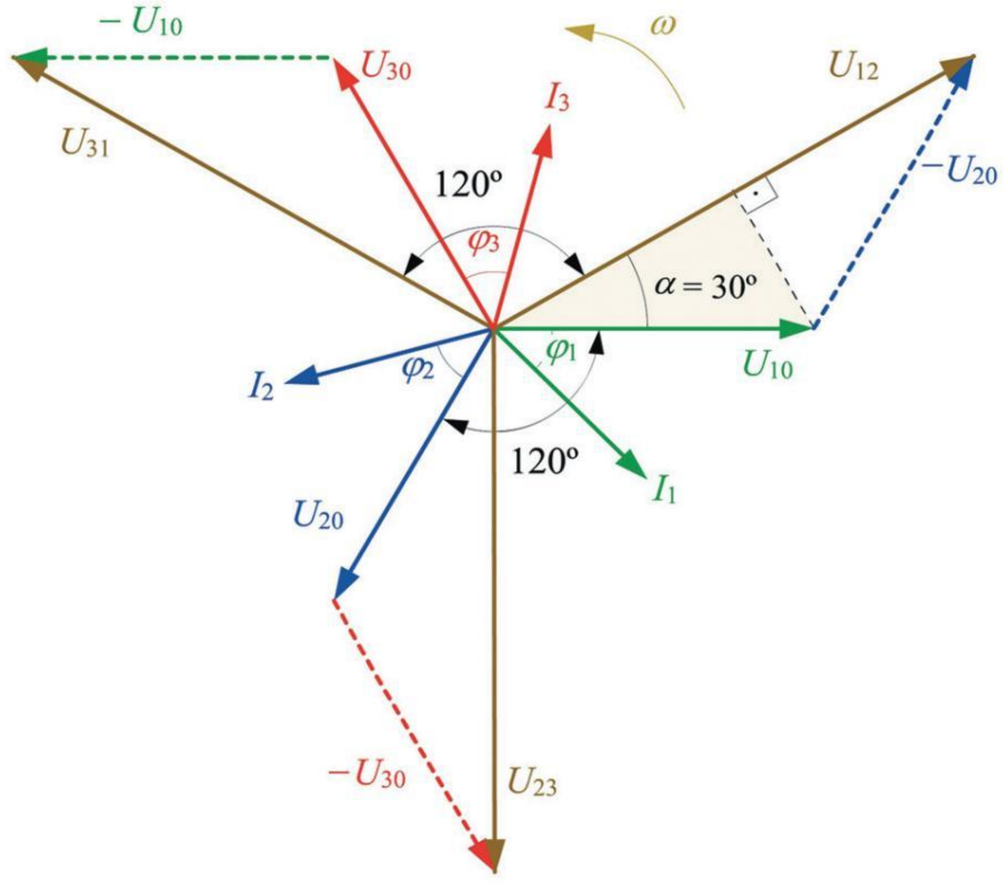
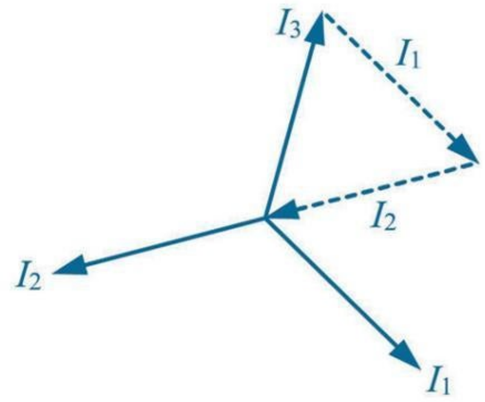


Figura 15.9. Diagrama vectorial de tensiones e intensidades.

© Ediciones Paraninfo

Al ser las cargas de carácter inductivo, se han dibujado las corrientes eléctricas retrasadas de cada una de sus respectivas tensiones de fase un ángulo φ. Como se ha supuesto que las cargas son iguales, las corrientes I_1, I_2 e I_3 son también iguales en valor modular y desfasadas entre sí 120º. Se puede comprobar con facilidad el hecho de que la suma de estas intensidades es cero (Figura 15.10).

Las tensiones de línea se dibujan realizando las operaciones de suma vectorial de sus respectivas tensiones de fase (véanse las relaciones de tensiones obtenidas con anterioridad en la Figura 15.7).



$$\vec{I}_1 + \vec{I}_2 + \vec{I}_3 = \vec{I}_N = 0$$

Figura 15.10. La suma vectorial de las corrientes de un sistema equilibrado es igual a cero.

Se puede comprobar con facilidad que el ángulo que aparece entre las tensiones de fase y las de línea es de 30º (aparece un triángulo isósceles donde $\alpha = \beta$; en el triángulo se cumple que $180º = \alpha + \beta + 120º$, de donde se deduce que $\alpha = 30º$). Aprovechando esta relación y por simple trigonometría determinaremos la relación que existe entre las tensiones de fase y las de línea (Figura 15.11).

$$\cos 30º = \frac{U_{12}/2}{U_{10}} \quad \Rightarrow \quad U_{12} = 2U_{10} \cos 30º$$

$$U_{12} = 2U_{10}\ \sqrt{3}/2 = U_{10}\sqrt{3}$$

en conclusión:

$$U_L = \sqrt{3} \cdot U_f$$

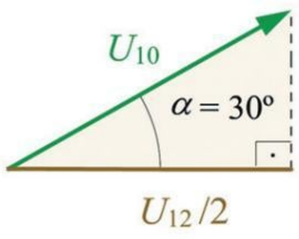


Figura 15.11. Relación entre tensiones de fase y de línea.

Actividad resuelta 15.1

Determina la tensión de línea que corresponde a un sistema trifásico que posee una tensión de fase de 133 V.

Solución:

$$U_L = \sqrt{3}\ U_f = \sqrt{3} \cdot 133 = 230 \text{ V}$$

$\Rightarrow$ ¿y para $U_f = 230$ V?: $U_L = \ldots$

15.3. Conexión de los receptores

Una vez que disponemos de un sistema trifásico, podemos conectarle cargas conectadas entre sí en triángulo, en estrella, o incluso cargas monofásicas conectadas entre fase y neutro o entre fases (Figura 15.1). En los primeros casos se tratará, en la mayoría de las ocasiones, de cargas trifásicas equilibradas como, por ejemplo, motores trifásicos, hornos trifásicos, etc. Las cargas monofásicas vendrían constituidas por lámparas y todo tipo de receptores monofásicos. En este caso conviene siempre repartir por igual las cargas monofásicas entre cada una de las fases; en caso contrario el sistema sería desequilibrado, produciéndose diferentes corrientes por cada fase, que desestabilizan notablemente el sistema.

Seguidamente estudiaremos las cargas trifásicas conectadas en estrella y en triángulo, y demostraremos que la potencia de estas conexiones para cargas equilibradas es siempre igual a:

$$P = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \cos \varphi$$

P = Potencia activa de la carga trifásica.
U_L = Tensión de línea.
I_L = Intensidad de línea.
$\cos \varphi$ = Factor de potencia de la carga.

15.3.1. Carga equilibrada en estrella

En la Figura 15.12 se puede apreciar un receptor trifásico con tres cargas conectadas en estrella.

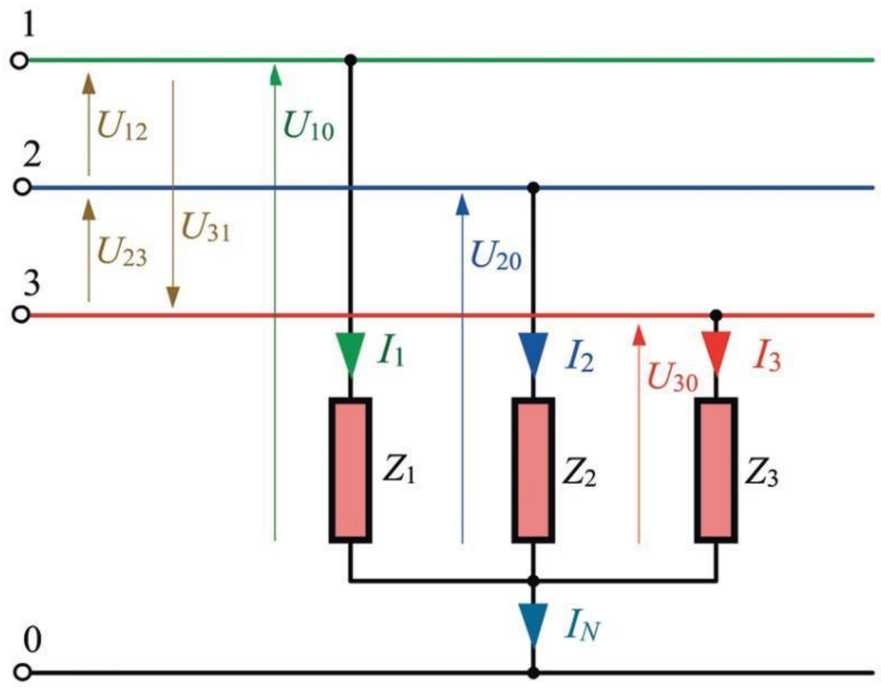


Figura 15.12. Carga equilibrada en estrella.

© Ediciones Paraninfo

Como el sistema es equilibrado:

$$Z_1 \angle \varphi_1 = Z_2 \angle \varphi_2 = Z_3 \angle \varphi_3 = Z \angle \varphi$$

Aplicando la ley de Ohm a cada una de estas cargas tenemos que las corrientes por cada fase de las mismas son:

$$\vec{I}_1 = \frac{\vec{U}_{10}}{Z_1 \angle \varphi_1} \qquad \vec{I}_2 = \frac{\vec{U}_{20}}{Z_2 \angle \varphi_2} \qquad \vec{I}_3 = \frac{\vec{U}_{30}}{Z_3 \angle \varphi_3}$$

Como las tensiones de fase están desfasadas 120º, las corrientes también quedarán desfasadas entre sí 120º y un ángulo φ respecto a cada una de su respectiva tensión de fase. Como las impedancias y las tensiones aplicadas a las corrientes son del mismo valor modular, las corrientes también lo serán:

$$|I_1| = |I_2| = |I_3| = I_L$$

Como se podrá apreciar, al igual que ocurría con el alternador conectado en estrella (Figura 15.10), en el diagrama vectorial de la Figura 15.13, correspondiente a las magnitudes de una carga equilibrada en estrella, se cumple que:

$$\vec{I}_1 + \vec{I}_2 + \vec{I}_3 = \vec{I}_N = 0$$

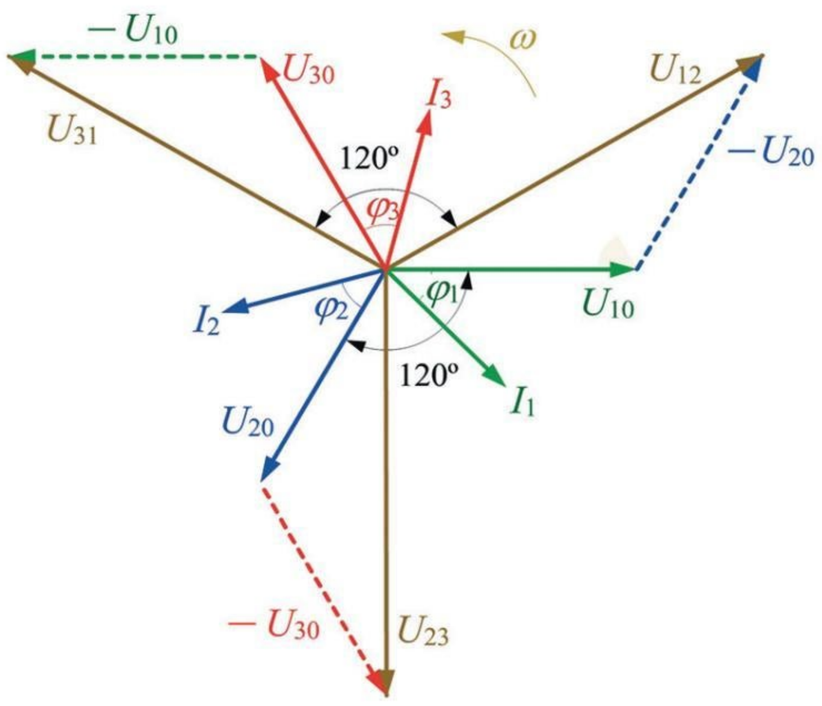


Figura 15.13. Diagrama de tensiones y corrientes en una carga en estrella.

En este caso se puede eliminar el neutro. Al hacerlo se forma un neutro artificial en el punto común de las cargas conectadas en estrella, que permite que se mantenga la tensión de fase entre las fases y el neutro sin necesidad del conductor neutro. Por supuesto, esto solo ocurre cuando las cargas están equilibradas.

Potencia del sistema trifásico: para calcular la potencia que desarrolla la carga bastará con sumar la potencia que aparece en cada una de las tres cargas monofásicas, es decir:

$$P = U_{10}\, I_1 \cos \varphi_1 + U_{20}\, I_2 \cos \varphi_2 + U_{30}\, I_3 \cos \varphi_3$$

En un sistema equilibrado, tanto las tensiones de fase, como las corrientes de fase, como los factores de potencia son iguales (para cargas en estrella la corriente de fase y de línea es la misma), por lo que se puede afirmar que:

$$P = 3 U_f\, I_L \cos \varphi$$

como:

$$U_f = \frac{U_L}{\sqrt{3}} \quad \Rightarrow \quad P = 3 \frac{U_L}{\sqrt{3}} I_L \cos \varphi \quad \Rightarrow$$

$$P = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cos \varphi$$

P = Potencia activa de la carga trifásica.
U_L = Tensión de línea.
I_L = Intensidad de línea.
$\cos \varphi$ = Factor de potencia de la carga.

Para el cálculo de la potencia reactiva y aparente, el procedimiento de demostración sería el mismo, cumpliéndose que:

$$Q = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \operatorname{sen} \varphi \qquad S = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L$$

Actividad resuelta 15.2

Un motor trifásico posee sus bobinas conectadas en estrella. Determina la corriente eléctrica que absorberá de la línea si al conectarlo a una red con una tensión de línea de 400 V desarrolla una potencia de 10 kW con un *FP* de 0,8. Averigua la potencia reactiva y aparente del motor (véase circuito equivalente en la Figura 15.14).

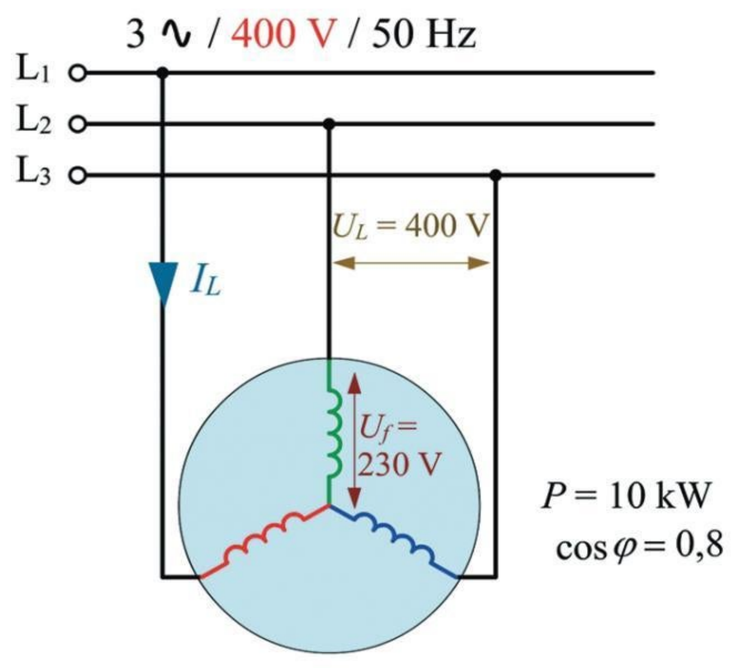


Figura 15.14.

© Ediciones Paraninfo

Solución:

Como los motores son cargas equilibradas no será necesario conectar el neutro al punto común de la estrella para que aparezca la tensión de fase entre el neutro y cualquiera de las fases.

Para determinar la corriente aplicamos la fórmula general de potencia activa para sistemas trifásicos:

$$P = \sqrt{3}\, U_L\, I_L \cos \varphi \quad \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \quad I_L = \frac{P}{\sqrt{3}\, U_L \cos \varphi} = \frac{10.000}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0{,}8} = 18 \text{ A}$$

$$\varphi = \text{arc cos } 0{,}8 = 36{,}9^\circ$$

$$Q = \sqrt{3}\, U_L\, I_L \text{ sen } \varphi = \sqrt{3} \cdot 400 \cdot 18 \cdot \text{sen } 36{,}9^\circ = 7.488 \text{ VAR}$$

$$S = \sqrt{3}\, U_L\, I_L = \ldots = 12.471 \text{ VA}$$

¿Qué tensión y qué corriente aparecen en cada una de las bobinas del motor?

Como las bobinas están conectadas en estrella y son cargas equilibradas, aparece en cada una de ellas la tensión de fase, es decir:

$$U_f = \frac{U_L}{\sqrt{3}} = \frac{400}{\sqrt{3}} = 230 \text{ V}$$

La corriente que aparece en cada bobina (corriente de fase I_f) es la misma que aparece en la línea: 18 A.

Actividad resuelta 15.3

Se conectan en estrella tres bobinas iguales a una red trifásica con una tensión de línea de 230 V, 50 Hz. Cada una de las bobinas posee 10 Ω de resistencia óhmica y 30 Ω de reactancia inductiva (Figura 15.15). Calcula: I_L, cos φ, P, Q y S.

Solución:

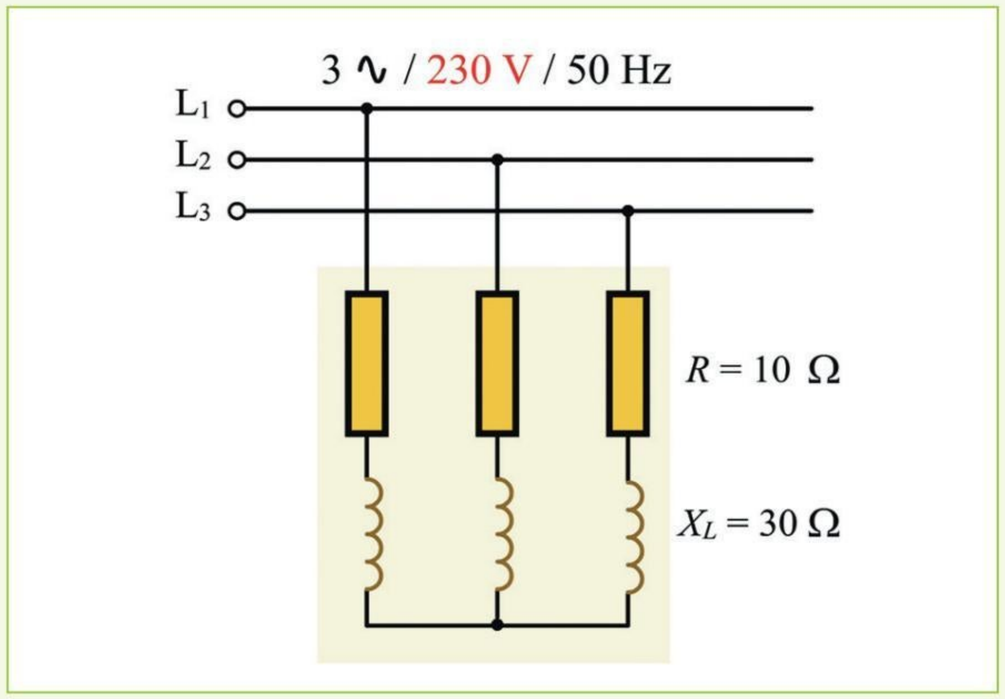


Figura 15.15.

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{10^2 + 30^2} = 31{,}6\ \Omega$$

$$\varphi = \text{arc tg } \frac{X_L}{R} = \text{arc tg } \frac{30}{10} = 71{,}6^\circ$$

Cada una de estas impedancias está sometida a la tensión de fase, luego la corriente que se establecerá por cada una de ellas y por la línea será:

$$I_L = \frac{U_F}{Z} = \frac{132{,}8}{31{,}6} = 4{,}2 \text{ A}$$

$$(U_f = U_L/\sqrt{3} = 230/\sqrt{3} = 132{,}8 \text{ V})$$

Aplicando las fórmulas generales de potencias, obtenemos:

$$P = \sqrt{3}\, U_L\, I_L \cos \varphi = \ldots = 528 \text{ W}$$

$$Q = \sqrt{3}\, U_L\, I_L \text{ sen } \varphi = \ldots = 1.588 \text{ VAR}$$

$$S = \sqrt{3}\, U_L\, I_L = \ldots = 1.673 \text{ VA}$$

$$FP = \cos \varphi = \cos 71{,}6^\circ = 0{,}32$$

Actividad resuelta 15.4

Se desea conectar a una red trifásica, con neutro y con una tensión de línea de 400 V, 30 lámparas fluorescentes de 40 W, 230 V, cos φ = 0,6. Muestra la conexión de las lámparas para conseguir que la carga esté equilibrada y averigua la corriente por la línea que las alimenta, así como la potencia del conjunto y por fase.

Solución:

Como las lámparas funcionan a 230 V, es decir, a la tensión de fase ($U_f = 400/\sqrt{3} = 230$ V), se han conectado 3 grupos de 10 lámparas entre cada fase y neutro con el fin de repartir equitativamente las cargas (Figura 15.16).

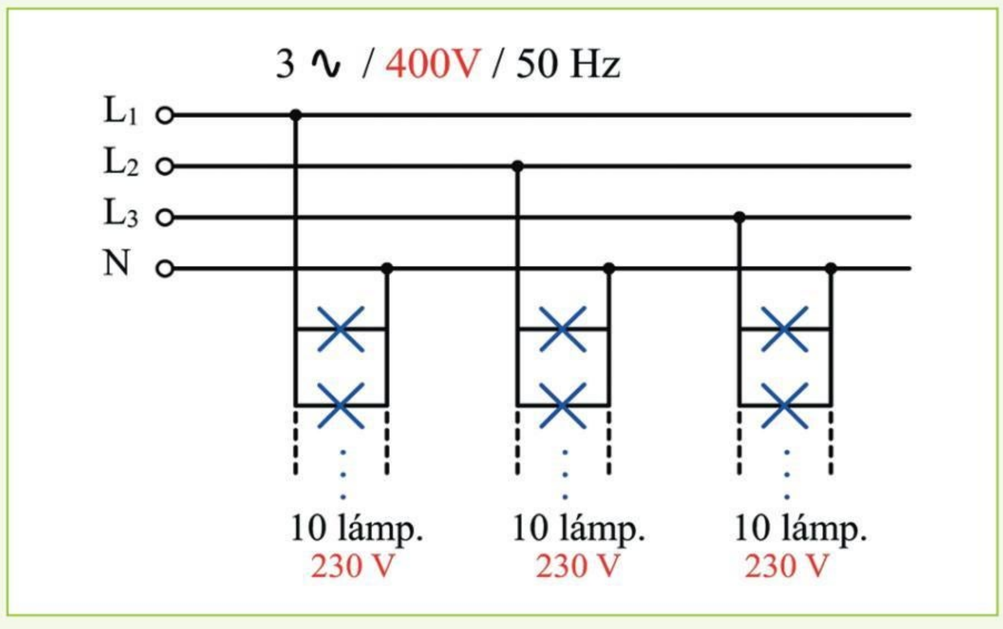


Figura 15.16.

La potencia conectada a cada fase será entonces:

$$P' = 10 \cdot 40 \text{ W} = 400 \text{ W}$$

© Ediciones Paraninfo

La potencia total conectada a la red trifásica es de:

$$P = 30 \cdot 40 \text{ W} = 1.200 \text{ W}$$

Para calcular la intensidad de línea nos valemos de la fórmula general de potencia trifásica:

$$P = \sqrt{3}\, U_L\, I_L \cos \varphi \quad \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \quad I_L = \frac{P}{\sqrt{3}\, U_L \cos \varphi} = \frac{1.200}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0{,}6} = 2{,}87 \text{ A}$$

Esta corriente también podríamos haberla averiguado tomando la potencia de una de las fases:

$$P' = U_f\, I_f \cos \varphi \quad \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \quad I_f = \frac{P'}{U_f \cos \varphi} = \frac{400}{230 \cdot 0{,}6} = 2{,}87 \text{ A}$$

¿Se podría eliminar la conexión del neutro en las lámparas?

Evidentemente, mientras el sistema permanezca equilibrado, la tensión que aparecerá entre el punto común de las lámparas y la fase será la de fase. Ahora bien, en el momento en que alguna lámpara se funda, el sistema se desequilibrará, con la consecuencia de que la tensión de fase no se mantendrá en su valor nominal. La única forma de evitar este hecho es tener siempre conectado el neutro en estos casos.

15.3.2. Carga equilibrada en triángulo

Al conectar las cargas en triángulo (Figura 15.17), estas quedan sometidas a cada una de las respectivas tensiones de línea. Por cada una de las cargas aparece una corriente: I_{12}, I_{23} e I_{31}, que llamaremos **corriente de fase (I_f).**

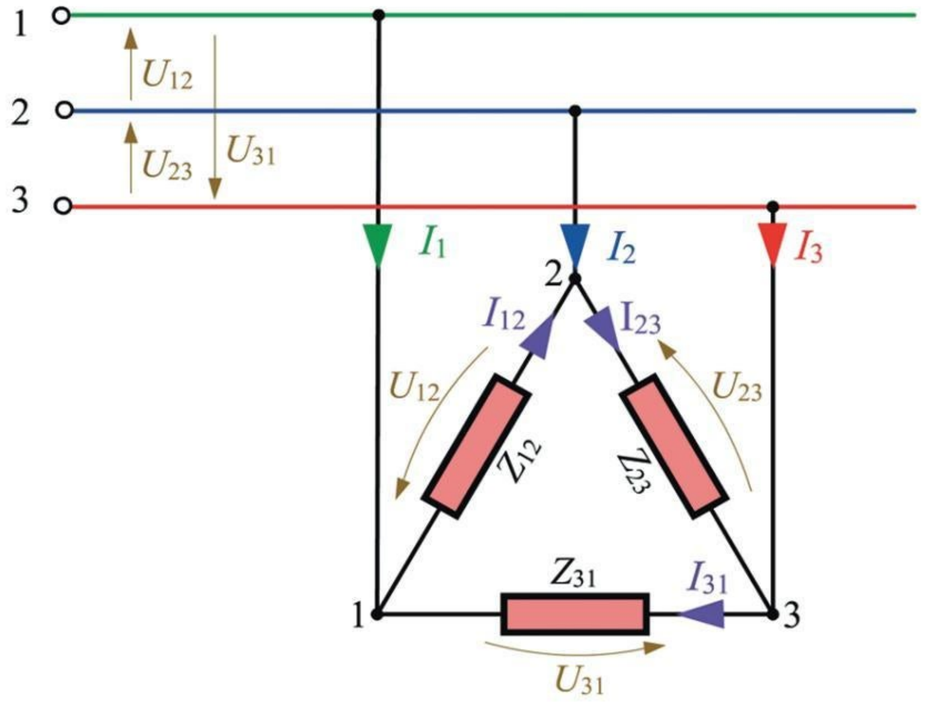


Figura 15.17. Carga equilibrada en triángulo.

Como el sistema es equilibrado:

$$Z_{12} \angle \varphi_{12} = Z_{23} \angle \varphi_{23} = Z_{31} \angle \varphi_{31} = Z \angle \varphi$$

$$|I_1| = |I_2| = |I_3| = I_L$$

$$\vec{I}_{12} = \frac{\vec{U}_{12}}{Z_{12} \angle \varphi_{12}} \qquad \vec{I}_{23} = \frac{\vec{U}_{23}}{Z_{23} \angle \varphi_{23}}$$

$$\vec{I}_{31} = \frac{\vec{U}_{31}}{Z_{31} \angle \varphi_{31}}$$

Como las tensiones de línea están desfasadas entre sí 120º, las corrientes también quedarán desfasadas entre sí 120º y un ángulo φ respecto a cada una de su respectiva tensión de línea. Como las impedancias y las tensiones aplicadas a las corrientes son del mismo valor modular, las corrientes también lo serán:

$$|I_{12}| = |I_{23}| = |I_{31}| = I_f$$

En la línea que alimenta a las cargas aparecen otras tres corrientes: I_1, I_2 e I_3, que se corresponden con las corrientes de línea (I_L). Para determinar la relación de estas corrientes con las de fase vamos a aplicar la primera ley de Kirchhoff a cada uno de los nudos que se forman en las conexiones de las cargas en triángulo:

$$\text{Nudo 1} \quad \Rightarrow \quad \vec{I}_1 = \vec{I}_{12} - \vec{I}_{31}$$

$$\text{Nudo 2} \quad \Rightarrow \quad \vec{I}_2 = \vec{I}_{23} - \vec{I}_{12}$$

$$\text{Nudo 3} \quad \Rightarrow \quad \vec{I}_3 = \vec{I}_{31} - \vec{I}_{23}$$

Ahora dibujamos el diagrama vectorial con las tensiones de línea desfasadas entre sí 120º (Figura 15.18). Al suponer las cargas de carácter inductivo, se han dibujado las corrientes de fase retrasadas de cada una de sus respectivas tensiones de línea un ángulo φ.

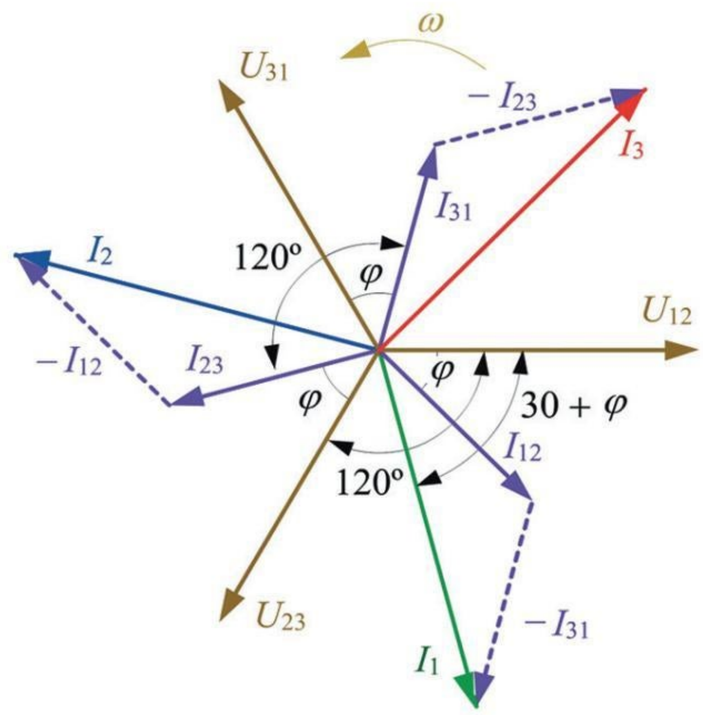


Figura 15.18. Diagrama de tensiones y corrientes en una carga en triángulo.

© Ediciones Paraninfo

Las corrientes de línea se dibujan realizando las operaciones de suma vectorial de sus respectivas intensidades de fase (véanse las relaciones obtenidas antes en los nudos).

Se puede comprobar con facilidad que el ángulo que aparece entre las corrientes de fase y las de línea es de 30º (aparece un triángulo isósceles donde $\alpha = \beta$; en el triángulo se cumple que $180º = \alpha + \beta + 120º$, de donde $\alpha = 30º$). Aprovechando esta relación, y por simple trigonometría, determinaremos la relación que existe entre las corrientes de fase y las de línea (Figura 15.19).

$$\cos 30º = \frac{I_1/2}{I_{12}} \quad \Rightarrow \quad I_1 = 2\, I_{12} \cos 30º$$

$$I_1 = 2I_{12}\sqrt{3}/2 = I_{12}\sqrt{3}$$

en conclusión:

$$I_L = \sqrt{3} \cdot I_f$$

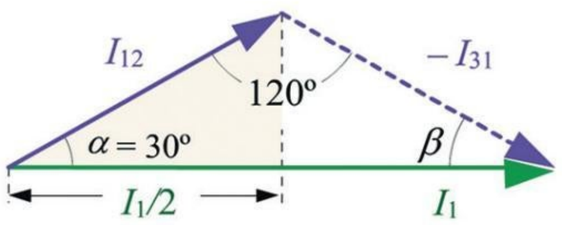


Figura 15.19. Relación entre las corrientes de fase y de línea.

Las corrientes de línea poseen todas un valor igual en módulo, están desfasadas entre sí un ángulo de 120º y son $\sqrt{3}$ veces mayores que las corrientes de fase.

Potencia del sistema trifásico: para calcular la potencia que desarrolla la carga conectada en triángulo bastará con sumar la potencia que aparece en cada una de las tres cargas monofásicas, es decir:

$$P = U_{12}\, I_{12} \cos \varphi_{12} + U_{23}\, I_{23} \cos \varphi_{23} + U_{31}\, I_{31} \cos \varphi_{31}$$

En un sistema equilibrado, tanto las tres tensiones de línea, como las tres corrientes de fase y de línea, así como los factores de potencia son iguales.

$$P = 3U_L\, I_f \cos \varphi$$

como:

$$I_f = \frac{I_L}{\sqrt{3}} \quad \Rightarrow \quad P = 3\, U_L \frac{I_L}{\sqrt{3}} \cos \varphi \quad \Rightarrow$$

$$P = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \cos \varphi$$

P = Potencia activa de la carga trifásica.
U_L = Tensión de línea.
I_L = Intensidad de línea.
$\cos \varphi$ = Factor de potencia de la carga.

Para el cálculo de la potencia reactiva el procedimiento de demostración sería el mismo, por lo que se cumple que:

$$Q = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \text{sen } \varphi \qquad S = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L$$

En conclusión, las fórmulas para el cálculo de la potencia en un sistema trifásico equilibrado son las mismas para cargas conectadas en estrella que en triángulo.

Actividad resuelta 15.5

Un motor trifásico posee sus bobinas conectadas en triángulo. Determina la corriente eléctrica que absorberá de la línea si al conectarlo a una red, con una tensión entre fases de 400 V, desarrolla una potencia de 15 kW con un *FP* de 0,7. Averigua la potencia reactiva y aparente del motor.

Solución:

Para determinar la corriente de línea aplicamos la fórmula general de potencia activa para sistemas trifásicos:

$$P = \sqrt{3}\, U_L\, I_L \cos \varphi \quad \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \quad I_L = \frac{P}{\sqrt{3}\, U_L \cos \varphi} = \frac{15.000}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0{,}7} = 31 \text{ A}$$

$$\varphi = \text{arc cos } 0{,}7 = 45{,}6º$$

$$Q = \sqrt{3}\, U_L\, I_L \text{ sen } \varphi = \ldots = 15.345 \text{ VAR}$$

$$S = \sqrt{3}\, U_L\, I_L = \ldots = 21.477 \text{ VA}$$

¿Qué tensión y qué corriente aparecen en cada una de las bobinas del motor? (Figura 15.20).

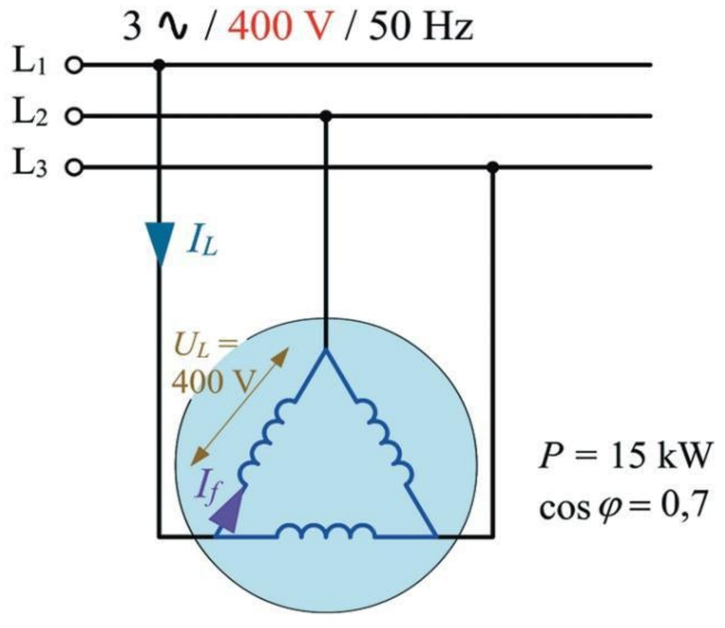


Figura 15.20.

© Ediciones Paraninfo

Como las bobinas están conectadas en triángulo, aparece en cada una de ellas la tensión de línea, es decir: 400 V.

La corriente que aparece en cada bobina (corriente de fase) es:

$$I_f = \frac{I_L}{\sqrt{3}} = \frac{31}{\sqrt{3}} = 17{,}9 \text{ A}$$

Actividad resuelta 15.6

Se conectan en triángulo las tres bobinas de la Actividad resuelta 15.3 a una red trifásica de 400 V, 50 Hz (Figura 15.21). Calcula: I_f, I_L, cos φ, P, Q y S.

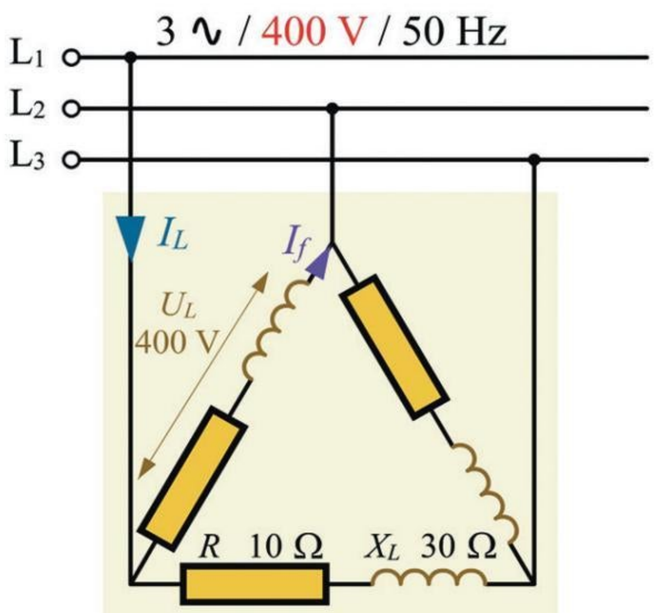


Figura 15.21.

Solución:

Al calcular la impedancia correspondiente a cada una de las cargas, en la Actividad resuelta 15.3, obtuvimos el resultado: $Z = 31{,}6 \angle 71{,}6°$.

Cada una de estas impedancias está sometida a la tensión de línea, luego la corriente de fase que se establecerá por cada una de ellas será:

$$I_f = \frac{U_L}{Z} = \frac{400}{31{,}6} = 12{,}7 \text{ A}$$

$$I_L = I_f \sqrt{3} = 12{,}7 \cdot \sqrt{3} = 22 \text{ A}$$

Aplicando las fórmulas generales de potencias, obtenemos:

$$P = \sqrt{3}\, U_L\, I_L \cos \varphi = \ldots = 4.811 \text{ W}$$

$$Q = \sqrt{3}\, U_L\, I_L \operatorname{sen} \varphi = \ldots = 14.463 \text{ VAR}$$

$$S = \sqrt{3}\, U_L\, I_L = \ldots = 15.242 \text{ VA}$$

$$FP = \cos \varphi = \cos 71{,}6° = 0{,}32$$

Actividad resuelta 15.7

Se desea conectar 60 lámparas incandescentes de 100 W, 230 V, a una red trifásica con una tensión de línea de 230 V. Muestra la conexión de las lámparas para conseguir que la carga esté equilibrada, y averigua la corriente por la línea que las alimenta, así como la potencia del conjunto y por fase.

Solución:

Como las lámparas funcionan a 230 V, es decir, a la tensión de línea, se han conectado 3 grupos de 20 lámparas entre cada dos fases con el fin de repartir equitativamente las cargas (Figura 15.22).

La potencia conectada a cada fase será entonces:

$$P' = 20 \cdot 100 \text{ W} = 2.000 \text{ W}$$

La potencia total conectada a la red trifásica es:

$$P = 60 \cdot 100 \text{ W} = 6.000 \text{ W}$$

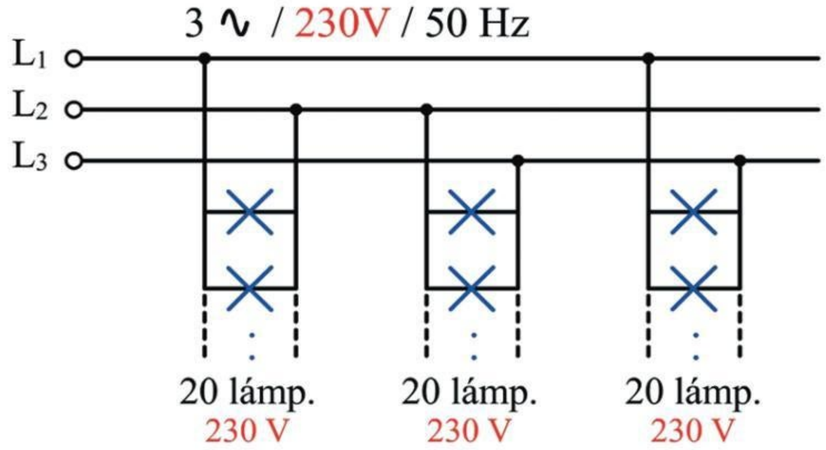


Figura 15.22.

Para calcular la intensidad de línea nos valemos de la fórmula general de potencia trifásica:

$$I_L = \frac{P}{\sqrt{3}\, U_L \cos \varphi} = \frac{6.000}{\sqrt{3} \cdot 230 \cdot 1} = 15{,}1 \text{ A}$$

(Las lámparas incandescentes se consideran receptores resistivos puros $\Rightarrow \cos \varphi = 1$).

Esta corriente también podríamos haberla averiguado tomando la potencia de una de las fases:

$$P' = U_f\, I_f \cos \varphi \quad \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \quad I_f = \frac{P'}{U_f \cos \varphi} = \frac{2.000}{230 \cdot 1} = 8{,}7 \text{ A}$$

$$I_L = \sqrt{3}\, I_f = \sqrt{3} \cdot 8{,}7 = 15{,}1 \text{ VA}$$

© Ediciones Paraninfo

15.4. Corrección del factor de potencia

Por las mismas razones por las que se mejora el factor de potencia en las redes de C.A. monofásicas, también se lleva a cabo en las trifásicas. La corrección se lleva a cabo mediante baterías de condensadores, conectados en estrella o en triángulo, que se acoplan en derivación a la red eléctrica a compensar (Figura 15.23).

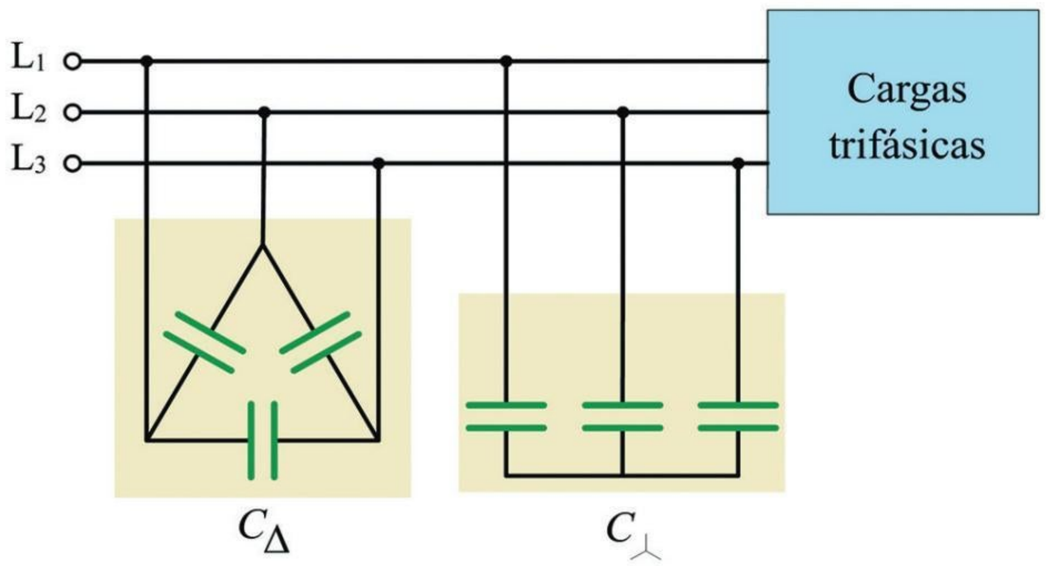


Figura 15.23. Batería de condensadores en triángulo y en estrella para la mejora del factor de potencia.

La forma más habitual de compensar la energía reactiva es mediante baterías automáticas trifásicas de condensadores (véase la Figura 13.37 en la Unidad 13). En la práctica, lo habitual es montar los tres condensadores, conectados en estrella o triángulo, dentro de una misma envolvente; de esta forma surge lo que se conoce por el nombre de condensadores trifásicos para la mejora del factor de potencia (Figura 15.24).

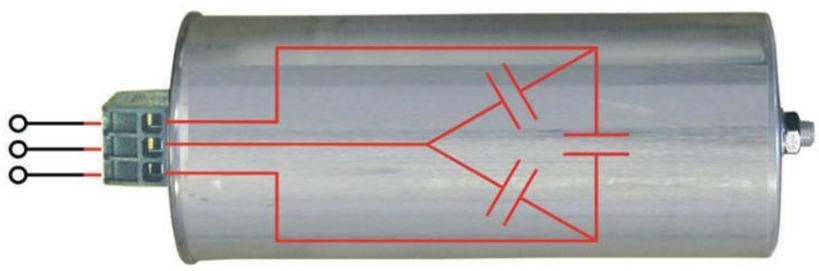


Figura 15.24. Condensador trifásico compuesto por tres condensadores conectados en triángulo.

El procedimiento a seguir para el cálculo de la batería de condensadores trifásica es prácticamente igual que el llevado a cabo para las monofásicas. Dependiendo de que conectemos las baterías en estrella o en triángulo cambiarán algunas de sus características.

Actividad resuelta 15.8

El alumbrado de una sala de dibujo se compone de 60 lámparas fluorescentes de 40 W/230 V en BF (bajo factor de potencia) con un FP de 0,6. Las lámparas se han conectado de forma equilibrada a una red trifásica de 400 V de tensión de línea (Figura 15.25). Dimensiona la batería de condensadores en estrella que será necesario conectar a la línea general que alimenta a esta instalación para corregir el FP a 0,97.

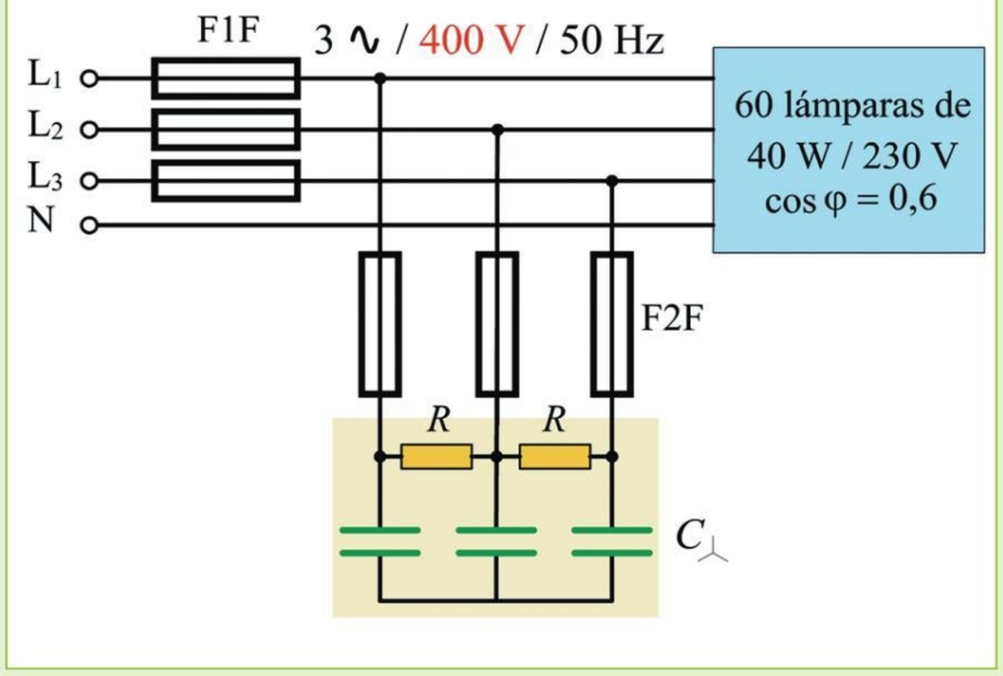


Figura 15.25.

Averigua el calibre de los fusibles generales. ¿Cuál será el calibre de los fusibles para la protección de la batería de condensadores? ¿En cuánto se ha conseguido reducir la intensidad en la instalación al corregir el *FP*?

Solución:

La potencia total instalada es 60 · 40 W = 2.400 W.

$$\varphi = \text{arc cos } 0{,}6 = 53{,}13°$$

$$\varphi = \text{arc cos } 0{,}97 = 14{,}07°$$

$$Q_C = P\,(\text{tg}\,\varphi - \text{tg}\,\varphi') = 2.400\,(\text{tg } 53{,}13° - \text{tg } 14{,}07°) =$$
$$= 2.598 \text{ VAR}$$

La potencia de cada una de las fases de la batería de condensadores será la tercera parte de la total:

$$Q'_C = \frac{2.598}{3} = 866 \text{ VAR}$$

La corriente de fase de cada condensador la calculamos partiendo de esta potencia y de que el condensador está sometido a la tensión de fase por estar conectado en estrella:

$$Q'_C = U_f\, I_{fC} \quad \Rightarrow \quad I_{fC} = \frac{Q'_C}{U_f} = \frac{866}{230} = 3{,}77 \text{ A}$$

Ahora ya podemos calcular la reactancia y la capacidad del condensador:

$$X_C = \frac{U_f}{I_{fC}} = \frac{230}{3{,}77} = 61\ \Omega$$

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 61} = 52 \cdot 10^{-6} \text{ F}$$

© Ediciones Paraninfo

La batería trifásica deberá poseer una potencia reactiva de 2.598 VAR a 400 V y está compuesta por 3 condensadores de 52 µF a 230 V conectados en estrella.

Nota: Las resistencias de descarga, que se han conectado entre las fases de la batería de condensadores, son para que los condensadores se descarguen por ellas cuando se desconecta la misma de la red, tal como se indica en el Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión **ITC-BT 48:** «Si la carga residual de los condensadores pudiera poner en peligro a las personas, llevarán un dispositivo automático de descarga o se colocará una inscripción que advierta este peligro».

Consulta en el REBT la Instrucción Técnica ITC-BT 48.

Calibre de los fusibles F2F de la batería de condensadores:

$$3{,}77 \cdot 1{,}8 \text{ veces} = 6{,}8 \text{ A}$$

por lo que tomaremos un calibre de F2F (10 A).

Calibre de los fusibles generales de línea F1F que alimenta a las lámparas de descarga:

$$I_L = \frac{P}{\sqrt{3}\, U_L \cos \varphi} = \frac{2.400}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0{,}6} = 5{,}8 \text{ A}$$

Calibre de los fusibles F1F = $1{,}8 I_L = 1{,}8 \cdot 5{,}8 = 10{,}4$ A, por lo que tomaremos un calibre de F2F (16 A).

Nota: El factor de multiplicación de 1,8 veces se debe a la recomendación que se da en el Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión para evitar la desconexión intempestiva de las protecciones por la punta de conexión de las lámparas de descarga. **ITC-BT 44:** «Para receptores con lámparas de descarga, la carga mínima prevista en voltiamperios será de 1,8 veces la potencia en vatios de las lámparas».

Consulta en el REBT la Instrucción Técnica ITC-BT 44.

La intensidad por la línea cuando se conecta la batería automática de condensadores será de:

$$I'_L = \frac{P}{\sqrt{3}\, U_L \cos \varphi'} = \frac{2.400}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0{,}97} = 3{,}6 \text{ A}$$

Se ha conseguido una reducción de corriente del:

$$\frac{(5{,}8 - 3{,}6)}{5{,}8} \cdot 100 = 38\ \%$$

Actividad resuelta 15.9

Determina las características de la batería de condensadores en triángulo que sería necesario conectar para corregir el *FP* de la Actividad resuelta 15.8 (Figura 15.26).

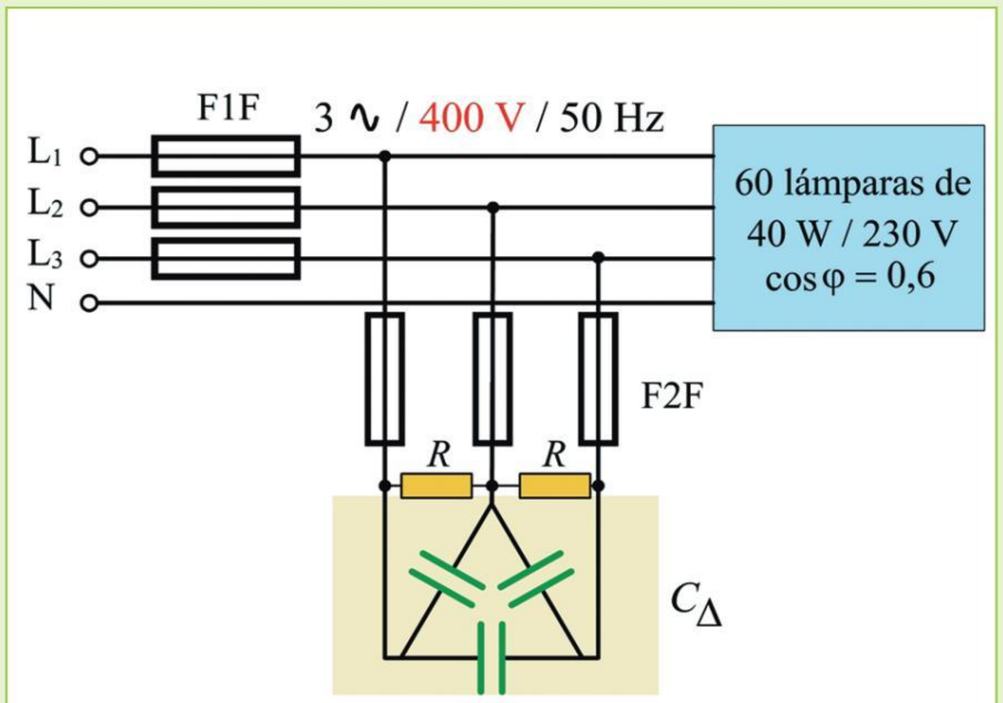


Figura 15.26.

Solución:

La potencia reactiva de la batería será exactamente igual, incluso la corriente de la línea que alimenta a la batería. Lo que sí que será diferente es la tensión a la que trabaja cada condensador (en este caso los condensadores quedan sometidos a la tensión de línea) y, por consiguiente, se verá afectada la capacidad de cada uno de ellos.

$$I_{fC} = \frac{Q_{C'}}{U_L} = \frac{866}{400} = 2{,}17 \text{ A}$$

$$X_C = \frac{U_L}{I_{fC}} = \frac{400}{2{,}17} = 184{,}3\ \Omega$$

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 184{,}3} = 17 \cdot 10^{-6} \text{ F}$$

Batería trifásica de condensadores de 2.598 VAR/400 V compuesta por 3 condensadores de 17 µF a 400 V.

Con la batería en triángulo se consiguen condensadores de menor capacidad pero de mayor tensión nominal que con una batería en estrella.

15.5. Instalaciones trifásicas de varios receptores

Al igual que se procedía en el cálculo para las instalaciones monofásicas, en este caso se trata de calcular la potencia total instalada, el factor de potencia y la intensidad total de una instalación trifásica de la que se conectan varias cargas de potencia activa y *FP* conocidas. Para ello, primero se calcula la potencia activa y reactiva de todas las cargas y con estos datos se procede a obtener la potencia aparente total, así como el *FP* del conjunto y la intensidad.

© Ediciones Paraninfo

Actividad resuelta 15.10

La instalación eléctrica de un pequeño taller consta de los siguientes receptores, conectados a una línea trifásica de 400 V de tensión de línea, 50 Hz: (1) motor trifásico de 10 kW, cos $\varphi = 0{,}75$; (2) horno trifásico consistente en tres resistencias de 50 Ω conectadas en triángulo; (3) 30 lámparas de vapor de mercurio de 500 W, 230 V, cos $\varphi = 0{,}6$ conectadas equitativamente entre cada fase y neutro; (4) 3 motores monofásicos de 2 kW, 400 V, cos $\varphi = 0{,}7$ conectados entre fases (Figura 15.27).

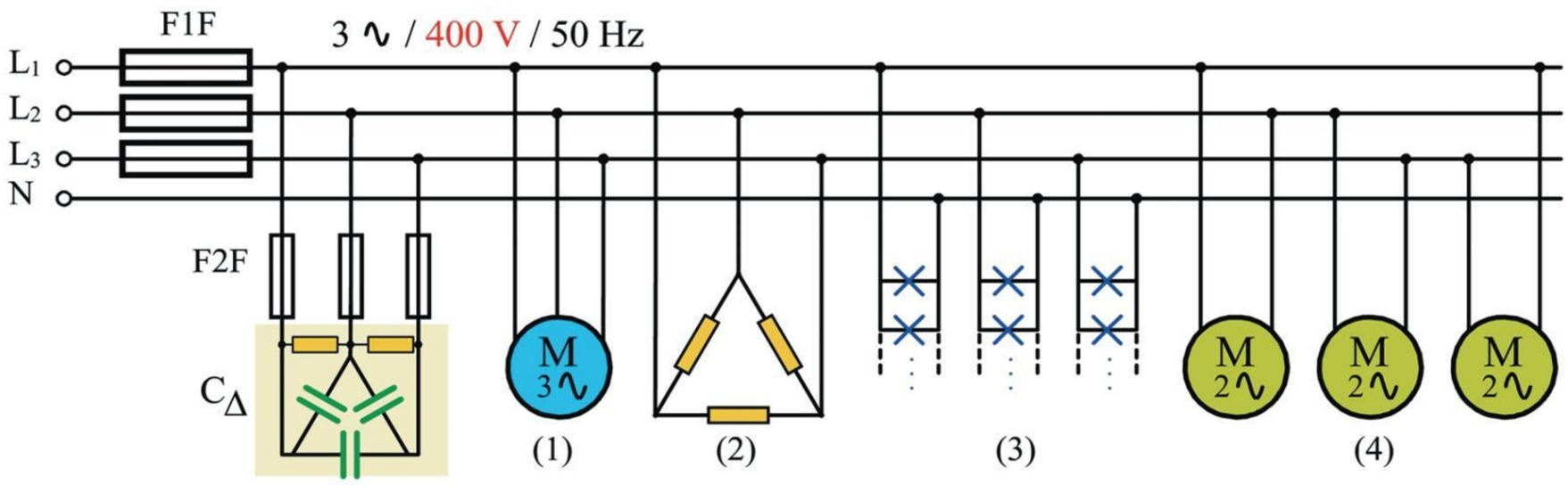


Figura 15.27.

Averigua: **a)** potencia total de la instalación y el *FP*; **b)** calibre de los fusibles generales de la línea; **c)** características de la batería de condensadores conectada en triángulo para corregir el *FP* hasta 0,95; **d)** calibre de los fusibles de la batería de condensadores; **e)** corriente eléctrica por la línea con la batería de condensadores conectada.

Solución:

(1) Determinamos primero la potencia reactiva del motor, que según el triángulo de potencias:

$$Q_1 = P_1 \operatorname{tg} \varphi_1 = 10.000 \cdot \operatorname{tg} 41{,}4° = 8.819 \text{ VAR}$$

$$\varphi_1 = \arccos 0{,}75 = 41{,}4°$$

(2) Calculamos ahora la potencia activa del horno trifásico:

$$I_f = \frac{U_L}{R} = \frac{400}{50} = 8 \text{ A}$$

La potencia es tres veces la de una *R*.

$$P_2 = 3U_f I_f \cos \varphi = 3 \cdot 400 \cdot 8 \cdot 1 = 9.600 \text{ W}$$

$Q_2 = 0$ VAR (las cargas resistivas no producen potencia reactiva; el factor de potencia es 1)

(3) Para las 30 lámparas de vapor de mercurio:

$$P_3 = 30 \cdot 500 \text{ W} = 15.000 \text{ W}$$

$$Q_3 = P_3 \operatorname{tg} \varphi_3 = 15.000 \cdot \operatorname{tg} 53° = 19.905 \text{ VAR}$$

$$\varphi_3 = \arccos 0{,}6 = 53°$$

(4) Para los tres motores monofásicos:

$$P_4 = 3 \cdot 2.000 \text{ W} = 6.000 \text{ W}$$

$$Q_4 = P_4 \operatorname{tg} \varphi_4 = 6.000 \cdot \operatorname{tg} 45{,}6° = 6.121 \text{ VAR}$$

$$\varphi_4 = \arccos 0{,}7 = 45{,}6°$$

Ahora sumamos las potencias:

$$P_T = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = 10.000 + 9.600 + 15.000 + 6.000 = 40.600 \text{ W}$$

© Ediciones Paraninfo

$$Q_T = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 = 8.819 + 0 + 19.905 + 6.121 = 34.845 \text{ VAR}$$

$$S_T = \sqrt{P_T^2 + Q_T^2} = \sqrt{40.600^2 + 34.845^2} = 53.503 \text{ VA}$$

$$S_T = \sqrt{3}\, U_L\, I_{LT} \quad \Rightarrow \quad I_{LT} = \frac{S_T}{\sqrt{3}\, U_L} = \frac{53.503}{\sqrt{3} \cdot 400} = 77 \text{ A}$$

$$\cos \varphi_T = \frac{P_T}{S_T} = \frac{40.600}{53.503} = 0{,}76$$

a) Potencia instalada: 40,6 kW/53,5 kVA; *FP* = 0,76.

b) Calibre de los fusibles: 100 A.

c) Calculamos ahora la batería de condensadores:

$Q_C = P_T\,(\text{tg}\ \varphi_T - \text{tg}\ \varphi_{T'}) = 40.600 \cdot (\text{tg } 40{,}54° - \text{tg } 18{,}19°) = 21.384$ VAR

$\varphi_T = \text{arc cos } 0{,}76 = 40{,}54°$

$\varphi'_T = \text{arc cos } 0{,}95 = 18{,}19°$

La potencia de cada una de las fases de la batería de condensadores es la tercera parte de la total:

$$Q'_C = \frac{21.384}{3} = 7.128 \text{ VAR}$$

$$I_{fC} = \frac{Q'_C}{U_L} = \frac{7.128}{400} = 18 \text{ A}$$

$$X_C = \frac{U_L}{I_{fC}} = \frac{400}{18} = 22\ \Omega$$

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 22} = 145 \cdot 10^{-6} \text{ F}$$

Características de la batería trifásica de condensadores en Δ:

21,4 kVAR a 400 V; condensadores de 145 μF, 400 V.

(Consultando en un catálogo de baterías automáticas podríamos elegir una con tres escalones de: 5 kVAR; 7,5 kVAR; 10 kVAR.)

d) Para calcular el calibre de los fusibles de los condensadores tenemos en cuenta la corriente de línea por la batería y que es recomendable sobredimensionar su calibre en 1,8 veces para evitar la fusión intempestiva de los fusibles.

$$I_{LC} = \sqrt{3}\, I_{fC} = \sqrt{3} \cdot 18 = 31 \text{ VA}$$

$$1{,}8 \cdot 31 = 55{,}8 \text{ A} \quad \Rightarrow \quad (63 \text{ A})$$

e) Intensidad por la línea con la batería de condensadores conectada:

$$P_T = \sqrt{3}\, U_L\, I_{CT'} \cos \varphi'_T \quad \Rightarrow \quad I'_{LT} = \ldots = \ldots = 62 \text{ A}$$

15.6. Caída de tensión en las líneas trifásicas de C.A.

Al igual que ocurría en las líneas monofásicas, en las líneas trifásicas aparece una caída de tensión en cada uno de los conductores de línea igual a ($u_f = R_L\, I_L \cos \varphi$). Esta tensión se restará a la tensión de fase. La caída de tensión que aparecerá entre las fases de la línea será $\sqrt{3}$ veces mayor que la de fase ($u_L = \sqrt{3}\ U_f$), resultando:

$$u = \sqrt{3} \cdot R \cdot I_L \cos \varphi$$

u = Caída de tensión de línea (V).

R_L = Resistencia de la línea (Ω).

I_L = Intensidad eficaz por la línea.

$\cos \varphi$ = *FP* de la carga.

© Ediciones Paraninfo

Como en otras ocasiones, la sección del conductor la deducimos a partir de la expresión de la resistencia de un conductor:

$$R_L = \rho \frac{L}{S}$$

Si sustituimos esta expresión en la de la caída de tensión, podremos obtener la fórmula para el cálculo de la sección en líneas trifásicas:

$$S = \frac{\sqrt{3} \cdot \rho \cdot L \cdot I_L \cdot \cos \varphi}{u}$$

S = Sección del conductor (mm^2).
ρ = Resistividad del conductor ($\Omega\ mm^2/m$).
L = Longitud de la línea (m).
I_L = Intensidad eficaz por la línea (A).
$\cos \varphi = FP$ de la carga.
u = Caída de tensión de la línea (V).

En el caso de utilizar aquí el concepto de conductividad (γ) en vez del de resistividad (ρ), obtendríamos la siguiente expresión:

$$S = \frac{\sqrt{3} \cdot I_L \cdot I \cdot \cos \varphi}{\gamma \cdot u}$$

γ = Conductividad del conductor en función de su temperatura máxima de funcionamiento (norma UNE 20460-5-523).

Actividad resuelta 15.11

La línea general que alimenta al pequeño taller de la Actividad resuelta 15.10 consta de tres conductores unipolares + + neutro de PVC instalados bajo tubo empotrado en obra, y posee una longitud de 150 m. ¿Cuál será la sección más recomendable si se exige que la caída de tensión en la línea no supere el 2 % de la de alimentación?

Solución:

Primero calculamos la caída de tensión de la línea en voltios:

$$u = \frac{400}{100} \cdot 2\ \% = 8\ V$$

Ahora calculamos la sección teniendo en cuenta la corriente con el factor de potencia sin mejorar ($I_L = 77$ A, $\cos \varphi = 0{,}76$).

$$S = \frac{\sqrt{3} \cdot L_L \cdot I \cos \varphi}{\gamma_{70\ °C}\ u} = \frac{\sqrt{3} \cdot 150 \cdot 77 \cdot 0{,}76}{48 \cdot 8} = 39{,}6\ mm^2$$

La sección comercial que le corresponde es 50 mm^2.

Nota: La conductividad que se ha tomado es la del conductor de PVC de cobre en unas condiciones de temperatura máxima de operación de 70 °C, tal como se indica en la correspondiente norma UNE.

Como la corriente permitida para tres conductores unipolares bajo tubo empotrado en obra de 50 mm^2 es de 116 A (Tabla 4.3), y esta es superior a los 77 amperios que fluyen por la línea, la sección es adecuada.

15.7. Cálculo de la sección de conductores en líneas con varios receptores según el REBT

Además de los aspectos que ya hemos estudiado, para el cálculo de la sección de conductores de una línea que alimenta varios receptores el REBT nos apunta las siguientes indicaciones:

Motores (ITC-BT 47): cuando existe un solo motor, los conductores deberán estar dimensionados para una intensidad del 125 % a plena carga del motor. En el caso de que existan varios motores, los conductores se dimensionarán para una intensidad no inferior a la suma del 125 % de la intensidad a plena carga del motor de mayor potencia, más la intensidad a plena carga de los demás.

Lámparas de descarga (ITC-BT 44): para receptores con lámparas de descarga, la carga mínima prevista en voltiamperios será de 1,8 veces la potencia en vatios de las lámparas.

Conductor neutro: a pesar de que en un sistema equilibrado, como el de la Actividad resuelta 15.11, la intensidad de la corriente por el neutro es igual a cero, la sección para este conductor será la misma que las de fase, tal como se indica en la instrucción técnica (**ITC-BT 19**) del REBT: «En instalaciones interiores, para tener en cuenta las corrientes armónicas debidas a cargas no lineales y posibles desequilibrios, salvo justificación por cálculo, la sección del conductor neutro será como mínimo igual a la de las fases».

Consulta en el REBT las Instrucciones Técnicas ITC-BT 47, ITC-BT 4 y la ITC-BT 19.

Actividad resuelta 15.2

Calcula la sección de los conductores de la línea de la Actividad resuelta 15.11 teniendo en cuenta las Instrucciones Técnicas del REBT mencionadas.

© Ediciones Paraninfo

Solución:

En el caso de los motores se aplica el 125 % para el motor de más potencia:

(1) $P_1 = 1{,}25 \cdot 10.000 = 12.500$ W

$Q_1 = 1{,}25 \cdot 8.819 = 11.024$ VAR

Para las lámparas de descarga se aplica el coeficiente de 1,8 veces la potencia:

(3) $P_3 = 1{,}8 \cdot 15.000 = 27.000$ W

$Q_3 = 1{,}8 \cdot 19.995 = 35.991$ VAR

Ahora sumamos las potencias con los nuevos valores:

$$P_T = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 =$$
$$= 12.500 + 9.600 + 27.000 + 6.000 = 55.100 \text{ W}$$

$$Q_T = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 =$$
$$= 11.024 + 0 + 35.991 + 6.121 = 53.136 \text{ VAR}$$

$$S_T = \sqrt{P_T^2 + Q_T^2} = \sqrt{55.100^2 + 53.136^2} = 76.547 \text{ VA}$$

$$I_{LT} = \frac{S_T}{\sqrt{3}\, U_L} = \frac{76.547}{\sqrt{3} \cdot 400} = 110{,}5 \text{ A}$$

$$\cos \varphi_T = \frac{P_T}{S_T} = \frac{55.100}{76.547} = 0{,}72$$

$$S = \frac{\sqrt{3} \cdot L_L \cdot I \cdot \cos \varphi}{\gamma_{70\,°C}\, u} = \frac{\sqrt{3} \cdot 150 \cdot 110{,}5 \cdot 0{,}72}{48 \cdot 8} = 53{,}8 \text{ mm}^2$$

La sección comercial que le corresponde es 70 mm^2.

Como la corriente permitida para tres conductores unipolares bajo tubo empotrado en obra de 70 mm^2 es de 148 A (Tabla 4.3), y esta es superior a los 110,5 amperios que fluyen por la línea, damos por válido este resultado.

Actividad propuesta 15.1

La acometida de una factoría une el transformador de distribución con el cuadro general de distribución mediante una línea trifásica de 125 m (línea tripolar + + neutro) instalada al aire de polietileno reticulado. La tensión entre fases en el primario del transformador es de 10.000 V y en el secundario, de 400 V a 50 Hz. En la Figura 15.28 se muestra el esquema unifilar correspondiente a dicho cuadro.

Las previsiones de las cargas que se van a dar en los diferentes circuitos son las siguientes: (tomas) 10 kW, 400 V; (calefacción) 9 calefactores monofásicos de 2 kW, 400 V; (taller A) 20 kW, 400 V, cos $\varphi = 0{,}8$; (taller B) 30 kW, 400 V, cos $\varphi = 0{,}85$; (soldadura) 8 kW, 400 V, cos $\varphi = 0{,}9$; (depuradora) motor trifásico de 5 kW, 690/400 V, cos $\varphi = 0{,}9$; (servicios auxiliares) 3 kW, cos $\varphi = 0{,}85$, 400 V; (alumbrado) (1) 30 lámparas de vapor de mercurio de 400 W, 230 V, cos $\varphi = 0{,}72$; (2) 60 lámparas fluorescentes de 40 W, 230 V, cos $\varphi = 0{,}9$; (3) 15 lámparas incandescentes de 60 W/230V.

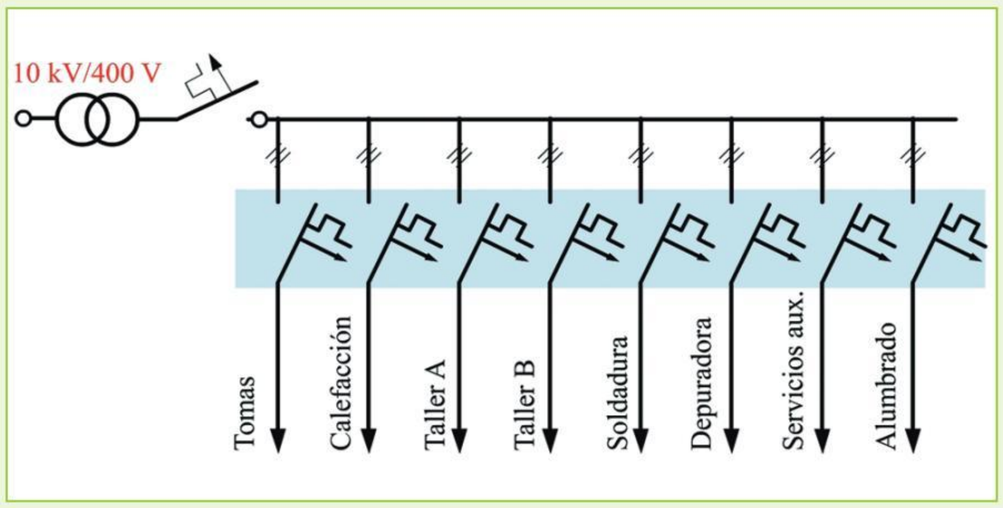


Figura 15.28.

Con estos datos: **a)** calcula la potencia a tener en cuenta para la elección del transformador de distribución si se tiene en cuenta un factor de simultaneidad de las cargas del 0,65; **b)** determina la corriente prevista por el primario y por el secundario de dicho transformador; **c)** averigua la sección de los conductores de la línea general si se prevé una caída de tensión máxima admisible del 5 %.

Actividad propuesta 15.2

La línea general de alimentación (LGA) de un edificio conecta la caja general de protección (CGP) con el cuarto de contadores (véase la Figura 4.8 de la Unidad 4). Se trata de calcular la sección de los conductores de la línea trifásica correspondientes a la LGA de un edificio de viviendas alimentado a 400 V y que consta de:

- 16 viviendas con un total de 88 kW y un cos $\varphi = 0{,}8$ (coeficiente de simultaneidad ya aplicado).
- 2 locales comerciales con una potencia prevista de 12 kW y cos $\varphi = 0{,}8$.

Para los servicios generales del edificio:

- 150 lámparas incandescentes de 60 W para el alumbrado de escalera.
- 20 tubos fluorescentes de alto factor 40 W y cos $\varphi =$ $= 0{,}8$ para alumbrado de portal.
- 1 ascensor de 3 kW y cos $\varphi = 0{,}8$.
- 1 montacargas de 7 kW y cos $\varphi = 0{,}85$.
- 2 grupos de presión de 4 kW cada uno y cos $\varphi = 0{,}8$.
- Garaje compuesto por 200 tubos fluorescentes de 20 W y cos $\varphi = 0{,}8$.

La línea general de alimentación tiene una longitud de 25 metros y está compuesta por tres cables unipolares + + neutro de XLPE instalados bajo tubo empotrado en obra. Los contadores de energía están totalmente con-

© Ediciones Paraninfo

centrados, por lo que la caída de tensión máxima que se admite según el REBT es del 0,5 %.

Nota: Dado que todas las cargas poseen practicante el mismo factor de potencia de 0,8, se sugiere utilizar el mismo factor de potencia para el cálculo de la previsión de la carga total del edificio, lo que simplifica bastante los cálculos. Esto no afectará significativamente al resultado final del cálculo de la sección. Por otro lado, hay que pensar que en este tipo de instalaciones se está realizando una estimación de la potencia prevista, por lo que en la práctica también se realiza una estimación aproximada del factor de potencia, siempre y cuando los factores de potencia de las diferentes cargas sean similares. En relación con el cómputo de las potencias de las lámparas de descarga y motores se sugiere consultar las Instrucciones Técnicas Complementarias ITC-BT 44 e ITC-BT 47 del REBT.

La solución a esta Actividad propuesta la puedes encontrar dentro del MATERIAL WEB elaborado para este texto.

15.8. Componentes armónicas en C.A.

Las tensiones senoidales que generan las centrales eléctricas son prácticamente puras; sin embargo, estas sufren alteraciones en las líneas de alimentación de los usuarios que hacen que aparezcan componentes de alta frecuencia.

Estas deformaciones de la tensión senoidal han ido aumentando en los últimos años debido al uso de cargas no lineales. Las cargas no lineales se refieren a un tipo de receptores que al ser conectados a la red eléctrica absorben intensidades de corrientes en impulsos bruscos. Estos cambios bruscos de corriente producen fluctuaciones en la tensión y corriente dando lugar a distorsiones en la forma de onda de las mismas, o lo que se conoce por armónicos.

Las cargas lineales que más habitualmente producen distorsiones armónicas suelen ser las que incorporan equipos de control electrónico. Estas trocean la señal senoidal con semiconductores de potencia, con el fin de conseguir la regulación deseada, a base de impulsos a una determinada frecuencia (hay corriente-no hay corriente). Entre otras, destacamos seguidamente las cargas no lineales que más habitualmente producen armónicos.

- Alumbrado con balastos electrónicos.
- Fuentes de alimentación conmutadas, ordenadores personales, TV, etcétera.
- Sistemas de alimentación ininterrumpida (SAI-UPS).
- Rectificadores de potencia para la alimentación de tracción eléctrica con motores de C.C.
- Reguladores electrónicos de tensión.
- Hornos de arco.
- Transformadores.
- Variadores de velocidad para motores trifásicos de C.A.

El concepto de los armónicos se basa en la teoría matemática de las series de Fourier. Según esta teoría, una función periódica no senoidal (como la que aparece distorsionada en las líneas eléctricas) puede ser descompuesta en la suma de una función senoidal de la frecuencia fundamental y de otras funciones senoidales, cuyas frecuencias son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental. Estas funciones adicionales se denominan armónicos (Figura 15.29).

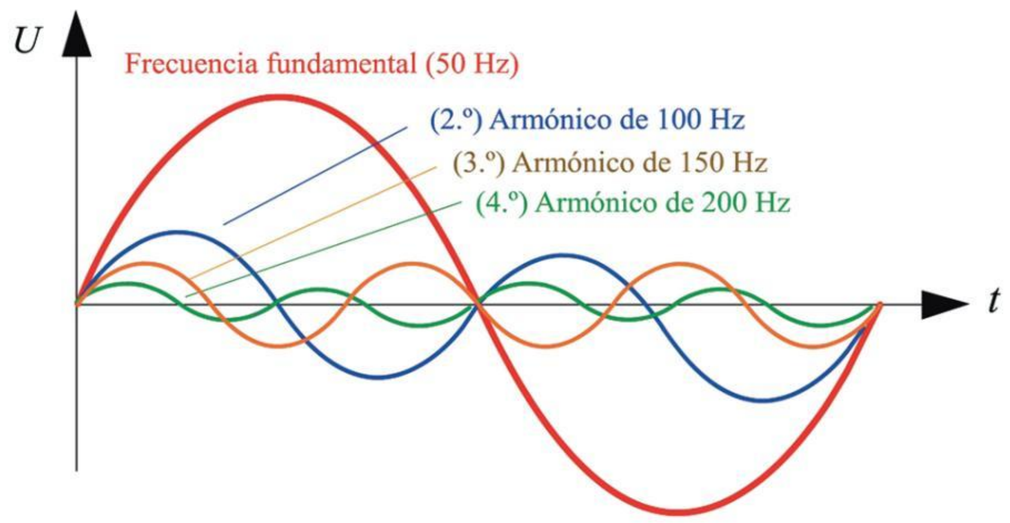


Figura 15.29. Tensión distorsionada y desglosada en su frecuencia principal y armónicos.

Los armónicos son tensiones o corrientes alternas cuya frecuencia resulta ser un múltiplo entero de la frecuencia de la señal senoidal fundamental. Así, por ejemplo, si la frecuencia de la red es 50 Hz, los armónicos podrían ser 100 Hz, 150 Hz, 200 Hz, etcétera.

15.8.1. Características de los armónicos

Las características que definen un armónico son:

Amplitud

Es el valor de la tensión o intensidad del armónico.

Orden

Es el valor de su frecuencia referido a la fundamental (50 Hz). Así, por ejemplo, un armónico de orden 3 posee una frecuencia 3 veces superior a la fundamental, es decir, 3×50 Hz = 150 Hz. En la Tabla 15.1 se expone una clasificación de los armónicos según su orden y frecuencia.

Tabla 15.1. Frecuencia de los armónicos en función de su orden

Orden	1	2	3	4	5	6	*N*
Frecuencia	50	100	150	200	250	300	$50 \cdot N$

© Ediciones Paraninfo

En la práctica los armónicos que más afectan a la calidad de energía eléctrica son de orden impar, y de forma especial los que son múltiplos de tres.

Así, por ejemplo, en un sistema trifásico equilibrado a cuatro hilos lo normal es que la corriente por el conductor neutro sea cero, ya que la suma vectorial de las tres corrientes de fase se anulan. Esto es válido para la componente fundamental, pero no se cumple para los armónicos múltiplos de tres, ya que en este caso se suman, lo que da lugar a intensidades de corriente por el neutro que pueden llegar a ser más elevadas que las de las fases.

En las líneas eléctricas que alimentan equipos no lineales de tipo electrónico, como por ejemplo salas con muchos ordenadores, suelen aparecer armónicos de tercer y noveno orden de gran amplitud, que producen sobrecargas en el neutro que pueden llegar a 1,5 o 2 veces la intensidad que fluye por cada fase.

Si consultamos el REBT, en relación con la sección del neutro, y dado que para una tensión senoidal pura en sistemas equilibrados la corriente por el neutro es nula, podremos comprobar cómo se recomiendan secciones inferiores para el conductor neutro en relación con las de fases. Sin embargo, si en la línea apareciesen una gran cantidad de armónicos habría que tener en cuenta esta circunstancia para dimensionar la sección del neutro.

Porcentaje de tasa de armónico

Es la relación que existe entre la amplitud del armónico de un determinado orden (U_n) y la de la componente fundamental (U) expresada en tantos por ciento:

$$U_n\,\% = 100 \cdot U_n / U$$

En la Figura 15.30 se muestra la forma de onda de una tensión distorsionada que posee un armónico de tercer orden con una tasa del 20 %.

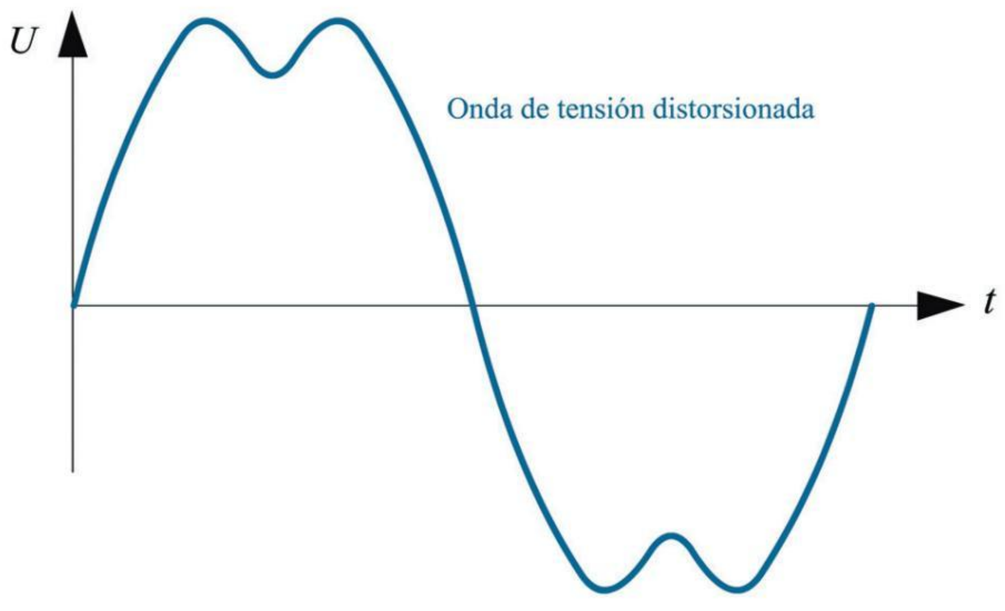


Figura 15.30. Onda de tensión distorsionada por un armónico de tercer orden.

Según Fourier, esta onda sería la suma de una tensión senoidal pura de 50 Hz con un 80 % de amplitud más el armónico de tercer orden de 150 Hz con una amplitud del 20 %, tal como se muestra en la Figura 15.31.

En la Tabla 15.2 se exponen los niveles máximos permitidos de porcentaje de tasa de armónico (U_n %) en función del número de orden del armónico (N) para baja y media tensión.

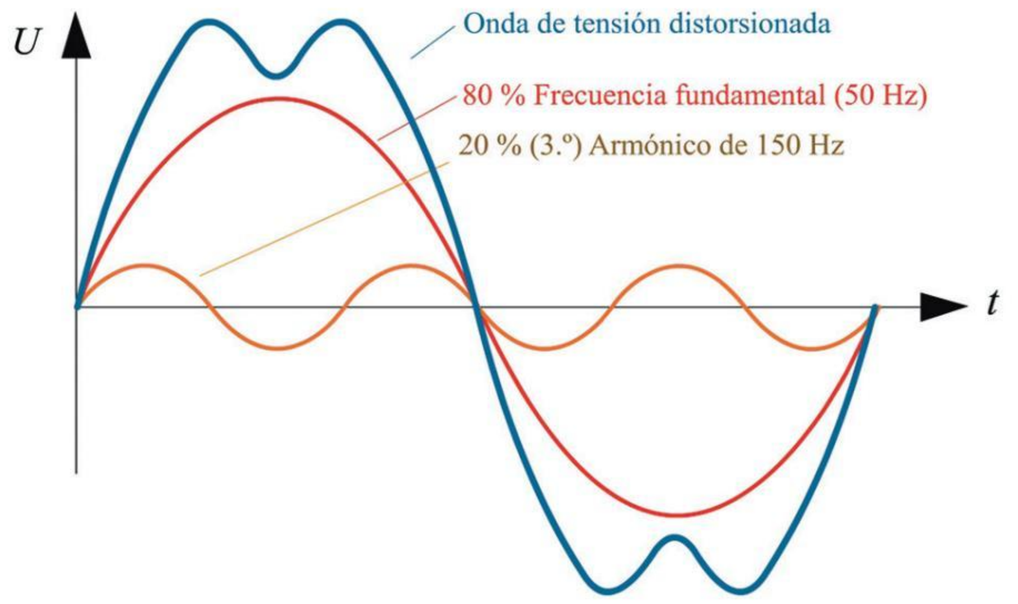


Figura 15.31. Descomposición de la onda de tensión principal.

Tabla 15.2. Niveles máximos permitidos de tasa de armónicos

N	U_n %	N	U_n %	N	U_n %
2	2,0	8	0,5	15	0,3
3	5,0	9	1,5	17	2,0
4	1,0	10	0,5	19	1,5
5	6,0	11	3,5	21	0,2
6	0,5	12	0,2	23	1,5
7	5,0	13	3,0	25	1,5

Factor de distorsión armónica total (*THD* %)

Es un factor que tiene en cuenta la tasa porcentual de todos los armónicos que pueda contener una onda de tensión distorsionada en relación con la componente fundamental. Así, por ejemplo, la tasa de distorsión total (*THD* %) admitida en el suministro de energía de baja tensión es del 3 %.

15.8.2. Efectos que producen los armónicos

La aparición de los armónicos en la red provoca una gran cantidad de problemas, que en muchas ocasiones complica la labor de los instaladores eléctricos, como por ejemplo:

© Ediciones Paraninfo

- Aunque las corrientes de fases de un sistema trifásico estén equilibradas aparece una intensidad de corriente por el neutro más elevada que por las fases.
- Los interruptores automáticos y fusibles cortan el circuito a intensidades de corriente diferentes a los valores nominales. Esto se debe a que las corrientes con muchos armónicos poseen un valor eficaz pequeño en relación con su valor pico máximo.
- Los interruptores diferenciales saltan sin que existan corrientes reales de defecto. Para minimizar este efecto se fabrican unos diferenciales especiales que tienen el nombre de «superinmunizados» a los que se les incorpora un filtro con el fin de rechazar las altas frecuencias y evitar disparos innecesarios.
- Los transformadores de potencia y los motores se sobrecalientan aun trabajando por debajo de la potencia nominal.
- Las baterías de condensadores de compensación de energía reactiva se calientan excesivamente y se destruyen.
- Los equipos de electrónica de potencia funcionan de forma incorrecta.
- Los motores pueden producir vibraciones extrañas en su funcionamiento.
- Los conductores de la línea se sobrecalientan debido al aumento del efecto piel. Los armónicos de frecuencia alta hacen que aumente la reactancia inductiva en el interior del conductor, por lo que la corriente eléctrica tiende a fluir por la parte externa de aquel. De esta forma se reduce la sección efectiva del conductor, trayendo consigo un aumento de la resistencia de este, lo que provoca el aumento de calor generado.

15.8.3. Medida de los armónicos

Un aspecto a tener en cuenta para averiguar los problemas que causan los armónicos es utilizar equipos de media que midan el verdadero valor eficaz o RMS (valor cuadrático medio). Un aparato de medida no preparado podría arrojar resultados en la medida de ondas distorsionadas de hasta un 40 % del verdadero valor eficaz.

El verdadero valor eficaz RMS equivale al valor de una corriente continua que produzca el mismo calentamiento que la corriente alterna a medir.

A este efecto existen en el mercado diferentes aparatos de medida, conocidos con el nombre de analizadores de red, que son capaces de presentar en la pantalla todas las características de los armónicos, como por ejemplo:

- Medida del verdadero valor eficaz RMS.
- Medida del factor de distorsión armónica total (*THD %*).
- Medida de porcentaje de tasa de armónico en función del número de su orden.
- Otras medidas relacionadas con la distorsión de onda fundamental.

En la Figura 15.32 se muestra un analizador de red midiendo los armónicos de una línea trifásica con neutro.

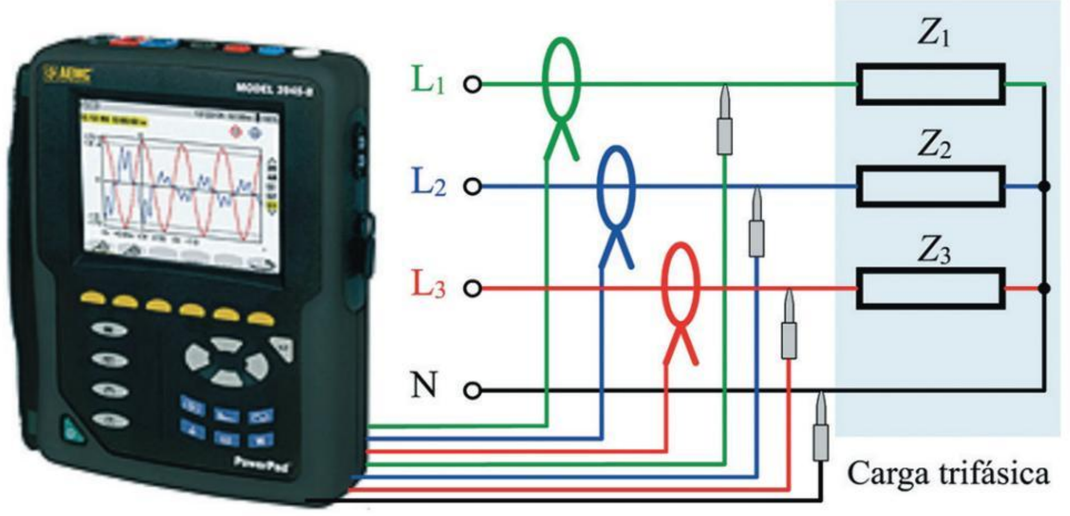


Figura 15.32. Analizador de red midiendo los armónicos con puntas de prueba y pinzas amperimétricas de medida.

15.8.4. Sistemas para la compensación de armónicos

Para evitar la aparición de armónicos lo primero que habría que hacer es prevenir su aparición. Los fabricantes deberían esforzarse en diseñar equipos que generen un menor nivel de armónicos.

En cuanto a los usuarios, una vez detectados altos niveles de armónicos en una instalación eléctrica, es posible minimizar sus efectos utilizando interruptores diferenciales superinmunizados, aumentar la sección de conductores de fase y en especial la del neutro, utilizar interruptores automáticos multipolares que corten también por la acción de las corrientes del neutro, y la utilización de filtros pasivos y activos que consiguen reducir el nivel de los armónicos.

Filtros pasivos

Los filtros pasivos se pueden construir con la combinación de elementos *R*, *L* y *C*. Así, por ejemplo, las reactancias inductivas conectadas en serie con la carga aumentan su impedancia para las altas frecuencias y producen un bloqueo de estas. Por otro lado, si se conectan condensadores en paralelo con la carga, su reactancia disminuye con la frecuencia y consiguen cortocircuitar las altas frecuencias (Figura 15.33).

© Ediciones Paraninfo

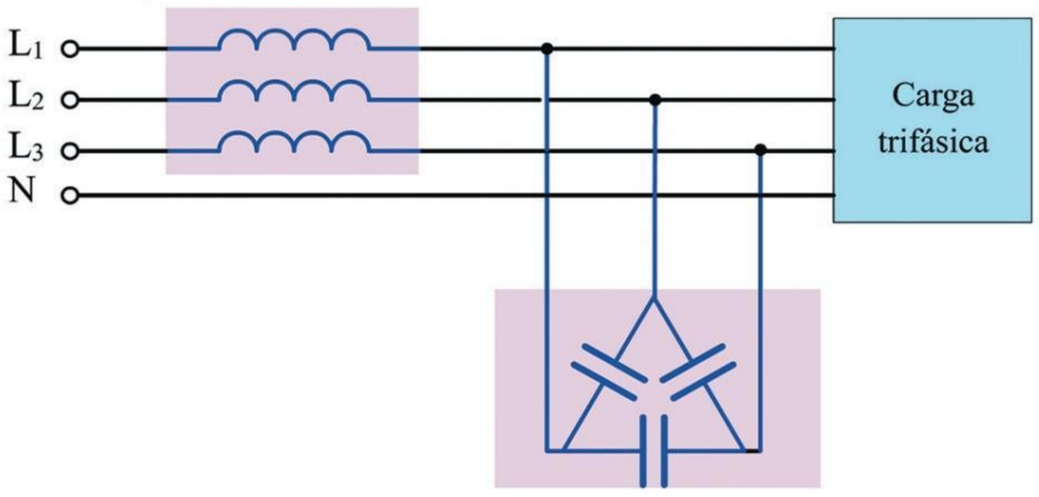


Figura 15.33. Filtros pasivos para la eliminación de armónicos a base de bobinas y condensadores.

Filtros activos

Los filtros activos se construyen a base de sistemas con electrónica de potencia. Estos sofisticados y modernos equipos analizan los armónicos que aparecen en la línea eléctrica e inyectan a la misma corriente armónica detectada con la fase adecuada con el fin de neutralizar totalmente dichos armónicos, tal como se muestra en el esquema simplificado de la Figura 15.34.

Los filtros activos van intercalados en paralelo entre la red y la carga y pueden programarse para corregir un armónico determinado. Para la medida de nivel de armónicos en la red se valen de transformadores de corriente o pinzas de medida, tal como se muestra en el esquema de conexiones de la Figura 15.35.

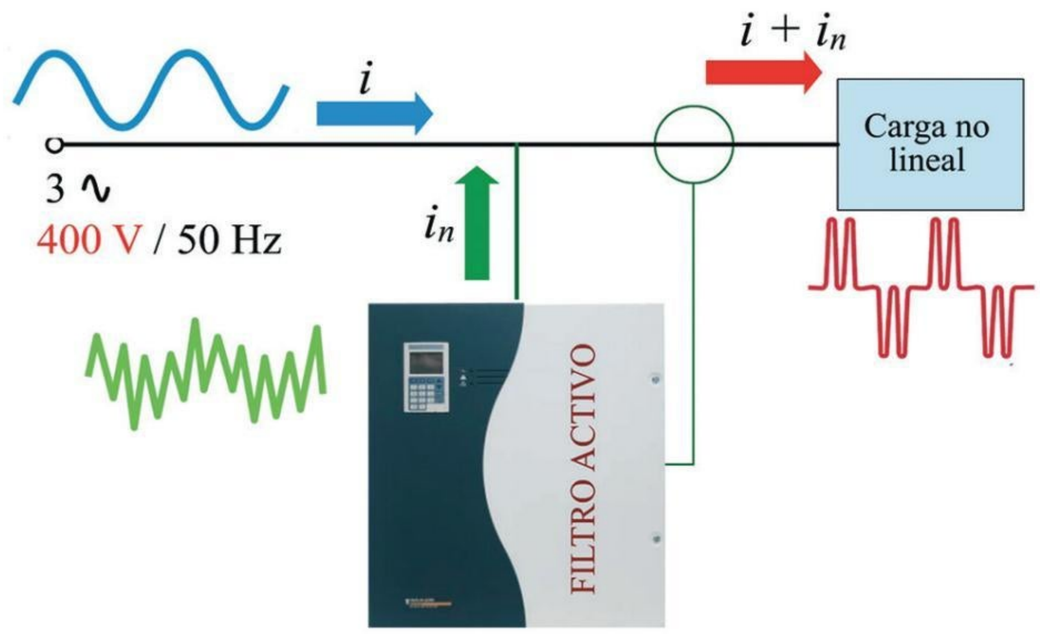


Figura 15.34. Filtro activo para la eliminación de armónicos en una carga no lineal.

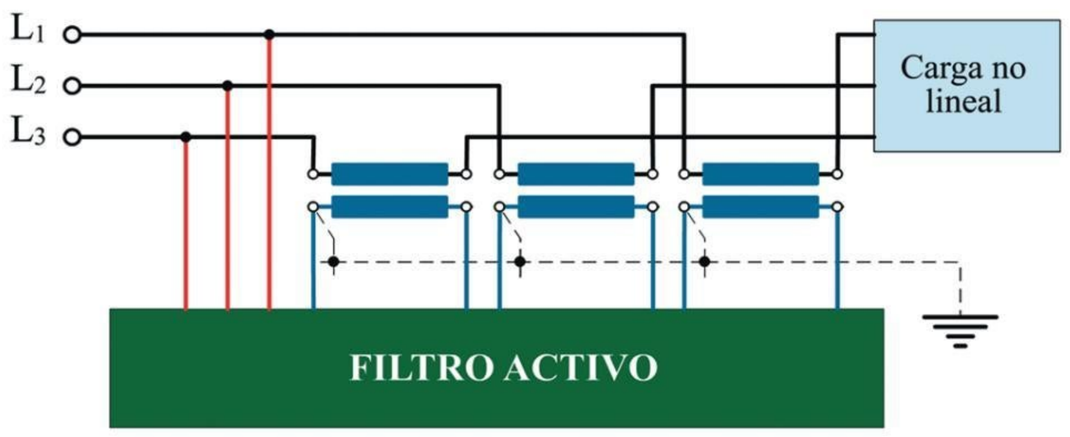


Figura 15.35. Esquema de conexiones de filtro activo.

© Ediciones Paraninfo

Comprobación práctica en el laboratorio

15.1. Relación entre las tensiones y corrientes de fase y de línea. Mediante un sencillo montaje vamos a comprobar experimentalmente las relaciones existentes entre las corrientes de línea y de fase, así como la validez de las expresiones generales de potencia trifásica.

Consigue tres lámparas incandescentes de 60 W a 230 V y conéctalas en triángulo a una red trifásica de 230 V entre fases. Conecta un amperímetro en una de las líneas (A_L) y otro en una de las lámparas (A_f) con el objeto de medir la intensidad de línea y de fase respectivamente. Conecta también un voltímetro entre fases para comprobar el valor de la tensión de línea [Figura 15.36(a)].

Con los datos obtenidos, comprueba si:

$$\frac{A_L}{A_f} = \ldots = \sqrt{3}$$

$$P = \sqrt{3}\ U_L I_L \cos \varphi = \ldots =$$
$$= 3 \cdot 60\ \text{W} = 3\ U_L I_f \cos \varphi$$

(Para las lámparas incandescentes se toma un cos $\varphi = 1$.)

Ahora conecta las tres lámparas incandescentes de 60 W a 230 V y conéctalas en estrella a una red trifásica de 400 V entre fases. Conecta un voltímetro entre las fases (U_L) y otro entre los bornes de una de las lámparas (U_f) con el objeto de medir la tensión de línea y de fase, respectivamente. Conecta también un amperímetro (A) en una de las líneas para comprobar el valor de la corriente de línea y de fase [Figura 15.36(b)].

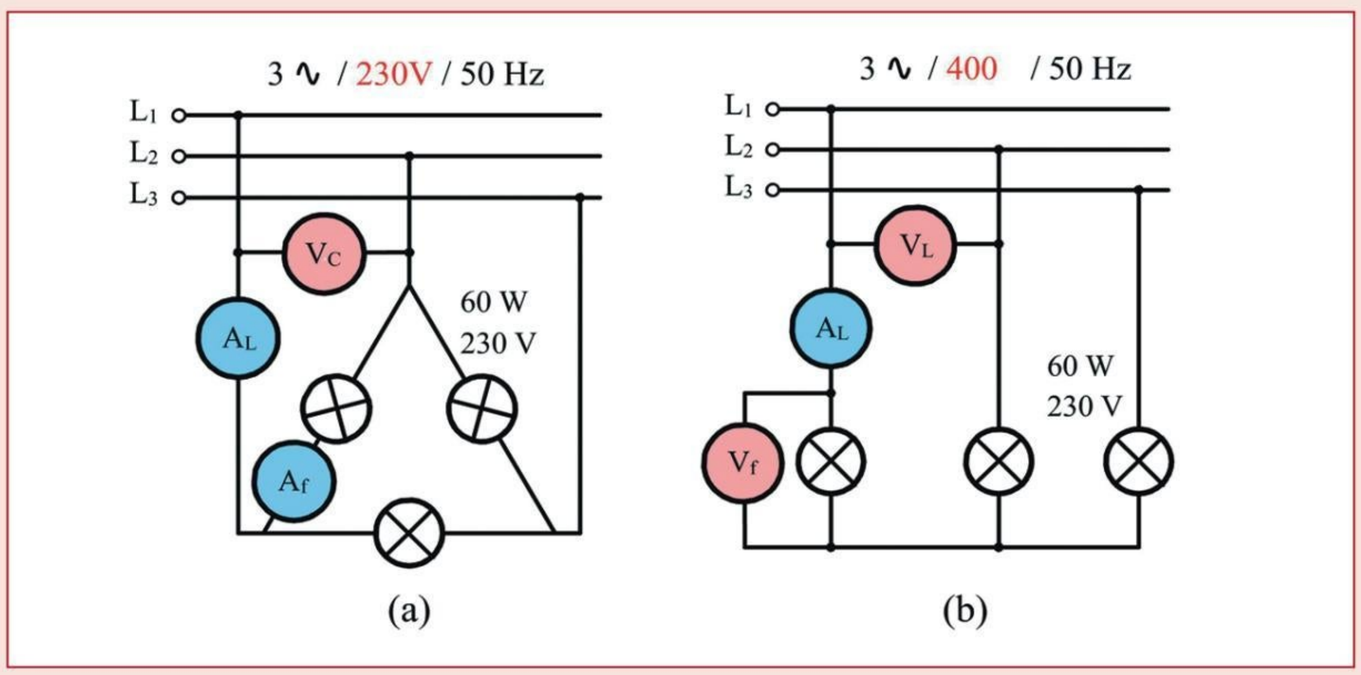


Figura 15.36.

Con los datos obtenidos, comprueba si:

$$\frac{U_L}{U_f} = \ldots = \sqrt{3}$$

$$P = \sqrt{3}\ U_L I_L \cos \varphi = \ldots =$$
$$= 3 \cdot 60\ \text{W} = 3\ U_f I_f \cos \varphi$$

Desconecta una de las lámparas. ¿Qué ocurre? ¿Y si desconectamos dos?

¿Ocurriría lo mismo si conectásemos el neutro al punto común de la estrella?

15.2. Analizador para redes trifásicas. Consigue un analizador de red trifásico y, siguiendo las instrucciones del equipo de medida, analiza los niveles de armónicos de alguna carga no lineal.

© Ediciones Paraninfo

Actividades de comprobación

15.1. ¿Qué ventajas presenta el alternador conectado en estrella frente al conectado en triángulo?

a) Presenta un mejor rendimiento.

b) Disponibilidad del conductor neutro y posibilidad de puesta a tierra del mismo.

c) Reduce considerablemente la distorsión en las tensiones de fase.

15.2. En una carga trifásica conectada en triángulo:

a) La tensión de fase es igual que la de línea.

b) La corriente de fase es raíz de tres veces inferior a la de línea.

c) La corriente de línea es igual que la de fase.

15.3. En una carga conectada en estrella:

a) La tensión de fase es raíz de tres veces inferior a la de línea.

b) La corriente de fase es raíz de tres veces inferior a la de línea.

c) La corriente de fase es igual que la de línea.

15.4. ¿Qué desfase aparece entre las tensiones de fase de un alternador?

a) 30°.

b) 90°.

c) 120°.

15.5. ¿Qué desfase aparece entre las tensiones de línea y de fase que proporciona un alternador conectado en estrella?

a) 30°.

b) 90°.

c) 120°.

15.6. En un sistema trifásico con carga equilibrada se mide una intensidad en la línea de 30 A con un factor de potencia de 0,75. Si la tensión entre fases es 230 V, averigua las potencias de la carga.

15.7. Una instalación industrial de 50 kW, con un factor de potencia de 0,65, se alimenta a través de un transformador trifásico con una tensión en el primario entre fases de 24 kV y de 400 V en el secundario. Averigua:

a) La potencia nominal del transformador en kVA, así como la corriente por el primario y el secundario.

b) Nuevas características del transformador si se corrige el *FP* de la instalación a 0,98 mediante una batería automática de condensadores conectada en el lado de baja tensión.

15.8. En un sistema trifásico con carga equilibrada a tres hilos se mide una potencia en la línea de 36 kW, una intensidad de 97,4 A y una tensión de 225 V. Averigua el factor de potencia de la carga.

15.9. Un aparato de calefacción trifásico consta de tres resistencias de 10 Ω conectadas en estrella. Determina la potencia que desarrollarán cuando se les aplique 230 V entre fases, así como la corriente de fase y de línea.

15.10. ¿Y si conectamos en triángulo las mismas resistencias que en la actividad anterior?

15.11. Un motor trifásico de 3.990 W, cos $\varphi = 0{,}65$ se conecta a una red de 400 V, 50 Hz. Averigua la corriente de línea y de cada fase del motor cuando está conectado en triángulo, así como su potencia reactiva y aparente. Si a cada una de las fases del motor se la puede considerar como una inductancia en serie con una resistencia óhmica, determina los valores de las fases.

15.12. Se conectan en triángulo tres bobinas iguales de 16 Ω de resistencia óhmica y 0,2 H de coeficiente de autoinducción cada una. Si se conectan a un sistema trifásico de 240 V entre fases y 50 Hz, determina:

a) La corriente por cada fase y por la línea.

b) La potencia activa y el *FP* de la carga trifásica.

15.13. Un motor trifásico conectado a 400 V consume 56 A. Su potencia es de 29,4 kW. Determina el factor de potencia, potencia reactiva y aparente.

15.14. Una red trifásica alimenta tres motores monofásicos de inducción de 5 CV, cos $\varphi = 0{,}78$, 230 V cada uno, conectados entre cada fase y el neutro. Determina la corriente por la línea y por el neutro, así como la potencia reactiva que deberá poseer la batería de condensadores para corregir el *FP* a 0,9.

15.15. Una empresa demanda una potencia de 700 kVA a 10 kV en corriente alterna trifásica. Las lecturas del consumo en dos meses son para el contador de activa de 205.000 kWh y para el de reactiva de 150.000 kVARh. Calcula:

a) El *FP* medio en dicho periodo de facturación.

b) Intensidad por la línea.

c) Característica de batería de condensadores conectados en estrella para mejorar el *FP* hasta 0,93.

d) Porcentaje de reducción de la corriente de línea al conectar la batería de condensadores.

© Ediciones Paraninfo

15.16. Una línea trifásica con neutro alimenta la instalación eléctrica de una nave de industria pesada comercial. Las cargas, que se conectan de una forma equilibrada, son las siguientes: (1) motor trifásico de 50 kW, 240 V, cos $\varphi = 0{,}8$; (2) motor trifásico de 40 kW, 240 V, cos $\varphi = 0{,}85$; (3) 375 lámparas incandescentes de 40 W, 240 V; (4) 250 lámparas fluorescentes de 40 W, cos $\varphi = 0{,}9$. Determina las potencias, el *FP* y la intensidad de línea del conjunto de la instalación.

15.17. En la Figura 15.37 se muestra el esquema general de distribución de una instalación industrial.

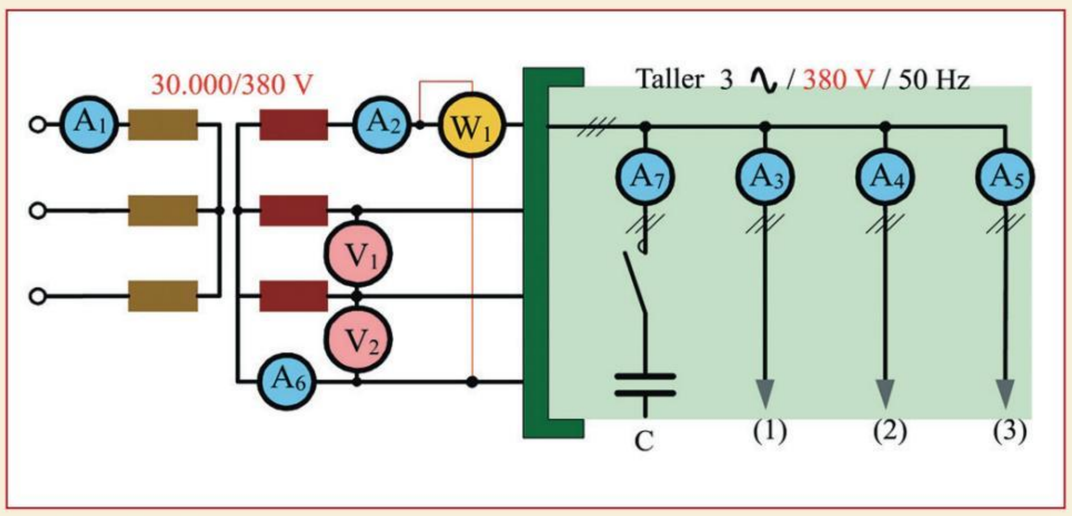


Figura 15.37.

Seguidamente se indican las cargas que alimentan cada uno de los circuitos: (1) motor trifásico de 8.660 W, 380 V/220 V, cos $\varphi = 0{,}75$; (2) 30 lámparas de vapor de mercurio de 250 W, 400 V, cos $\varphi = 0{,}6$ cada una; (3) 90 lámparas incandescentes de 60 W, 220 V cada una. Con estos datos averigua:

a) Lectura de los aparatos de medida con el interruptor *Q* de la batería de condensadores abierto.

b) Características de la batería de condensadores conectados en triángulo para mejorar el *FP* a 0,95.

c) Lectura de los aparatos de medida con el interruptor cerrado (condensadores conectados).

15.18. La línea general de alimentación en las instalaciones eléctricas de edificios destinados a viviendas es la línea que une la caja general de protección con la centralización de contadores que alimenta. Según el REBT la caída de tensión máxima que se admite para estas líneas es del 0,5 % para contadores totalmente concentrados. Según estos datos, calcula la sección de los conductores de la línea general de alimentación de un edificio de viviendas en el que se prevé una demanda de potencia de 100 kW con un cos $\varphi = 0{,}9$. La línea es trifásica a 400 V entre fases y con una longitud de 15 m; consta de 3 cables unipolares de cobre más el neutro de XLPE instalados bajo tubo empotrado en obra.

15.19. Para la acometida de una pequeña factoría se ha instalado una línea trifásica de 200 m de longitud y con una sección de 35 mm^2. La tensión entre fases es de 500 V y la potencia instalada es de 50 kW con un cos $\varphi = 0{,}7$. Determina el valor porcentual de la caída de tensión que produce esta línea, así como la pérdida de potencia. ¿Cuánto se reducirá la pérdida de potencia en la línea si se corrige el *FP* a 0,95?

Actividades de evaluación resueltas

A continuación se dan los enunciados de una serie de actividades. Estas actividades las podrás encontrar resueltas accediendo al MATERIAL WEB creado para este texto.

15.1. Se dispone de tres resistencias de 30 W cada una, asociadas en estrella, y acopladas a una red trifásica de 380 V de tensión de línea. Calcula:

a) Tensión en cada una de las resistencias.

b) Corriente de fase y de línea de la asociación.

c) Potencia consumida por el conjunto de las tres resistencias.

15.2. Una red trifásica de 400 V (tensión de línea), 50 Hz, alimenta una instalación eléctrica que dispone de los siguientes receptores: (1) 4 motores trifásicos de 20 CV con un factor de potencia de 0,8 y un rendimiento de 0,92, cada uno; (2) un sistema de calefacción constituido por un conjunto de tres resistencias, conectadas en estrella, de 100/3 Ω cada una; (3) una batería de condensadores, conectados en estrella, de 955 μF cada uno.

Halla:

a) Potencia activa, reactiva y aparente que consumen los diferentes elementos de la instalación.

b) Factor de potencia de la instalación.

c) Intensidad de línea absorbida por la red.

15.3. Tres impedancias de $Z = 3 + j4\ \Omega$ se conectan a una línea trifásica de 220 V y frecuencia 50 Hz según se muestra en la Figura 15.38. Calcula:

a) Tensiones de fase y de línea complejas.

b) La intensidad de fase y de línea compleja de cada receptor.

c) La potencia compleja y el factor de potencia.

© Ediciones Paraninfo

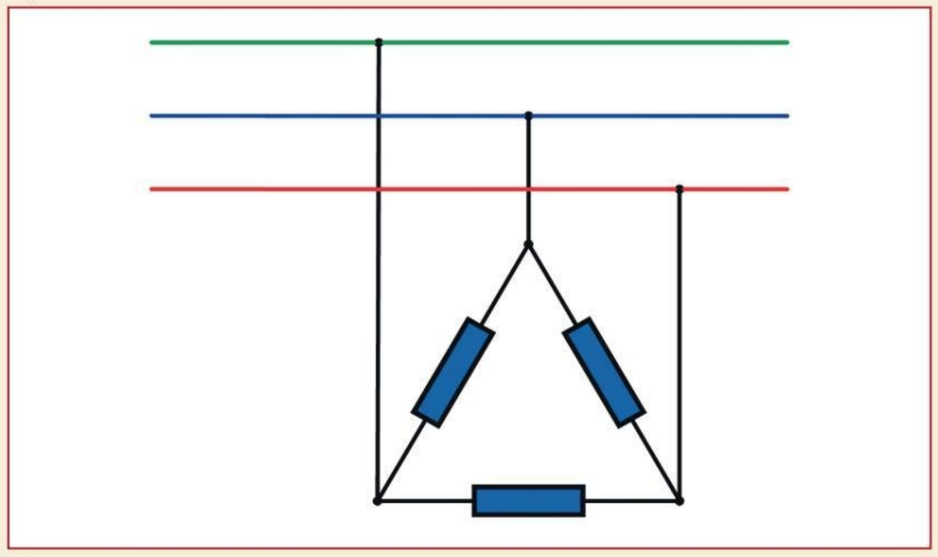


Figura 15.38.

15.4. En la Figura 15.39 se representan dos cargas equilibradas conectadas a una línea trifásica de 380 V (tensión de línea) y 50 Hz. La carga formada por las impedancias Z_1 absorbe una potencia activa de 3 kW y una potencia reactiva de 5 kVAR. Halla:

a) Valor de las impedancias complejas Z_1.

b) Valor de la potencia activa y reactiva absorbida por la carga constituida por las impedancias $Z_2 = 10 + j10\ \Omega$.

c) Valor eficaz de la intensidad que circula por los conductores de la línea que alimenta a las dos cargas.

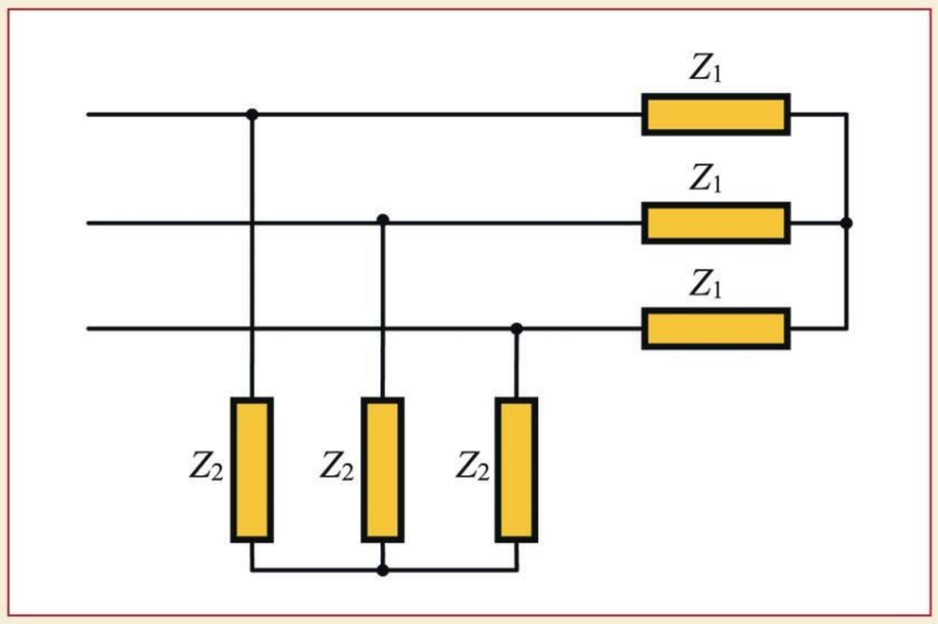


Figura 15.39.

15.5. Una instalación de corriente alterna trifásica está conectada a una red de 380 V (tensión de línea) y 50 Hz. La potencia activa absorbida por la instalación es de 8 kW y esta tiene un factor de potencia 0,8 (inductivo).

a) Calcula la intensidad que circula por los conductores que conectan la instalación a la red.

b) Corrige el factor de potencia de la instalación a 0,9 (inductivo). Indica qué elementos es necesario introducir en el circuito, cómo conectarlos y qué valor deben tener.

c) Calcula el valor de la potencia reactiva absorbida por la instalación antes y después de la corrección del factor de potencia.

15.6. Una línea trifásica equilibrada, cuya tensión de línea es de 400 V, alimenta a las siguientes cargas trifásicas equilibradas: (1) Motor con conexión estrella de potencia útil $P = 10$ kW, cos $\varphi = 0{,}8$ inductivo y rendimiento $\eta = 0{,}89$, (2) Horno eléctrico con conexión triángulo de $S = 15$ kVA y cos $\varphi = 0{,}9$ inductivo y (3) Batería de condensadores con conexión triángulo de $Q = 5$ kVAR. Determina:

a) Intensidad que circula por la línea.

b) Factor de potencia del conjunto de las cargas indicando si es inductivo o capacitivo.

c) Intensidad de fase de la carga (3).

d) Reactancia de cada fase de la batería de condensadores.

15.7. Dos motores asíncronos trifásicos, A y B, tienen en su placa de características los mismos valores de potencia nominal, tensión nominal y rendimiento. Sin embargo, el motor A tiene un factor de potencia mayor que el del motor B. Indica, justificando la respuesta, cuál de los dos motores tiene una mayor corriente nominal.

15.8. En un sistema trifásico equilibrado en triángulo cuya tensión de línea es de 240 V se conoce que la potencia aparente (S_T) tiene un valor de 7,2 kVA y que la relación entre potencia activa y reactiva (P_T/Q_T) vale 0,5. A partir de estos datos, calcula:

a) La corriente de fase y de línea.

b) El factor de potencia.

c) La potencia activa y reactiva del sistema.

15.9. Una red trifásica de 380 V eficaces de tensión de línea alimenta un motor asíncrono trifásico de $P = 3$ kW con un cos $\varphi = 0{,}9$ (inductivo) y un grupo condensador de compensación del factor de potencia con una $Q_c = 1$ kVAR. Determina:

a) El factor de potencia de la instalación.

b) La corriente de línea, si el motor está conectado en triángulo.

15.10. Una red trifásica alimenta dos cargas. La primera consume una potencia $P_1 = 3.000$ W con un cos $\varphi = 0{,}5$ (en retraso) y la segunda una potencia aparente $S_2 = 4.535$ VA con un cos $\varphi = 0{,}93$ (en adelanto). Determina:

a) El triángulo de potencias indicando los valores de P, Q y S de la red.

b) El factor de potencia de la red.

15.11. A una línea trifásica de tensión de línea 380 V y $f = 50$ Hz, se conecta un receptor que consume una potencia de 4 kW con un cos $\varphi = 0{,}83$ inductivo:

a) Realiza el esquema y calcula el triángulo de potencias.

b) Capacidad de cada condensador de la batería de condensadores, a conectar en triángulo, necesaria para elevar el cos φ a 0,97.

© Ediciones Paraninfo

16 Medidas eléctricas

Contenidos

- **16.1.** Errores en la medida
- **16.2.** Normas generales para la toma de medidas eléctricas
- **16.3.** Instrumentos de medida analógicos y digitales
- **16.4.** Sistemas de medida
- **16.5.** Medida de intensidad de corriente
- **16.6.** Medidas de tensión
- **16.7.** El polímetro
- **16.8.** Medidas de potencia
- **16.9.** Medida de energía en sistemas trifásicos
- **16.10.** Medida de la frecuencia
- **16.11.** Medida del factor de potencia
- **16.12.** Medida de resistencias eléctricas
- **16.13.** Sistemas avanzados de medida
- **16.14.** El osciloscopio

Algunos de los aparatos de medida más comunes, como voltímetros, amperímetros y vatímetros, ya son conocidos por todos nosotros, puesto que han sido tratados en unidades anteriores. En esta unidad estudiaremos las técnicas más comunes para realizar las medidas eléctricas así como el funcionamiento básico de los aparatos de medida.

La medición de las diferentes magnitudes eléctricas de una instalación o aparato eléctrico nos ayudan a comprobar su buen funcionamiento, detectar y reparar averías, estudiar con detenimiento ciertos procesos que nos ayudan a diseñar instalaciones y dispositivos eléctricos, así como a evaluar su comportamiento ante eventuales cambios.

Objetivos

- Describir las características más relevantes (tipos de errores, precisión, posición de trabajo, etc.), la tipología, clases y procedimientos de uso de los instrumentos de medida utilizados en los circuitos electrotécnicos básicos.
- Realizar con precisión y seguridad las medidas de las magnitudes eléctricas fundamentales (tensión, intensidad, resistencia, potencia, frecuencia, etc.), utilizando, en cada caso, el instrumento (polímetro, vatímetro, osciloscopio, etc.) y los elementos auxiliares apropiados.

16.1. Errores en la medida

Siempre que se vaya a tomar una medida eléctrica, nunca se obtendrá su valor exacto. Esto es así porque siempre se cometen errores, como, por ejemplo, que el aparato de medida no esté correctamente calibrado, porque no se haya utilizado el método correcto, por falta de habilidad del operador que toma la medida, etcétera.

Dado que se cometen errores en las medidas eléctricas, convendrá tener en cuenta una serie de aspectos a la hora de evaluar los resultados.

16.1.1. Errores absolutos y relativos

El error absoluto que se comete en una medida es la diferencia entre el valor leído (V_L) por el aparato de medida y el valor real (V_R) de la medida.

$$E_{ab} = V_L - V_R$$

Para obtener el valor más aproximado al real utilizaremos un aparato de medida patrón de laboratorio.

Actividad resuelta 16.1

Para comprobar el error que comete un voltímetro se toma una medida de 100 V y luego se comprueba esa medida con un voltímetro de gran precisión, que da como resultado 98 V. Determina el error absoluto cometido por el voltímetro.

Solución:

$$E_{ab} = V_L - V_R = 100 - 98 = 2 \text{ V}$$

Dado que el conocimiento del error absoluto no nos da una idea clara del error cometido, utilizaremos para ello el error relativo, que nos indica la relación porcentual entre el error absoluto y el valor real:

$$E_r\,\% = \frac{E_{ab}}{V_R}\,100$$

Actividad resuelta 16.2

Averigua el error relativo cometido en la medida de la Actividad resuelta 16.1.

Solución:

$$E_r\,\% = \frac{E_{ab}}{V_R} = \frac{2}{98}\,100 = 2\,\%$$

16.1.2. Precisión de un aparato de medida

Cuanto más preciso sea un aparato de medida, más nos acercaremos a la medida real. Para definir lo preciso que es un aparato de medida se utiliza el concepto de **clase,** que es el error absoluto máximo que puede cometer un aparato de medida referido al valor máximo de la escala ($V_{máx}$) de medida.

$$\text{Clase} = \frac{E_{ab\ máx}}{V_{máx}}\,100$$

La clase suele aparecer inscrita en el aparato de medida o en la información técnica que proporciona el fabricante. En la práctica solo se fabrican aparatos de medida de las siguientes clases de precisión: 0,1, 0,2, 0,5, 1, 1,5, 2,5, 5. Dependiendo del tipo de uso a que vayamos a destinar el aparato de medida, así seleccionaremos la clase más adecuada. Así, por ejemplo, si necesitamos una gran precisión de medida para realizar ensayos de laboratorio, utilizaremos aparatos de clase 0,1, 0,2 o 0,5.

Actividad resuelta 16.3

Para verificar la precisión de un amperímetro se lo somete a una contrastación con un amperímetro patrón. De todos los valores obtenidos se observa que el mayor de los errores absolutos cometidos es de 0,5 A. ¿Cuál será la clase de este amperímetro si el valor máximo de su escala es de 50 A?

Solución:

$$\text{Clase} = \frac{E_{ab\ máx}}{V_{máx}}\,100 = \frac{0{,}5}{50}\,100 = 1$$

Actividad resuelta 16.4

Calcula el error máximo que puede cometer un voltímetro de clase 1 si el valor máximo que alcanza su escala es de 300 V.

¿Cual sería el error máximo que puede llegar a cometer este voltímetro, si su clase hubiese sido: a) 0,1; b) 5?

Solución:

$$E_{ab\ máx} = \frac{\text{Clase} \cdot V_{máx}}{100} \cdot \frac{1 \cdot 300}{100} = 3 \text{ V}$$

a) 0,3 V; b) 15 V

© Ediciones Paraninfo

16.2. Normas generales para la toma de medidas eléctricas

Antes de realizar la medida de una magnitud eléctrica habrá que tener en cuenta una serie de aspectos previos que nos garanticen el mejor resultado. Seguidamente exponemos algunas de estas consideraciones:

- Como no todos los aparatos de medida funcionan igual en C.A. que en C.C., habrá que seleccionar el tipo de corriente adecuado en cada caso.
- El campo de medida de un aparato de medida nos indica los valores entre los cuales mide el aparato con exactitud. Antes de realizar una medida habrá que prever con aproximación el orden de magnitud de la medida y con ello seleccionar el aparato más adecuado. Por ejemplo, supongamos que deseamos medir la tensión de una pila. Para ello, seleccionaremos un voltímetro de C.C. con un campo de medida de 0-5 V. Si utilizásemos un voltímetro con un campo de medida de 0-300 V, probablemente no apreciaríamos la medida en la escala.
- Utilizaremos el aparato de medida de la clase adecuada según el orden de precisión que requiera la medida. Hay que tener en cuenta que cuanto más preciso sea el aparato, más elevada resultará su adquisición. Así, por ejemplo, no merecerá la pena en ningún caso utilizar un aparato de clase 0,1 para medir la tensión en una línea de suministro eléctrico.
- Hay que procurar evitar las prisas y anotar los valores obtenidos de la medida de forma ordenada en el formulario previamente preparado.
- Conviene controlar periódicamente los instrumentos de medida, comprobando si mantienen su nivel de precisión.
- Si el aparato es de aguja, conviene observar la posición en la que debe estar el instrumento en el momento de tomar la medida, ya que si no el peso de la aguja podría influir en el resultado. La posición adecuada aparece inscrita en la pantalla del instrumento con un símbolo, tal como se muestra en la Tabla 16.2. Así, por ejemplo, el voltímetro de la Figura 16.1 indica una posición de trabajo horizontal.
- En instrumentos con indicación analógica, es importante realizar una estimación previa de la constante de la escala (K) para evitar errores en la estimación de la medida.

En la Figura 16.1 se muestra como ejemplo la pantalla de un voltímetro con un campo de medida de 0-500 V. La constante de escala para este aparato de medida será:

$$K = \frac{\text{Fondo de escala}}{\text{N.º total de divisiones}} = \frac{500\ \text{V}}{50\ \text{div}} = 10\ \text{V/div}$$

Así, por ejemplo, si tomamos una medida como la que se muestra en la Figura 16.1, el resultado de la misma sería:

$$\text{Medida} = \text{N.º de divisiones medido} \cdot K =$$
$$= 27 \cdot 10\ \text{V/div} = 270\ \text{V}$$

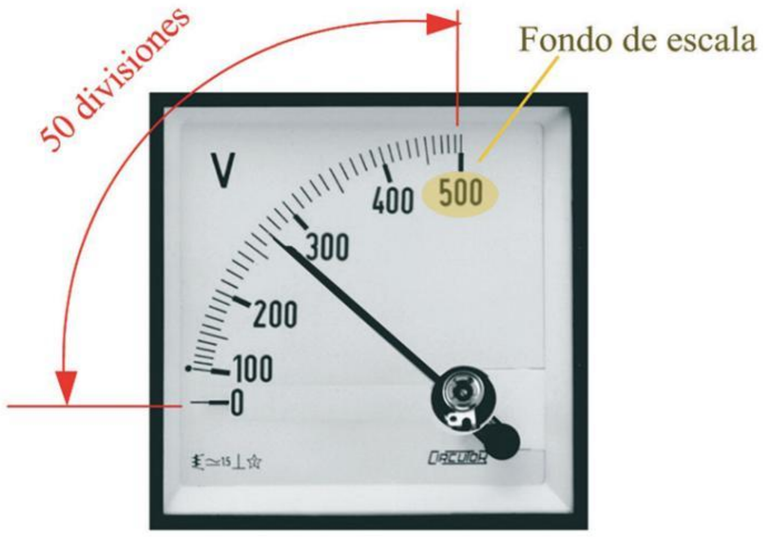


Figura 16.1. Voltímetro de 500 voltios de fondo de escala y 50 divisiones con una lectura de 27 div.

16.3. Instrumentos de medida analógicos y digitales

Los instrumentos de medida analógicos son aquellos que presentan la medida mediante una aguja móvil que se desplaza por una escala graduada [Figura 16.2(a)]. En los instrumentos de medida digitales el resultado de la medida se puede leer como una cifra numérica (dígitos) en una pantalla [Figura 16.2(b)].



(a) (b)

Figura 16.2. Instrumentos de medida: (a) analógico; (b) digital.

Los instrumentos de medida analógicos son los que más se han venido utilizando hasta ahora, aunque el abaratamiento de los circuitos integrados está haciendo que aquellos queden cada vez más relegados por los digitales.

El principio general de funcionamiento de los aparatos analógicos es el siguiente (Figura 16.3): por lo general, la

© Ediciones Paraninfo

corriente a medir se hace circular por una bobina que puede girar sobre un eje. Esta bobina se introduce en el seno de un campo magnético, que puede ser generado por un imán. La corriente a medir genera en la bobina móvil otro campo magnético que, al interactuar con el campo fijo del imán, produce una fuerza que tiende a desplazar a la bobina móvil en un determinado sentido. Solidaria a la bobina móvil se fija la aguja medidora sobre una escala graduada. Además se incluye un muelle, generalmente de forma circular, que se opone al movimiento de la aguja. La fuerza antagonista que desarrolla el muelle es proporcional a su estiramiento. Por otro lado, la fuerza que hace girar la aguja es proporcional a la corriente a medir. Cuando los pares de fuerzas de la bobina y del muelle antagonista se igualan se obtiene la medida leyendo el desplazamiento de la aguja sobre la escala graduada.

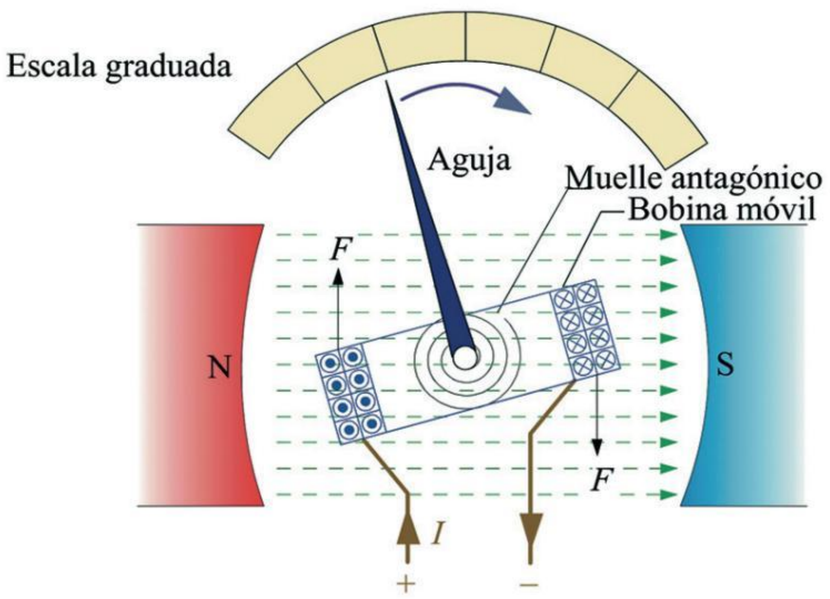


Figura 16.3. Instrumento de medida de bobina móvil.

En los instrumentos digitales no existe ningún elemento mecánico. La medida se realiza gracias a complejos circuitos electrónicos en forma de circuitos integrados. El resultado de la medida se presenta en una pantalla o *display* en forma de cifra numérica o dígitos.

Los instrumentos de medida digitales presentan varias ventajas que los hacen ideales para la mayoría de las aplicaciones. Por lo general, son más precisos que los analógicos. La lectura de la medida es mucho más cómoda, ya que leemos directamente la cifra en la pantalla sin tener que interpretar una escala graduada. Esto los hace ideales en su uso como aparatos portátiles, donde es muy importante tomar una lectura rápida y precisa de la medida. Son muy robustos; aguantan fuertes impactos y vibraciones sin alteración de su funcionamiento. Esto último se debe a que en su estructura no existen elementos móviles.

Los instrumentos de medida analógicos tienden a ser sustituidos cada vez más por los digitales, sobre todo en los aparatos de medida portátiles. Sin embargo, en los aparatos de medida que se insertan en los cuadros (aparatos de medida de cuadro) de control, mando y distribución de las instalaciones eléctricas, se siguen empleando los instrumentos analógicos. Hay que pensar que los aparatos de cuadro suelen estar dispuestos para que un operario con una visualización rápida revise el estado de todas las magnitudes eléctricas. Siempre es más visual, fotográfico y rápido de interpretar la situación en una determinada posición de una aguja sobre una escala de un aparato de medida analógico que la interpretación de una cifra numérica en uno digital.

16.4. Sistemas de medida

Existen una amplia variedad de instrumentos o sistemas de medida que mediante un determinado mecanismo consiguen tomar la medida de la magnitud eléctrica deseada. Vamos a estudiar los más básicos y sus características fundamentales, así como su aplicación para la construcción de aparatos de medida.

El tipo de sistema de medida utilizado por un aparato de medida se representa por un símbolo, que suele venir inscrito de forma visible en la pantalla del aparato. Antes de entrar en más detalles, en la Tabla 16.1 se expone un resumen con los sistemas de medida y su símbolo correspondiente y en la Tabla 16.2 los símbolos que más comúnmente se utilizan para describir las características de los aparatos de medida.

Tabla 16.1. Símbolos de los instrumentos de medida

Sistema de medida	Símbolo	Sistema de medida	Símbolo
Bobina móvil		Bobina móvil con rectificador	
Bobina móvil con convertidor incorporado		Hierro móvil	
Electrodinámico		Ferrodinámico	
Inducción		Conciencímetro de inducción	
Bimetálico		Láminas vibrantes	

Tabla 16.2. Símbolos utilizados para describir las características de los aparatos de medida

Denominación	Símbolo	Denominación	Símbolo
Apantallado electrostático		Corriente trifásica, medida solo con un sistema de medida	
Sistema de medida astático	ast	Corriente trifásica, medida con dos sistemas de medida	

© Ediciones Paraninfo

Denominación	Símbolo	Denominación	Símbolo
Corriente continua	—	Posición cero de la aguja	
Corriente alterna	~	Marca de tensión de ensayo de 500 V ~. Cifra dentro de la estrella indica la tensión de ensayo en kV ~.	
Corriente continua y alterna	⎓	¡Atención, ténganse presentes las instrucciones de manejo!	
Posición de trabajo vertical	⊥	Posición de trabajo horizontal	
Posición de trabajo inclinada	nº		

Actividad resuelta 16.5

Indica el significado de los símbolos que aparecen en el amperímetro de la Figura 16.4.

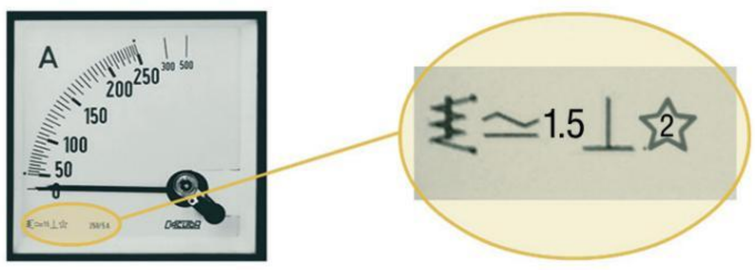


Figura 16.4.

Solución:

Amperímetro; fondo de escala: 250 A; constante de la escala: 5 A/div; sistema de medida: hierro móvil; corriente a medir: C.A. y C.C.; clase: 1,5; posición de trabajo: vertical; tensión de ensayo: 2 kV.

16.4.1. Bobina móvil

Este sistema de medida, también conocido por el nombre de cuadro móvil, es idéntico al utilizado como ejemplo para explicar el principio general de funcionamiento de los instrumentos de medida analógicos (Figura 16.3).

El sistema está formado por un imán permanente fijo. Dentro del campo magnético formado por el imán se coloca la bobina móvil a la que se fija la aguja indicadora. Con el fin de asegurar que ningún campo magnético exterior altere el funcionamiento del aparato de medida, se coloca una carcasa magnética a todo el conjunto.

En el eje de giro de la bobina móvil se colocan dos muelles en espiral que además de producir la fuerza antagónica sirven de camino de entrada y salida a la corriente de la bobina. De esta manera, la corriente que se mide fluye por la bobina, que al estar bajo la acción de un campo magnético, desarrolla una fuerza proporcional a dicha corriente, que tiende a desplazar a la aguja hasta que se alcanza el punto de equilibrio entre dicha fuerza y la antagónica desarrollada por los muelles.

Es importante tener en cuenta que si se invierte el sentido de la corriente eléctrica también se invertirá el sentido de la fuerza motriz que desplaza la aguja. Por eso este sistema de medida solo se puede utilizar para C.C. y para una polaridad determinada que deberá venir indicada claramente en las bornas de conexión del aparato.

Por último, hay que indicar que, dado que la corriente se introduce en la bobina por los muelles, no es posible realizar medidas directas de grandes corrientes, ya que los muelles se pueden sobrecalentar y dilatar, produciendo errores en la medida. Los valores máximos que se miden son del orden de 0,1 A. Como estudiaremos más adelante, se puede ampliar el alcance de medida de estos aparatos mediante sistemas que derivan parte de la corriente por *shunts*.

El empleo de este sistema es muy amplio y se utiliza para la fabricación de voltímetros, milivoltímetros, amperímetros, miliamperímetros, microamperímetros, óhmetros, etcétera.

16.4.2. Bobina móvil con rectificador

El puente rectificador es un dispositivo construido a base de diodos que convierte la C.A. en C.C. Para poder utilizar el sistema de medida de bobina móvil en C.A. se conecta un puente rectificador (Figura 16.5) entre la magnitud a medir y el instrumento de medida. Para la calibración de este aparato se utiliza corriente alterna sinusoidal y su escala nos indica valores eficaces, por lo que si midiésemos una corriente alterna no sinusoidal se producirían errores considerables.

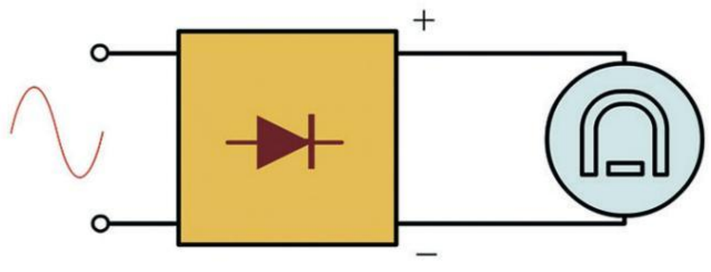


Figura 16.5. Voltímetro de bobina móvil con rectificador.

© Ediciones Paraninfo

16.4.3. Bobina móvil con convertidor incorporado

Este sistema consta de un aparato de bobina móvil al que se le incorpora un convertidor de tipo electrónico. Así, por ejemplo, si se le incorpora un convertidor de frecuencia a C.C. de función lineal es posible medir frecuencias (frecuencímetro de aguja), y si se le incorpora un convertidor de ángulo de fase a C.C. de función lineal es posible medir el factor de potencia de una instalación (fasímetros electrónicos).

Los sistemas de medida de bobina móvil, a los que se les incorporan otros elementos, tales como rectificador, convertidores, ampliaciones del alcance de diferentes medidas, etc., son ideales para la construcción de polímetros (aparatos de medida múltiple que sirven para medir diferentes magnitudes eléctricas con diferentes campos de medida tanto en C.C. como en C.A.).

16.4.4. Hierro móvil

Consta de una bobina fija por la que se hace pasar la corriente que se va a medir (Figura 16.6). En el interior de la bobina se fija una lámina de hierro dulce. Enfrentada a esta lámina se sitúa otra lámina de hierro dulce y se une a un eje giratorio y a la aguja indicadora. Además, como en el sistema de medida de bobina móvil, se incluye un muelle antagonista.

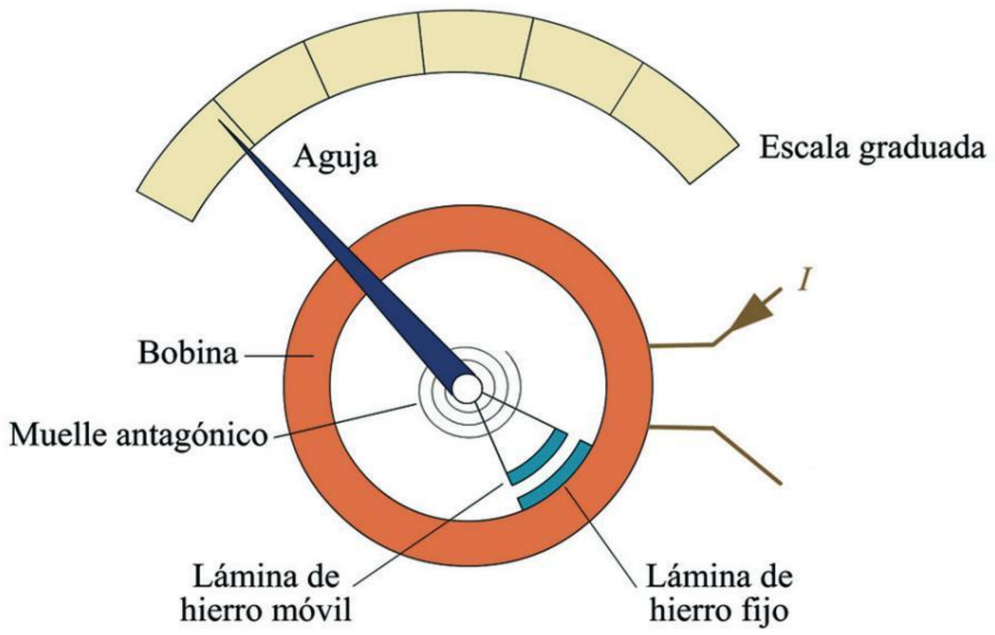


Figura 16.6. Instrumento de hierro móvil.

Al circular la corriente que se mide por la bobina se produce un campo magnético que magnetiza las dos láminas de hierro con la misma polaridad, por lo que aparece entre ellas una fuerza de repulsión que tiende a desplazar la aguja. La fuerza producida es proporcional a la corriente a medir y la posición de la aguja viene determinada por el equilibrio entre esta fuerza y la antagónica desarrollada por el muelle en su estiramiento.

La ventaja fundamental de este instrumento de medida es que sirve para medir tanto corriente continua como corriente alterna. Hay que tener en cuenta que cuando la C.A. invierte el sentido de la corriente por la bobina, se invierte también el campo magnético que atraviesa las láminas de hierro; pero la polaridad relativa de las dos láminas siempre será igual, por lo que el efecto de repulsión se mantiene para cualquier tipo de corriente.

Debido a que la corriente entra directamente a la bobina fija, es posible hacer circular por ella grandes corrientes, y pueden hacerse medidas directas con este sistema de medida de hasta más de 300 A. Sin embargo, su uso se ve restringido para frecuencias no superiores a los 100 Hz, ya que para altas frecuencias los efectos de histéresis pueden falsear la medida. En los casos en que sean necesarias medidas de C.A. de frecuencias de hasta 10 kHz, se aconseja el uso de aparatos de bobina móvil con rectificador.

Dada la robustez y sencillez de estos sistemas de medida, su empleo se dirige fundamentalmente a la construcción de amperímetros y voltímetros de C.A.

16.4.5. Electrodinámico

Consta de dos bobinas, una móvil, solidaria con el eje y la aguja indicadora, y otra fija, que envuelve a la primera (Figura 16.7). Al igual que el sistema de bobina móvil, el sistema antagonista está formado por dos muelles en espiral que sirven también para conectar eléctricamente la bobina móvil.

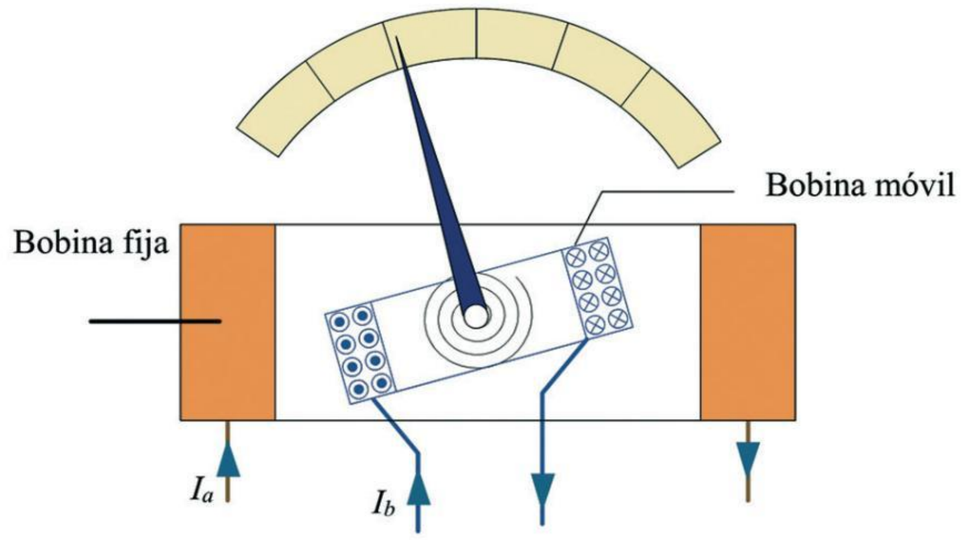


Figura 16.7. Instrumento electrodinámico.

El funcionamiento de este instrumento es similar al de bobina móvil, pero aquí el campo magnético fijo lo produce la bobina fija al ser atravesada por una de las corrientes a medir.

La mayor aplicación de este sistema de medida es como vatímetro. La bobina fija se utiliza como amperimétrica, conectándose en serie. La bobina móvil se utiliza como voltimétrica y se conecta en paralelo. Utilizado para corriente continua, la fuerza motriz que desplaza a la aguja es resultado del producto de la tensión por la intensidad, calibrándose la escala en vatios. Utilizado para corriente alterna, la fuerza motriz depende del producto de la ten-

© Ediciones Paraninfo

sión por la intensidad por el cos φ, calibrándose también la escala en vatios.

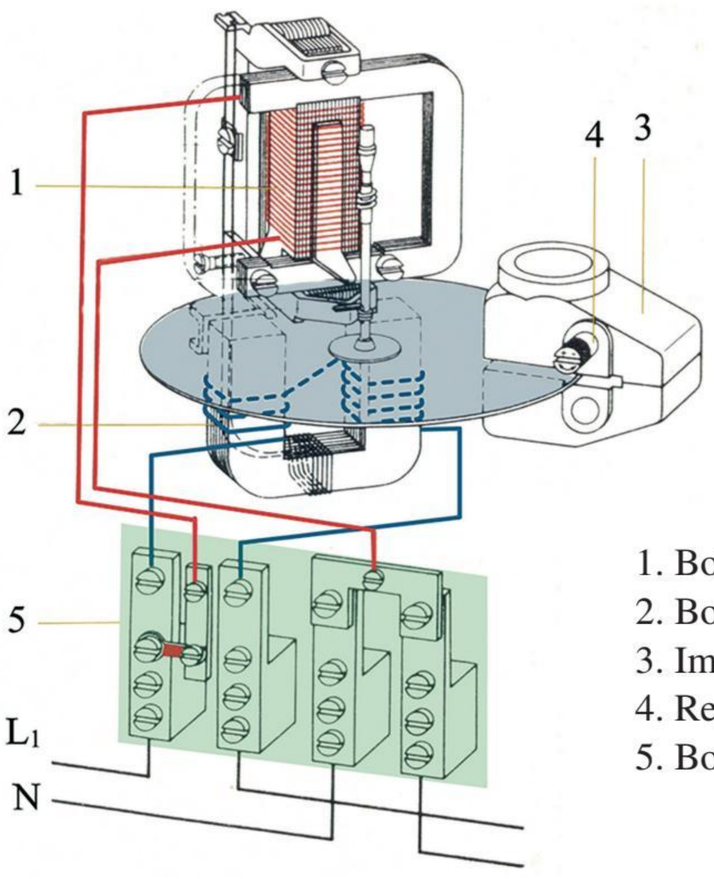
La razón de que este sistema se pueda utilizar tanto para corriente continua como para corriente alterna está en el hecho de que, en el caso de C.A., la corriente cambia de sentido al mismo tiempo en las dos bobinas, por lo que la polaridad relativa del campo magnético desarrollado por ambas no cambia y, por tanto, la fuerza motriz siempre actúa en el mismo sentido. Conectando las dos bobinas en serie o en paralelo también se pueden utilizar como voltímetros y amperímetros.

16.4.6. Ferrodinámico

Este sistema de medida es muy similar al electrodinámico. La única diferencia se halla en que se le incorpora a cada una de las bobinas un núcleo de chapa magnética con el fin de eliminar los errores que pudieran producirse debido a campos magnéticos externos al aparato de medida.

16.4.7. Inducción

Este sistema de medida se utiliza fundamentalmente para realizar la medida de la energía en sistemas de C.A (Figura 16.8).



1. Bobina de tensión
2. Bobina de intensidad
3. Imán de frenado
4. Reglaje del imán
5. Bornes de conexión

Figura 16.8. Instrumento de inducción.

Consta de dos bobinas con núcleo de chapa magnética. Una hace las veces de amperimétrica y la otra de voltimétrica. Dichas bobinas se disponen de tal manera que el campo magnético variable generado por ambas atraviese un disco giratorio de aluminio al que se incorpora un mecanismo registrador. Los campos variables de ambas bobinas generan en el disco de aluminio corrientes parásitas que, al interactuar con los campos magnéticos, producen una fuerza de impulsión que hace girar el disco. Esta fuerza de impulsión es proporcional a la potencia activa a medir. El sistema que desarrolla la fuerza antagonista de frenado lo produce un imán permanente colocado entre las dos superficies del disco. El número de vueltas que se producen resulta ser proporcional a la energía eléctrica. Gracias al mecanismo registrador, calibrado en kWh, podemos obtener una lectura de la energía eléctrica consumida.

16.4.8. Bimetálico

Este sistema está basado en la dilatación que se produce en una espiral bimetálica cuando es recorrida por una corriente eléctrica. Para compensar el efecto de la temperatura ambiente sobre el instrumento medidor se coloca otra espiral dispuesta en sentido contrario a la motriz. Este instrumento mide el valor medio de la corriente en C.C. y el eficaz en C.A. hasta 1.000 Hz. Son ideales para dar una lectura de los valores medios en aquellas instalaciones en las que existan grandes fluctuaciones, ya que el tiempo de respuesta (hasta que el bimetal alcanza su temperatura final) es alto, del orden de 10 minutos.

16.4.9. Láminas vibrantes

Estos aparatos se utilizan como frecuencímetros para C.A. Disponen de una bobina que se alimenta con la tensión a medir. El campo magnético alterno que genera la bobina atraviesa una serie de láminas de diferentes características que se ponen a vibrar de acuerdo con la frecuencia. La medida se obtiene cuando la frecuencia a medir hace vibrar una determinada lámina calibrada según una determinada frecuencia de resonancia.



Figura 16.9. Frecuencímetro de láminas vibrantes.

16.5. Medida de intensidad de corriente

La medida de intensidad se realiza mediante el amperímetro. Se conecta en serie con el circuito cuya corriente se quiere medir, tal como se indica en la Figura 16.10. Es aconsejable que la resistencia interna del instrumento de medida (R_A) sea lo más baja posible. De esta forma, se evitan caídas considerables de tensión (U_A) en el amperímetro y consumos de potencia elevados.

© Ediciones Paraninfo

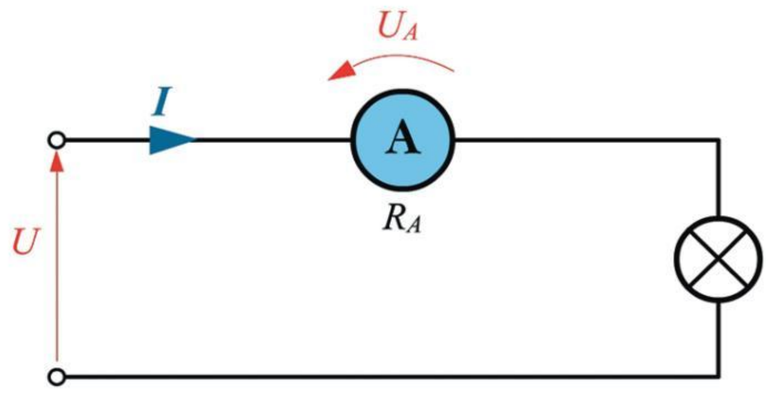


Figura 16.10. Medida de intensidad con amperímetro.

Para medidas de C.A. es indiferente la polaridad de conexión. Sin embargo, para C.C. hay que conectar el amperímetro según se indique en la polaridad de este aparato; de otra manera la aguja tenderá a indicar en sentido contrario. Para aparatos de medida digitales no es tan importante esta consideración, puesto que son capaces de indicar lecturas negativas en su *display*.

Cuando la corriente a medir es muy elevada resulta difícil encontrar el aparato de medida adecuado para realizar una medida directa. En estos casos se recurre a sistemas de apoyo que consiguen ampliar el alcance de medida sin cambiar de amperímetro. Para corriente continua se emplean los *shunts* y para corriente alterna los transformadores de intensidad.

16.5.1. Ampliación del alcance de un amperímetro mediante *shunt*

Supongamos que disponemos de un amperímetro con un alcance de 50 A como máximo y que necesitamos incorporar un amperímetro de cuadro para la medida de la intensidad de corriente en un sistema de generación de energía solar fotovoltaica. La potencia instalada es de 6 kW y la tensión de alimentación es de 24 V en C.C. En este ejemplo, la corriente a medir sería del orden de:

$$I = \frac{P}{U} = \frac{6.000}{24} = 250 \text{ A}$$

Para poder medir esta corriente con el amperímetro de 50 A emplearemos una resistencia *shunt*, como la mostrada en la Figura 16.11.



Figura 16.11. Resistencia *shunt.*

Este dispositivo consiste en conectar una resistencia en paralelo con el amperímetro que consiga desviar parte de la corriente que se quiere medir (Figura 16.12). En nuestro ejemplo, la resistencia *shunt* deberá desviar 200 A (I_S) para que por el amperímetro solo circulen 50 A (I_A) cuando se quiera medir una corriente de 250 A (I).

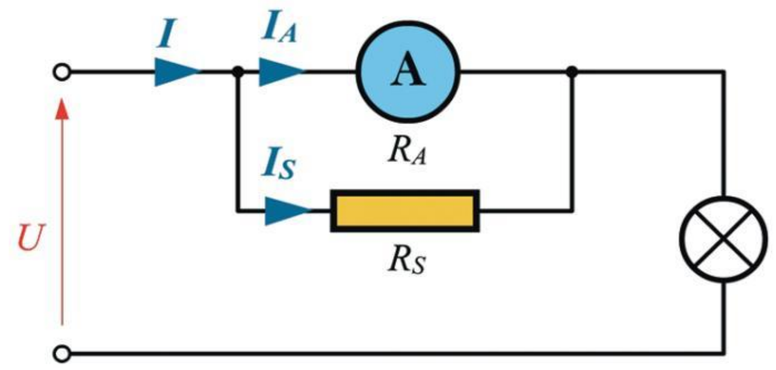


Figura 16.12. Esquema de conexión de un *shunt.*

Para poder calcular la resistencia que deberá poseer el *shunt* necesitamos conocer previamente la resistencia interna del amperímetro R_A. Como la resistencia R_S del *shunt* queda en paralelo con la del amperímetro, su caída de tensión es la misma, por lo que se cumple que:

$$R_A\, I_A = R_S\, I_S$$

de donde:

$$R_S = \frac{R_A\, I_A}{I_S}$$

Actividad resuelta 16.6

Teniendo en cuenta que el amperímetro de 50 A mencionado en la exposición anterior posee una resistencia interna de 0,1 Ω, calcula el valor de la resistencia del *shunt* para ampliar el alcance del aparato de medida hasta los 250 A.

Solución:

La resistencia del *shunt* es:

$$R_S = \frac{R_A I_A}{I_S} = \frac{0{,}1 \cdot 50}{200} = 0{,}025\ \Omega$$

En este caso hemos conseguido aumentar el alcance del amperímetro en:

$$m = \frac{I}{I_A} = \frac{250}{50} = 5 \text{ veces}$$

Este dato habrá que tenerlo en cuenta a la hora de interpretar la lectura de la medida, ya que la constante de la escala del instrumento habrá que multiplicarla por 5.

© Ediciones Paraninfo

Actividad resuelta 16.7

Un amperímetro permite medir una corriente como máximo de 2 mA. Posee una escala fraccionada en 40 divisiones y una resistencia interna de 1 Ω. Se desea ampliar el alcance del aparato para poder realizar medidas hasta 2 A. Calcula la resistencia del *shunt*, así como la constante de la escala del aparato con y sin *shunt*. ¿Cuál será el resultado de la medida del amperímetro con *shunt* si lee en la escala 10 divisiones?

Solución:

El *shunt* debe desviar una corriente de:

$$I_S = I - I_A = 2 - 0{,}002 = 1{,}998 \text{ A}$$

La resistencia del *shunt* es:

$$R_S = \frac{R_A I_A}{I_S} = \frac{1 \cdot 0{,}002}{1{,}998} = 0{,}001\ \Omega$$

En este caso hemos conseguido aumentar el alcance del amperímetro en:

$$m = \frac{I}{I_A} = \frac{2}{0{,}002} = 1.000 \text{ veces}$$

La constante de la escala sin *shunt* es:

$$K = \frac{2 \text{ mA}}{40 \text{ div}} = 0{,}05 \text{ mA/div} = 50\ \mu\text{A/div}$$

La constante del aparato con *shunt* es:

$$K_S = \frac{2 \text{ A}}{40 \text{ div}} = 0{,}05 \text{ A/div} = 50 \text{ mA/div}$$

La medida para 10 divisiones es:

$$10 \text{ div} \cdot 0{,}05 \text{ A/div} = 0{,}5 \text{ A}$$

16.5.2. Ampliación del alcance de amperímetros mediante transformadores de intensidad

Cuando se desea ampliar el alcance de amperímetros en C.A. es más sencillo recurrir al empleo de transformadores de intensidad. Una de las características fundamentales de estos dispositivos es que solamente funcionan en C.A. De esta manera, se restringe el empleo del *shunt* para ampliar el alcance de amperímetros en C.C. y en amperímetros de pequeñas corrientes en C.A.

En la Figura 16.13 se ha conectado un transformador de intensidad en la línea con el objeto de medir la corriente elevada que fluye por ella. El transformador de intensidad consta de dos circuitos: el primario, que se conecta en serie con la línea donde se quiere medir la corriente, y el secundario, que se conecta entre los extremos del amperímetro. Vamos a estudiar ahora la aplicación práctica del transformador, dejando el estudio más detallado de este para la Unidad 17.

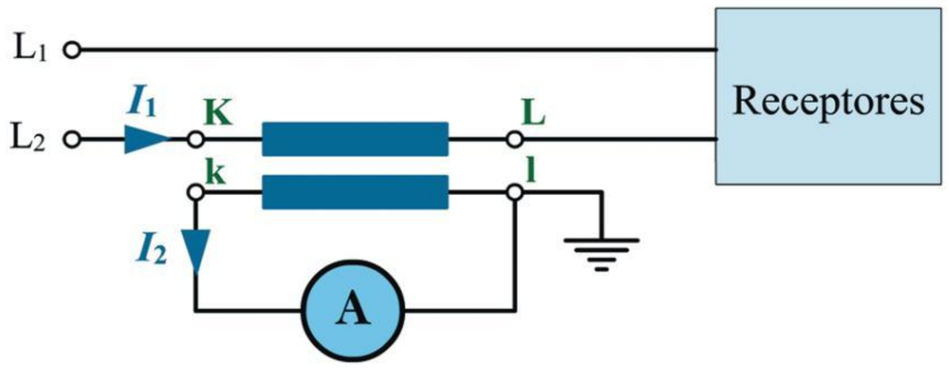


Figura 16.13. Esquema de conexión de un transformador de intensidad.

En la Figura 16.14 se muestran los símbolos más utilizados para el transformador de intensidad.

El transformador de intensidad consigue que por el circuito secundario, donde se conecta el amperímetro, circule una corriente más reducida y siempre proporcional a la que fluye por el primario, conectado con el circuito a medir. De esta forma, se consigue reducir considerablemente la corriente por el amperímetro.

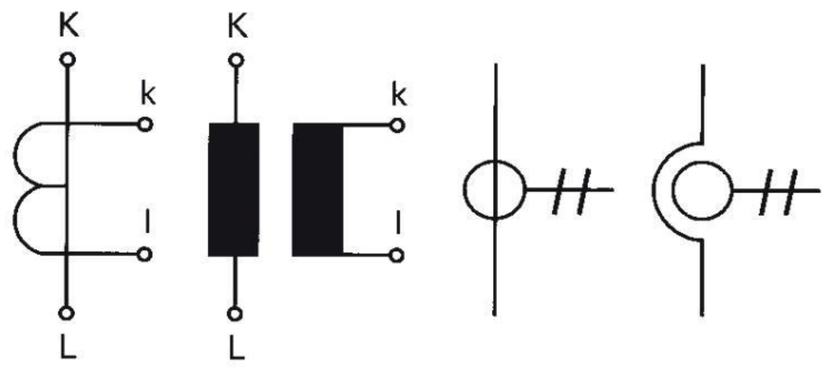


Figura 16.14. Símbolos eléctricos del transformador de intensidad.

Por supuesto, será necesario conocer la proporción en la reducción de la corriente para poder posteriormente interpretar la medida en el amperímetro. Para ello, los fabricantes de transformadores nos proporcionan una característica conocida como relación de transformación, que nos indica la relación entre la corriente por el primario I_1 y el secundario I_2:

$$m = \frac{I_1}{I_2}$$

En la placa de características de los transformadores de intensidad aparecen los valores de la intensidad nominal del primario y del secundario. Así, por ejemplo, la característica 100/5 A nos indica que cuando por el primario fluya una intensidad de 100 A, por el secundario conectado al amperímetro fluirán solo 5 A. La intensidad por el secundario de los transformadores de intensidad suele ser 5 A para la mayoría de las aplicaciones. Por otro lado, se fabrican

© Ediciones Paraninfo

transformadores de las siguientes intensidades primarias: 5 A, 10 A, 15 A, 20 A, 25 A, 30 A, 40 A, 50 A, 60 A, 75 A, 100 A, 125 A, 150 A, 200 A, 250 A, 300 A, 400 A, 500 A, 600 A, 750 A, 800 A, 1.000 A, 1.200 A, 1.500 A, 2.000 A, 2.500 A, 3.000 A, 4.000 A, 5.000 A.

Actividad resuelta 16.8

Se desea incorporar un equipo de medida de intensidad a un cuadro de distribución de unos pequeños almacenes. La potencia nominal de la instalación es de 100 kW con un factor de potencia de 0,85. El suministro de energía es trifásico a 400 V. Teniendo en cuenta que el amperímetro a utilizar posee un fondo de escala de 5 A, selecciona el transformador de intensidad más adecuado, así como su relación de transformación. Suponiendo que el amperímetro posee una escala fraccionada en 20 divisiones, ¿cuál será el resultado de la medida si se lee en la escala 15 divisiones?

Solución:

Calculamos primero la intensidad nominal a medir por el primario del transformador de intensidad:

$$I_L = \frac{P}{\sqrt{3}\, U_L \cos \varphi} = \frac{100.000}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0{,}85} = 170 \text{ A}$$

Seleccionaremos para la medida un transformador de intensidad de relación 200/5 A.

Su relación de transformación es:

$$m = \frac{I_1}{I_2} = \frac{200}{5} = 40$$

La constante de la escala sin transformador es:

$$K = \frac{5 \text{ A}}{20 \text{ div}} = 0{,}25 \text{ A/div}$$

La constante del aparato con transformador es:

$$K_S = \frac{200 \text{ A}}{20 \text{ div}} = 10 \text{ A/div}$$

La medida para 15 divisiones es:

$$15 \text{ div} \cdot 10 \text{ A/div} = 150 \text{ A}$$

En la práctica se calibran las escalas de los amperímetros para que puedan dar una lectura directa en asociación con un determinado transformador de intensidad.

Las ventajas que presentan los transformadores de intensidad son las siguientes:

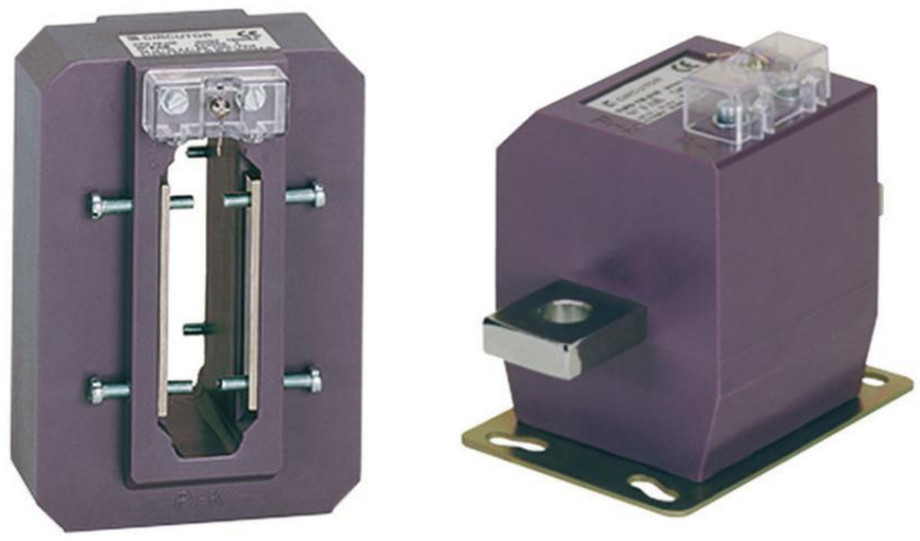
- Permiten medir grandes corrientes con aparatos de medida de bajo alcance. Además, se pueden realizar medidas de corriente en líneas de alta tensión con aparatos de baja tensión, mucho más sencillos y económicos.
- Es posible situar los aparatos de medida separados de las líneas de gran corriente o tensión. De esta forma se hace posible obtener la medida alejado de zonas de alto riesgo para los operarios. Además se simplifica mucho las conexiones con los aparatos de medida.

Un aspecto importante en el manejo e instalación de transformadores de corriente es que nunca se debe desconectar el amperímetro del secundario sin previamente haber cortocircuitado los bornes de aquel. De otra manera, pueden aparecer tensiones elevadas en el secundario que pueden ser un peligro para las personas y para el propio transformador. Por otro lado, se debe conectar a tierra uno de los terminales del secundario. De esta forma, se evita la aparición de tensiones elevadas ante un fallo de aislamiento entre el circuito primario y el secundario.

Por último, cabe indicar que es importante conocer la potencia nominal que puede proporcionar el transformador a los aparatos de medida. Esta se mide en VA, y se fabrican transformadores de las siguientes potencias nominales: 5 VA, 10 VA, 15 VA, 30 VA, 50 VA, 75 VA, 100 VA.

Así, por ejemplo, supongamos que deseamos alimentar con un transformador un amperímetro con un consumo de 3 VA y que además intercalamos en serie la bobina amperimétrica de un vatímetro con un consumo de otros 3 VA. La potencia que deberá suministrar como mínimo el transformador será de 3 + 3 = 6 VA, por lo que seleccionaremos un transformador de 10 VA de potencia nominal.

En cuanto a la construcción de transformadores de medida, existen dos tipo fundamentales: de barra pasante y con primario devanado (Figura 16.15).



(a) (b)

Figura 16.15. Transformador de intensidad: (a) de barra pasante; (b) con primario devanado.

Los transformadores de barra pasante disponen de un hueco por donde se hace pasar el conductor, por lo que no

© Ediciones Paraninfo

disponen de conexiones para el circuito primario. En este caso el primario lo constituye el propio conductor por el que circula la corriente a medir. Este tipo de transformador es muy utilizado ya que evita el tener que cortar el circuito a medir y evita las conexiones que de otra manera serían necesarias.

En cuanto al amperímetro como aparato de medida portátil, el de más extendida aplicación es la pinza amperimétrica (Figura 16.16). Con este aparato de medida se evita tener que cortar y realizar conexiones para la toma de la medida. Esto se consigue gracias a que el aparato de medida lleva incorporado un transformador de intensidad del tipo pasante. Para hacer pasar el conductor por el hueco del transformador se abre manualmente el núcleo magnético de la pinza y se vuelve a cerrar. Este aparato de medida resulta muy cómodo para realizar comprobaciones rápidas de la intensidad de los circuitos, ya que no es necesario interrumpir el circuito para ello. Hoy en día se fabrican pinzas amperimétricas tanto para C.A. como para C.C.



Figura 16.16. Pinza amperimétrica.

16.6. Medidas de tensión

La medida de tensión se realiza mediante el voltímetro. Se conecta entre los extremos cuya tensión se quiere medir, tal como se indica en la Figura 16.17. Es importante que la resistencia del instrumento de medida (R_V) sea alta, para así evitar consumos de corriente (I_V) y potencias elevadas.

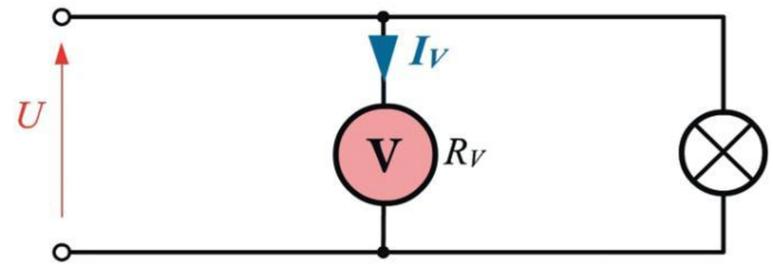


Figura 16.17. Medida de tensión con voltímetro.

Para ampliar el alcance de un voltímetro se recurre a la conexión en serie de resistencias adicionales o al empleo de transformadores de tensión. Dado que los transformadores solo funcionan para corrientes alternas, se utilizarán solo transformadores para realizar medidas de tensiones elevadas en C.A.

16.6.1. Ampliación del alcance de un voltímetro mediante resistencias adicionales en serie

En la Figura 16.18 se ha conectado una resistencia adicional R_S en serie con el voltímetro, con el fin de conseguir una caída de tensión U_S que haga que la tensión U_V que aparece en bornes del voltímetro de resistencia R_V quede reducida proporcionalmente respecto a la tensión U a medir.

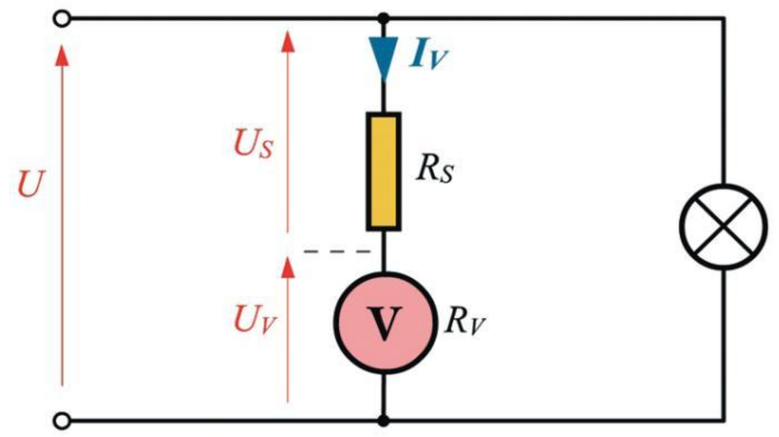


Figura 16.18. Esquema de conexión de voltímetro con resistencias adicionales.

Actividad resuelta 16.9

Se dispone de un voltímetro con un campo de indicación de 10 V, una resistencia interna de 2 kΩ y su escala está fraccionada en 40 divisiones. Calcula el valor de la resistencia adicional a conectar en serie con el voltímetro para ampliar su alcance hasta los 200 V, así como la constante del instrumento con y sin resistencia adicional. ¿Cuál será el resultado de la medida, con y sin la resistencia adicional, si se lee en la escala 30 divisiones?

Solución:

Primero calculamos la corriente que circula por el voltímetro, que es la que también fluye por la resistencia adicional. Aplicando la ley de Ohm entre los extremos del voltímetro, tenemos que:

$$I_V = \frac{U_V}{R_V} = \frac{10}{2.000} = 0{,}005 \text{ A}$$

La tensión que debe caer en la resistencia adicional es:

$$U_S = U - U_V = 200 - 10 = 190 \text{ V}$$

Si ahora aplicamos la ley de Ohm entre los terminales de la resistencia adicional, obtendremos el valor óhmico de esta:

$$R_S = \frac{V_S}{I_V} = \frac{190}{0{,}005} = 38.000\ \Omega = 38\ \text{k}\Omega$$

La constante de la escala sin resistencia adicional es:

$$K = \frac{10 \text{ V}}{40 \text{ div}} = 0{,}25 \text{ V/div}$$

© Ediciones Paraninfo

La constante del aparato con resistencia adicional es:

$$= \frac{200\ \text{V}}{40\ \text{div}} = 5\ \text{V/ div}$$

La medida para 30 divisiones sin resistencia adicional es:

$$30\ \text{div} \cdot 0{,}25\ \text{V/div} = 7{,}5\ \text{V}$$

La medida para 30 divisiones con resistencia adicional es:

$$30\ \text{div} \cdot 5\ \text{V/ div} = 150\ \text{V}$$

16.6.2. Ampliación del alcance de un voltímetro mediante transformadores de tensión

En la Figura 16.19 se ha conectado un transformador de tensión en la línea con el objeto de medir la tensión elevada que existe en la línea. El transformador de tensión consta de dos circuitos: el primario, que se conecta entre los extremos de la línea donde se quiere medir la tensión, y el secundario, que se conecta entre los extremos del voltímetro.

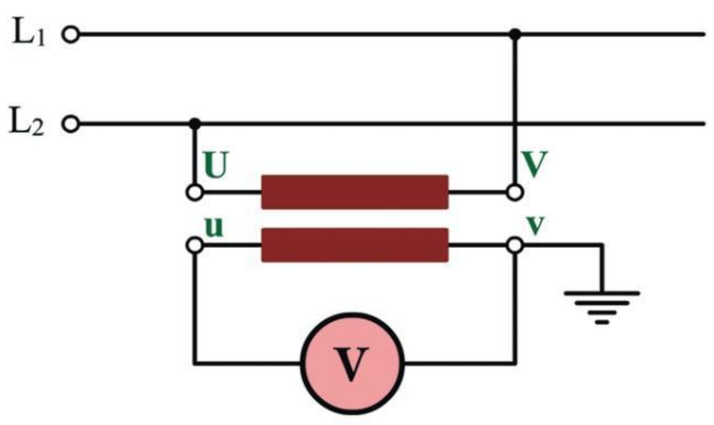


Figura 16.19. Esquema de conexión de transformador de tensión.

En la Figura 16.20 se muestran los símbolos más utilizados del transformador de tensión.

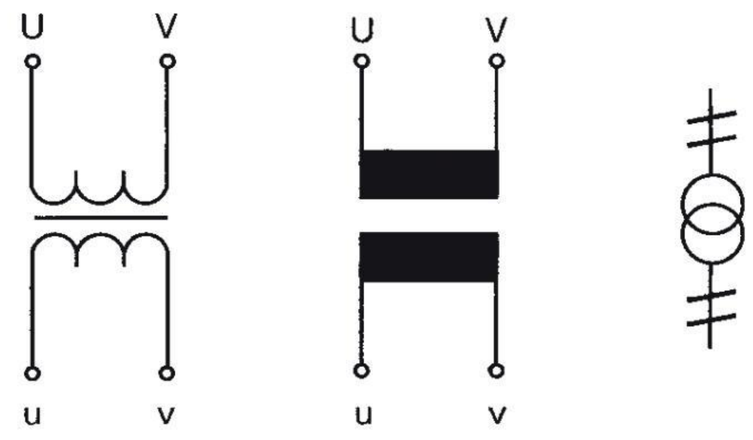


Figura 16.20. Símbolos eléctricos del transformador de tensión.

El transformador de tensión consigue que por el circuito secundario, donde se conecta el voltímetro, aparezca una tensión más reducida y siempre proporcional a la que queda sometido el primario, conectado con el circuito a medir. De esta forma, se consigue reducir considerablemente la tensión por el voltímetro.

Como en otras ocasiones, será necesario conocer la proporción en la reducción de la tensión para poder posteriormente interpretar la medida en el voltímetro. Los fabricantes de transformadores nos proporcionan la relación de transformación, que nos indica la relación entre la tensión por el primario U_1 y el secundario U_2:

$$m = \frac{U_1}{U_2}$$

Al igual que para los transformadores de intensidad, en la placa de características de los transformadores de tensión aparecen los valores de la tensión nominal del primario y del secundario. Así, por ejemplo, la característica 5.500/110 V nos indica que cuando por el primario se aplica una tensión de 5.500 V, por el secundario conectado al voltímetro aparecerán solo 110 V. La tensión por el secundario de los transformadores de tensión suele ser 110 V para la mayoría de las aplicaciones. Por otro lado, se fabrican transformadores de las siguientes tensiones primarias: 110 V; 230 V; 380 V; 440 V; 2.200 V; 3.300 V; 5.500 V; 6.600 V; 11.000 V; 13,2 kV; 16,5 kV; 22 kV; 27,5 kV; 33 kV; 44 kV; 55 kV; 66 kV; 132 kV; 220 kV; 396 kV.

Actividad resuelta 16.10

Se desea incorporar un voltímetro a un cuadro de distribución de energía eléctrica. La tensión de alimentación es de 2.000 V. Teniendo en cuenta que el voltímetro que se va a utilizar posee un fondo de escala de 110 V, selecciona el transformador de tensión más adecuado, así como su relación de transformación. Suponiendo que el voltímetro posee una escala fraccionada en 55 divisiones, ¿cuál será el resultado de la medida si se lee en la escala 48 divisiones?

Solución:

Seleccionaremos para la medida un transformador de tensión de relación 2.200/110 V.

Su relación de transformación es:

$$m = \frac{U_1}{U_2} = \frac{2.200}{110} = 20$$

La constante de la escala sin transformador es:

$$K = \frac{110\ \text{V}}{55\ \text{div}} = 2\ \text{V/div}$$

La constante del aparato con transformador es:

$$K_S = \frac{2.200\ \text{V}}{55\ \text{div}} = 40\ \text{V/div}$$

La medida para 48 divisiones es:

$$48\ \text{div} \cdot 40\ \text{V/div} = 1.920\ \text{V}$$

© Ediciones Paraninfo

Al igual que se hacía con los amperímetros, en la práctica se calibran las escalas de los voltímetros para que puedan dar una lectura directa en asociación con un determinado transformador de tensión.

Por motivos de seguridad es necesario conectar a tierra uno de los terminales del secundario; así se evita la aparición de tensiones elevadas en él, en el caso de que existiese un fallo de aislamiento entre el primario y el secundario.

Por último, hay que indicar que, al igual que en los transformadores de intensidad, es importante conocer la potencia nominal que puede proporcionar el transformador de tensión a los aparatos de medida. Se fabrican transformadores de las siguientes potencias nominales: 10 VA, 15 VA, 25 VA, 30 VA, 50 VA, 75 VA, 100 VA, 150 VA, 200 VA, 300 VA, 400 VA.

16.7. El polímetro

El polímetro o multímetro es un aparato de medida portátil que se utiliza para medir diferentes magnitudes eléctricas, como, por ejemplo, tensión y corrientes en C.C. y C.A., resistencia, capacidad, prueba de continuidad, prueba de diodos y transistores. La misma palabra indica su función: polí-metro, muchas medidas (Figura 16.21).



Figura 16.21. Polímetros analógicos y digitales.

Existen en el mercado una gran diversidad de modelos de polímetros. Las diferencias suelen estar en la forma de leer la medida del aparato (indicadores de aguja o analógicos e indicadores digitales) y en la forma de seleccionar la magnitud a medir, que por lo general suele consistir en un conmutador giratorio.

A continuación, y como ejemplo ilustrativo, damos una relación de los campos de medición de un determinado modelo de polímetro comercial:

- Tensiones para C.A. y C.C. (200 mV-2-20-200-1000 V).
- Intensidades para C.A. y C.C. (200 µA-2-20-200 mA-2 A).
- Resistencias (200 Ω-2-20-200 kΩ-2-20 MΩ).
- Capacidades (2000 pF-20-200 nF-2-20 µF).
- Inductancias (20-200 mH-2-20 H).
- Continuidad y prueba de diodos.

A primera vista da la impresión de que debe existir mucha diferencia entre manejar un modelo de polímetro u otro. Pero no es así, ya que en el momento en que se adquiere una cierta práctica en el manejo de uno de los modelos, prácticamente ya se saben manejar todos.

Los polímetros digitales presentan una lectura a base de cifras numéricas que facilita bastante la interpretación de la medida. En los polímetros analógicos o de aguja hay que elegir la escala adecuada y tener cuidado en no equivocarse con la constante de escala a aplicar.

16.8. Medidas de potencia

Para realizar la medida de potencia el método más utilizado es mediante el vatímetro electrodinámico o ferrodinámico, tanto para C.C. como para C.A. Recordemos que el vatímetro consta de dos circuitos medidores: el circuito amperimétrico se conecta en serie con el circuito y posee una resistencia muy baja, mientras que el voltimétrico se conecta en paralelo y posee una resistencia muy elevada (Figura 16.22). Para C.C., el aparato indica directamente el producto de la tensión por la intensidad, dando como resultado de la medida la potencia media. Para C.A., el aparato indica directamente el producto de la tensión por la intensidad y por el cos φ, dando como resultado de la medida la potencia activa.

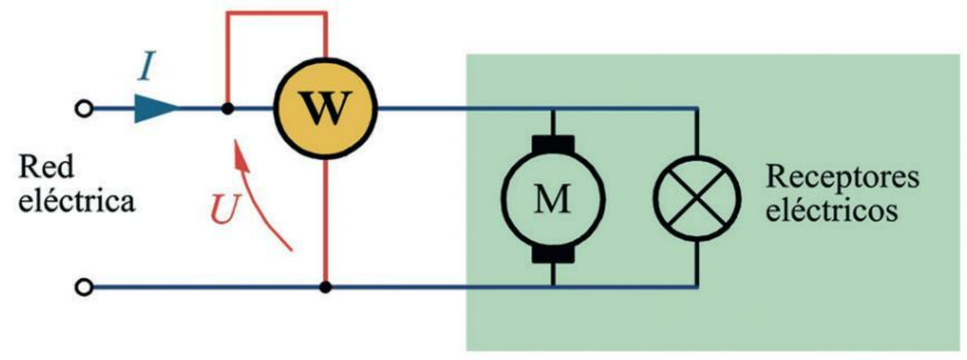


Figura 16.22. Medida de potencia con vatímetro.

Dado que el par de giro de la aguja indicadora del sistema de medida electrodinámico depende de los sentidos relativos de las corrientes por la bobina fija y por la bobina móvil, pudiera ocurrir que al conectar el vatímetro, la aguja tendiese a moverse hacia el cero de la escala. Para solventar este incidente bastará con invertir la conexión de una de las bobinas.

Es habitual que los fabricantes de vatímetros construyan aparatos de medida con varios alcances de medida, proporcionando diferentes conexiones y alcances para la tensión aplicada a la voltimétrica y amperimétrica. Para determinar

© Ediciones Paraninfo

la constante de la escala, en estos casos, habrá que multiplicar el alcance de la tensión por el alcance de la intensidad y dividirlo entre el número total de divisiones de la escala.

Actividad resuelta 16.11

Un vatímetro ferrodinámico posee dos alcances de tensión: 100 V y 200 V, y dos alcances de intensidad: 1 A y 5 A. Averigua las constantes de la escala para cada una de las combinaciones posibles si la escala está fraccionada en 50 divisiones.

Solución:

La constante de la escala para 100 V, 1 A, es:

$$K = \frac{100\ \text{V} \cdot 1\ \text{A}}{50\ \text{div}} = 2\ \text{W/div}$$

La constante de la escala para 100 V, 5 A, es:

$$K = \frac{100\ \text{V} \cdot 5\ \text{A}}{50\ \text{div}} = 10\ \text{W/div}$$

La constante de la escala para 200 V, 1 A, es:

$$K = \frac{200\ \text{V} \cdot 1\ \text{A}}{50\ \text{div}} = 4\ \text{W/div}$$

La constante de la escala para 200 V, 5 A, es:

$$K = \frac{200\ \text{V} \cdot 5\ \text{A}}{50\ \text{div}} = 20\ \text{W/div}$$

Al igual que se hacía con los voltímetros y amperímetros, para ampliar el alcance de un vatímetro en C.A. se utilizan transformadores de medida. Se suelen acoplar transformadores de tensión acoplados en paralelo a la bobina voltimétrica cuando la tensión en la red es superior a 500 V y transformadores de intensidad, acoplados en serie con la bobina amperimétrica, cuando la intensidad en la línea es superior a 15 A. En la Figura 16.23 se muestra el esquema de conexiones de un vatímetro sin transformadores de medida y en la Figura 16.24 las conexiones con transformadores de intensidad y transformadores de tensión.

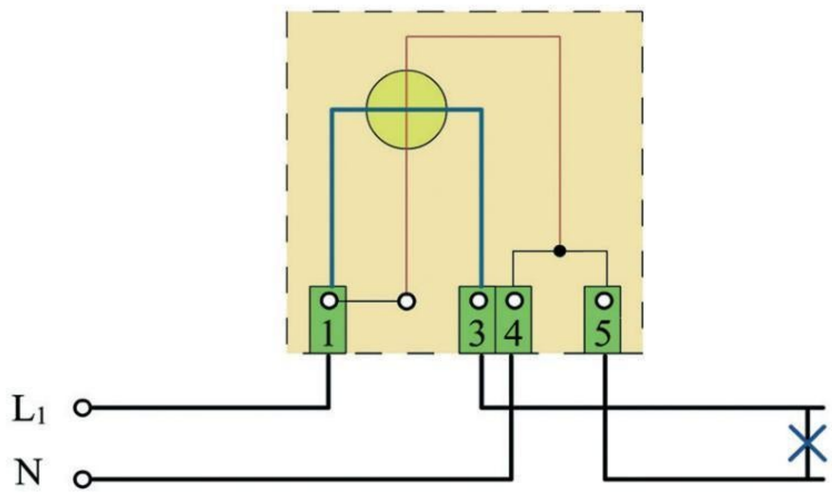


Figura 16.23. Esquema de conexiones de vatímetro monofásico en medición directa.

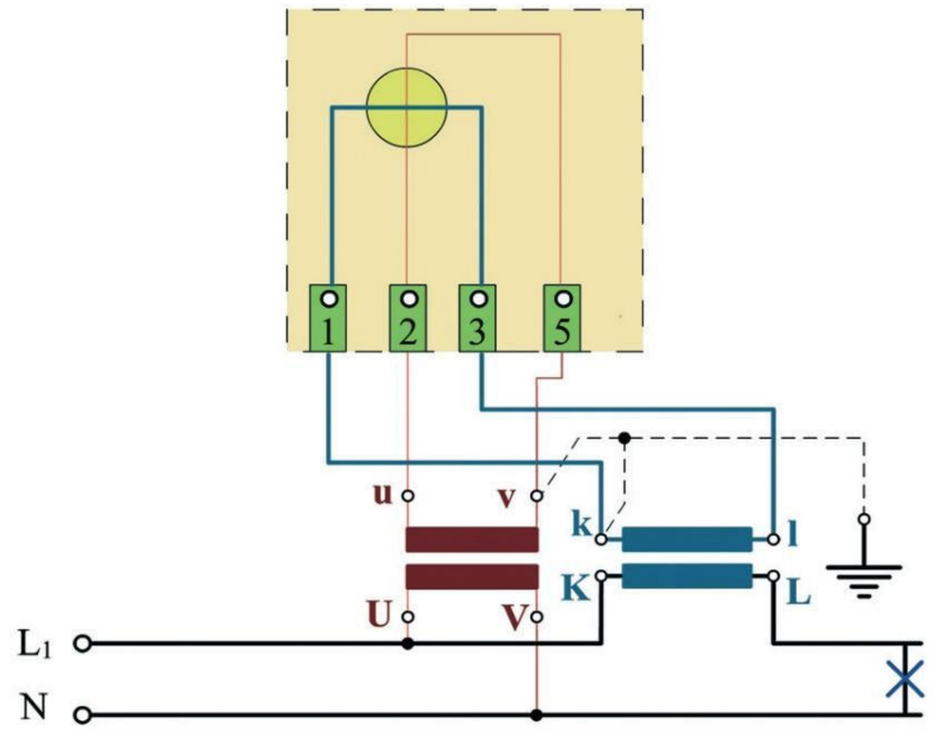


Figura 16.24. Esquema de conexiones de vatímetro monofásico con transformadores de tensión y corriente.

16.8.1. Medida de la potencia reactiva con vármetro

El vármetro es un aparato de medida que se construye partiendo de un vatímetro y al que se le añaden una serie de inductancias o condensadores en serie con la bobina voltimétrica con el fin de desfasar 90º la tensión respecto a la corriente (Figura 16.25). De esta forma se consigue que el aparato de medida nos dé una lectura directa del producto de la tensión por la intensidad y por el sen φ, es decir, de la potencia reactiva.

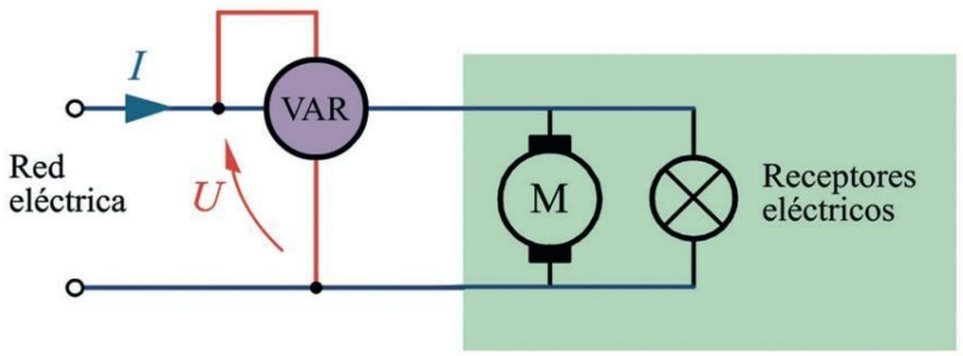


Figura 16.25. Medida de potencia reactiva con vármetro.

16.8.2. Medida de potencia activa en C.A. trifásica

La medida de potencia en los sistemas trifásicos se puede realizar con vatímetros monofásicos, conectados de tal forma que consigan medir la potencia activa de la carga.

El número de vatímetros que se emplee para realizar la medida, así como la forma en la que se conectan, dependerá del tipo de línea que se utilice (a tres hilos sin neutro o a cuatro hilos con neutro) y de que la carga sea equilibrada o desequilibrada. Por supuesto, un sistema de medida que sirva para medir la potencia de una carga desequilibrada también será válido para una equilibrada.

© Ediciones Paraninfo

Medida de potencia activa para sistemas con neutro: cargas desequilibradas

Esta es la forma más común de medida de la potencia en líneas de distribución de energía. En estos casos, se suministra el neutro, por ejemplo, en edificios de viviendas en los que es prácticamente imposible encontrar un equilibrio entre las fases.

Se utilizan tres vatímetros (Figura 16.26). La amperimétrica de cada uno se conecta en serie con cada conductor de línea, de tal forma que cada una mida la intensidad de línea respectiva. Las voltimétricas se conectan entre cada fase y neutro, midiendo cada una de las tensiones de fase.

Cada uno de los vatímetros indica la potencia en cada una de las fases. La potencia activa del sistema será la suma de la potencia que aparece en cada una de las fases, dato que coincide con la suma de las lecturas de los tres vatímetros.

$$P = W_1 + W_2 + W_3$$

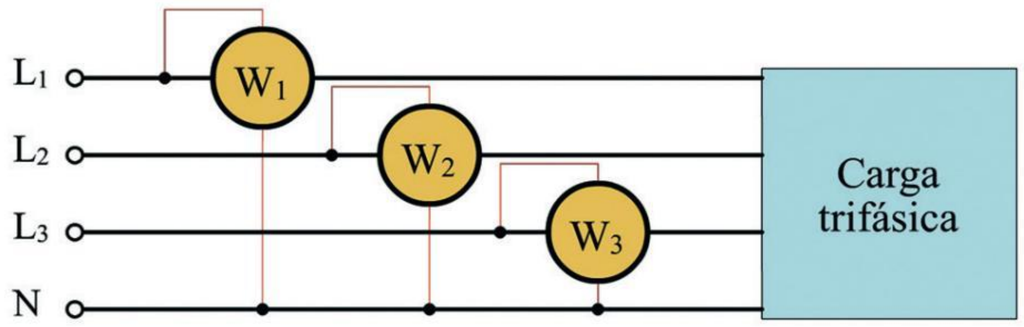


Figura 16.26. Esquema de conexiones de medida de potencia para sistemas trifásicos con neutro con cargas desequilibradas.

Medida de potencia activa para sistemas con neutro: cargas equilibradas

Para cargas equilibradas basta con conectar un solo vatímetro, con la amperimétrica en una de las líneas y con la voltimétrica entre la misma fase y el neutro (Figura 16.27). Como las cargas son todas iguales, la potencia de la carga trifásica se obtiene multiplicando por tres la lectura del vatímetro.

$$P = 3\ \mathrm{W}$$

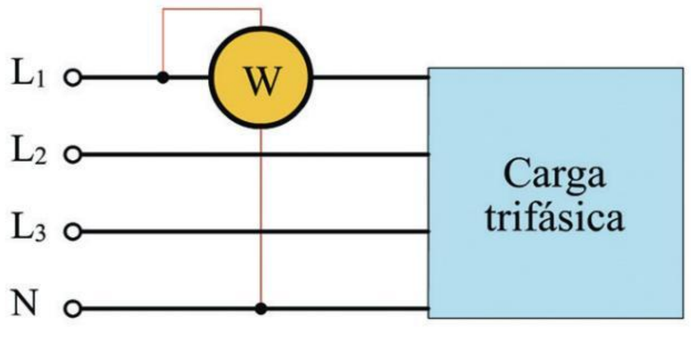


Figura 16.27. Esquema de conexiones para la medida de potencia para sistemas trifásicos con neutro con cargas equilibradas.

Medida de potencia activa para sistemas sin neutro: cargas equilibradas

Como no disponemos en la línea de neutro se conectan dos cargas adicionales Z_1 y Z_2 del mismo valor que la bobina voltimétrica con el fin de crear un neutro artificial (Figura 16.28).

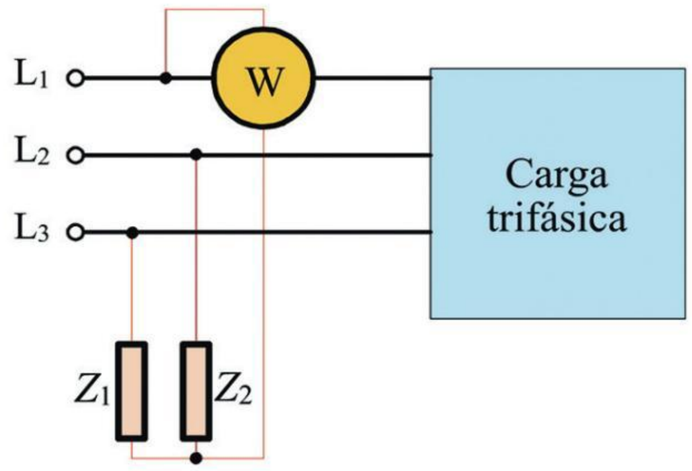


Figura 16.28. Esquema de conexiones para la medida de potencia activa en sistemas trifásicos sin neutro con cargas equilibradas.

De esta forma se consigue que el vatímetro nos indique la lectura de $(U_f I_L \cos \varphi)$, es decir, la potencia activa de una fase. La potencia del sistema será entonces de tres veces la indicada por el vatímetro.

$$P = 3\ \mathrm{W}$$

Por lo general, los fabricantes de aparatos de medida montan en el mismo aparato las cargas adicionales; además, la escala aparece multiplicada por tres. Ahora, la lectura es directa y el vatímetro monofásico se ha transformado en un trifásico. En la Figura 16.29 se muestran las conexiones del vatímetro mediante otro tipo de representación.

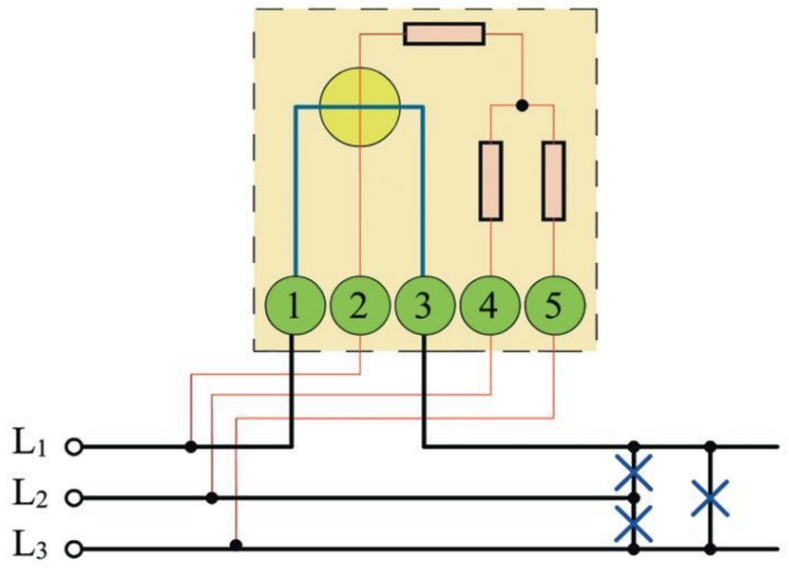


Figura 16.29. Vatímetro trifásico para cargas equilibradas sin neutro.

Medida de potencia activa para sistemas sin neutro: cargas desequilibradas

Conectando tres vatímetros, tal como se indica en la Figura 16.30, se consigue medir la potencia de cada una de las cargas. La potencia del sistema se obtiene sumando la lectura de cada uno de los vatímetros.

$$P = W_1 + W_2 + W_3$$

© Ediciones Paraninfo

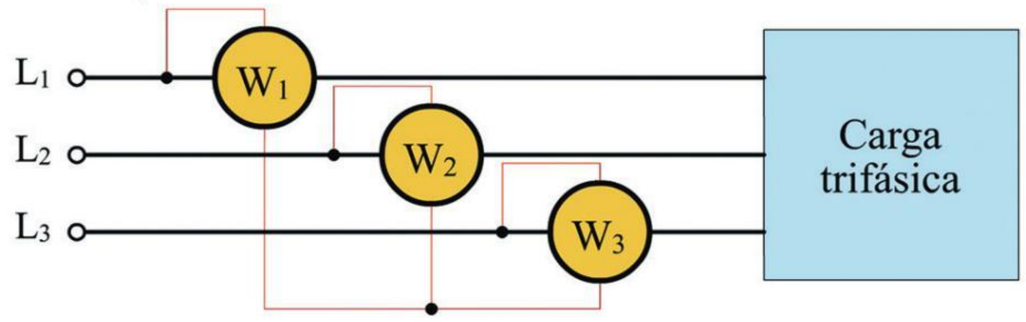


Figura 16.30. Sistema de tres vatímetros para cargas desequilibradas sin neutro.

Método de los dos vatímetros o de Arón

Existe otra forma de medir la potencia para cargas desequilibradas sin neutro: método de los dos **vatímetros** o de **Arón** (Figura 16.31). La potencia activa se obtiene de la suma de los dos vatímetros, tal como se demuestra a continuación:

$$P = W_1 + W_2$$

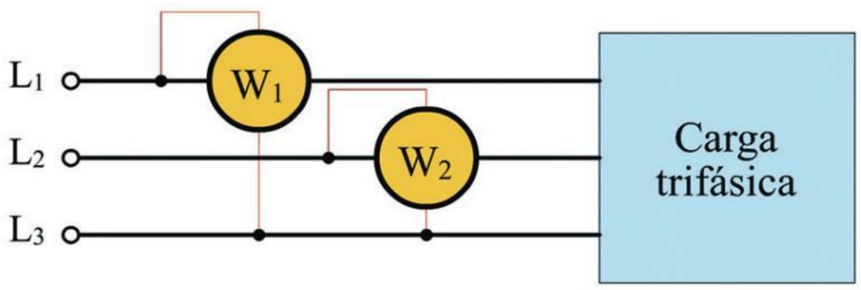


Figura 16.31. Sistema de dos vatímetros o de Arón para cargas desequilibradas sin neutro.

En valores instantáneos, los vatímetros indican:

$$w_1 = u_{13}\, i_1 \qquad w_2 = u_{23}\, i_2$$

La potencia instantánea en la carga es:

$$p = u_{10}\, i_1 + u_{20}\, i_2 + u_{30}\, i_3$$

Al no haber neutro se cumple que:

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0 \quad \Rightarrow \quad i_3 = -\,i_1 - i_2 \quad \text{sustituyendo en } p \quad \Rightarrow$$

$$p = u_{10}\, i_1 + u_{20}\, i_2 + u_{30}(-\,i_1 - i_2) =$$

agrupando términos $\Rightarrow$

$$= (u_{10} - u_{30})i_1 + (u_{20} - u_{30})i_2 = u_{13}\, i_1 + u_{23} i_2 = w_1 + w_2$$

En el momento de tomar una medida, podría ocurrir que uno de los vatímetros tendiese a indicar por debajo del cero, hecho que ocurre para factores de potencia muy bajos. En estos casos basta con invertir la conexión de una de las bobinas del vatímetro afectado. La medida obtenida por este vatímetro se considerará negativa, por lo que para obtener la potencia activa se restará este resultado del obtenido por el otro vatímetro.

Con el método de los dos vatímetros también se puede obtener el valor de la potencia reactiva para sistemas equilibrados, para ello basta con aplicar la siguiente expresión:

$$Q = \sqrt{3} \cdot (W_1 - W_2)$$

Actividad resuelta 16.12

Averigua la potencia activa y reactiva, así como el factor de potencia de una carga trifásica equilibrada, si al medir con el método de los dos vatímetros o de Arón se obtienen las siguientes medidas: lectura del primer vatímetro = 10.000 W, lectura del segundo vatímetro = 5.000 W.

Solución:

$$P = W_1 + W_2 = 10.000 + 5.000 = 15.000 \text{ W}$$

$$Q = \sqrt{3} \cdot (W_1 - W_2) = \sqrt{3} \cdot (10.000 - 5.000) = 8.660 \text{ VAR}$$

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} = \frac{15.000}{\sqrt{15.000^2 + 8.660^2}} = 0{,}87$$

En la práctica se fabrican vatímetros trifásicos con dos o tres sistemas de medida, de tal forma que la fuerza motriz de cada uno de ellos actúe sobre el eje que mueve la aguja indicadora. Así se consigue que la lectura de la medida sea sobre una sola escala, lo que facilita mucho la interpretación de la medida. En la Figura 16.32 se muestran las conexiones de un vatímetro para la medida de potencia en sistemas trifásicos desequilibrados sin neutro mediante el sistema de dos vatímetros y un único órgano medidor.

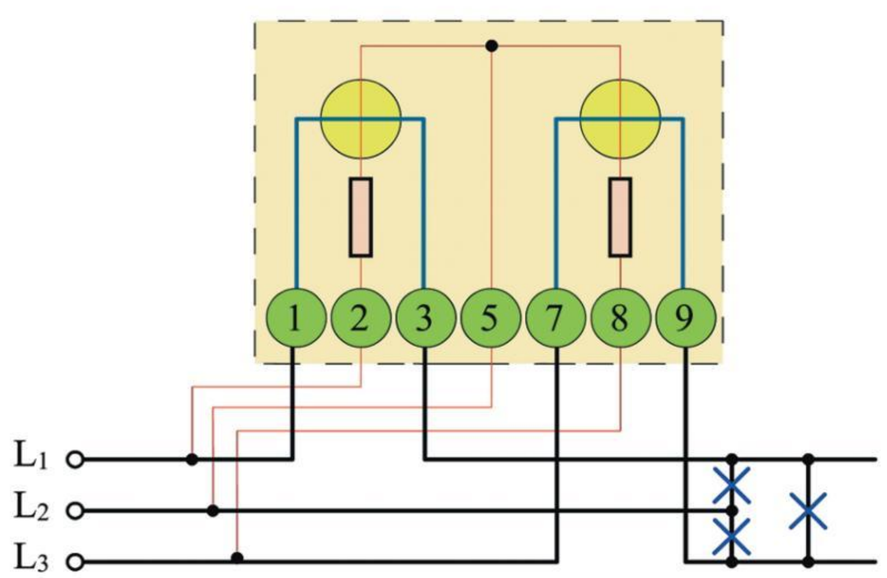


Figura 16.32. Vatímetro trifásico con dos sistemas de medida.

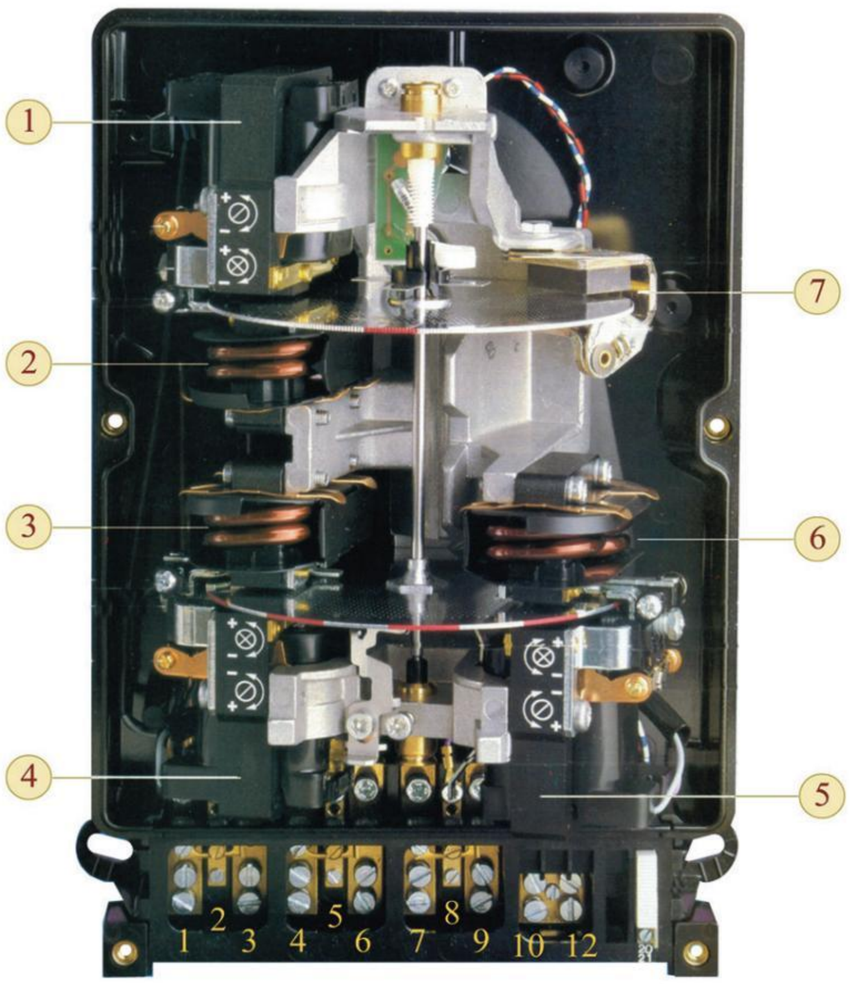
16.9. Medida de energía en sistemas trifásicos

La medida de la energía eléctrica se lleva a cabo mediante contadores de energía. Estos miden el producto de la potencia por el tiempo ($E = P \cdot t$). Para ello se valen de un sistema, como el de un vatímetro, que mediante un circuito voltimétrico y otro amperimétrico mide la potencia, y al que se le incorpora un sistema de relojería que registra el producto de $P \cdot t$. El resultado casi siempre se expresa en kWh.

Los contadores más utilizados en la actualidad son los de inducción (Figura 16.33). También existen los contadores de energía electrónicos de impulsos, que por su gran pre-

© Ediciones Paraninfo

cisión y versatilidad están desplazando a los de inducción. Además, es posible que un contador electrónico sea capaz de comunicarse telefónicamente mediante un módem con la central de gestión de la compañía eléctrica y enviar los datos obtenidos de la lectura de energía. De esta forma se evita tener que enviar a un empleado a realizar dicha lectura; además se consigue un control a tiempo real de la distribución de la energía en toda la red (Figura 16.34).



1. Bobina de tensión fase L_1
2. Bobina de intensidad fase L_1
3. Bobina de intensidad fase L_2
4. Bobina de tensión fase L_2
5. Bobina de tensión fase L_3
6. Bobina de intensidad fase L_3
7. Imán de freno

Figura 16.33. Contador trifásico a 4 hilos. (Cortesía de AEG.)



Figura 16.34. Contador trifásico electrónico. (Cortesía de Circuitor.)

Los contadores trifásicos se conectan de la misma forma que los vatímetros. De tal forma que si, por ejemplo, se realiza la medida en las tres fases, el equipo es capaz de sumar el resultado y presentarlo en un solo indicador de medida.

En la Figura 16.35 se muestra, a modo de ejemplo, el esquema de conexión de un contador trifásico en conexión directa para sistemas desequilibrados con neutro y en la Figura 16.36, el esquema de un contador trifásico en conexión a transformadores de intensidad y tensión para sistemas desequilibrados sin neutro.

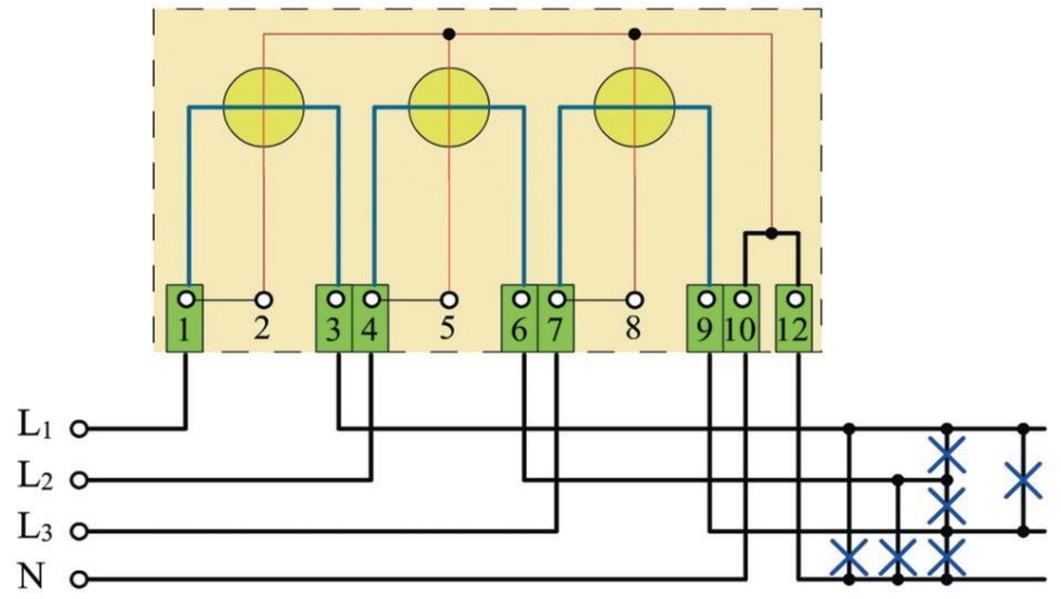


Figura 16.35. Esquema de conexiones de contador de energía trifásico para sistemas desequilibrados con neutro.

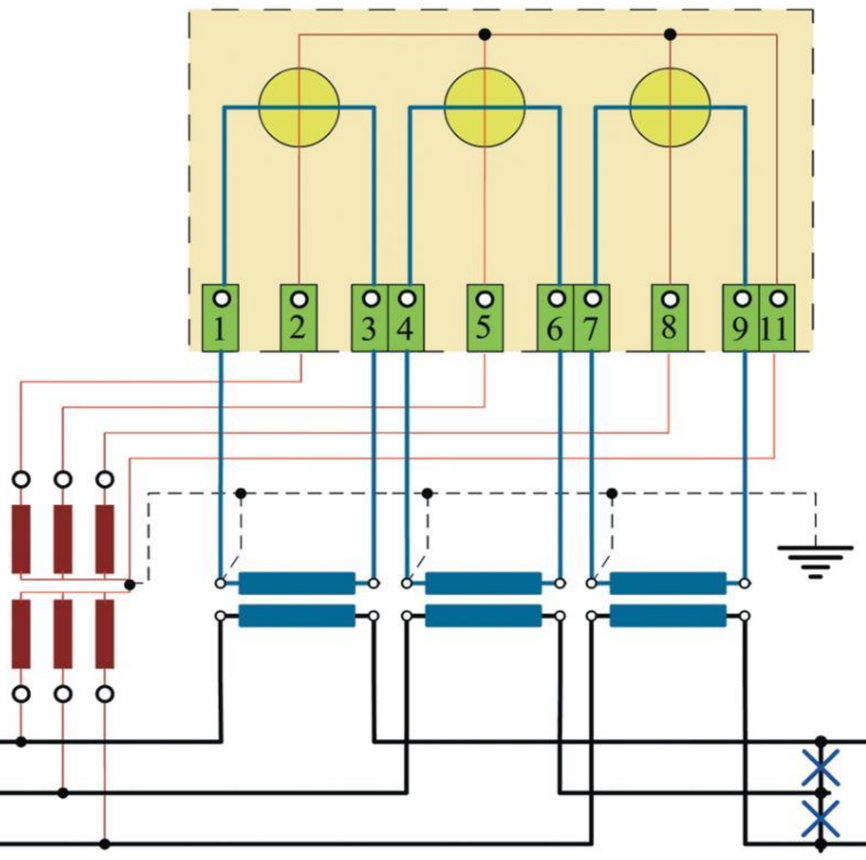


Figura 16.36. Esquema de conexiones de contador trifásico con transformadores de medida.

En tarifación eléctrica existe el concepto de la doble tarifa. Esta consiste en establecer un precio para el consumo de energía eléctrica nocturna más reducido que para la diurna.

La razón por la que las compañías eléctricas incentivan el consumo de energía nocturna está fundamentada en el hecho de que por la noche existe una baja demanda de energía y, sin embargo, ciertas centrales eléctricas, como las nucleares, no pueden llegar a desconectarse, por lo que existe un desequilibrio entre la oferta y la demanda de energía. Además, así se consigue disminuir los fuertes consumos originados a ciertas horas del día.

En la Figura 16.37 se muestra el esquema de un contador monofásico de doble tarifa. Este dispone de dos sistemas de

© Ediciones Paraninfo

registro de la energía consumida: uno para la tarifa nocturna y otro para la diurna. Para poder realizar el proceso de conmutación de un registro al otro, el contador dispone de un reloj horario que realiza automáticamente el proceso de conmutación, según los tiempos preseleccionados.

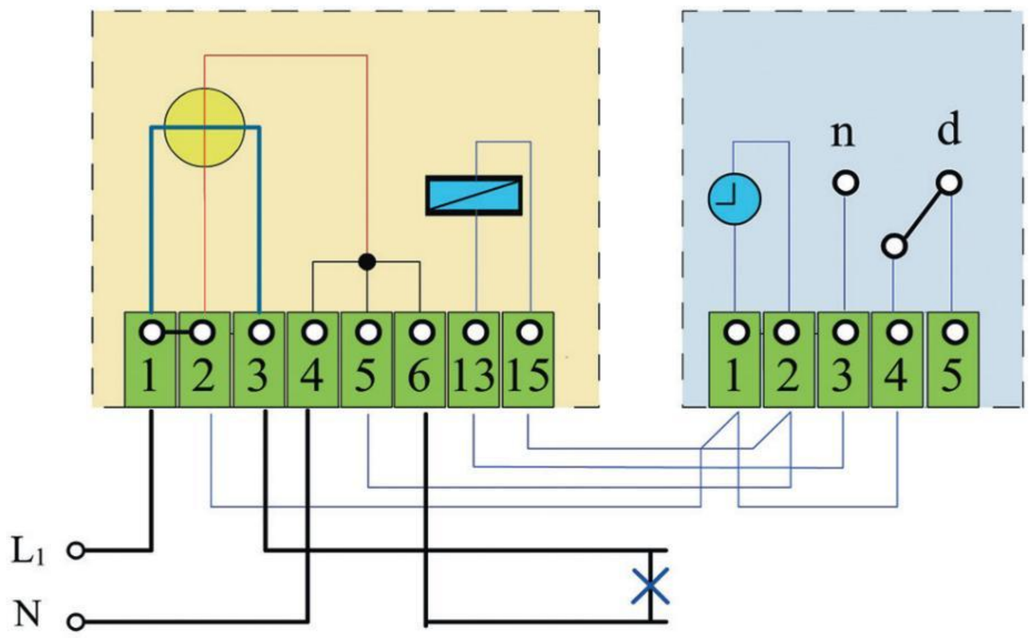


Figura 16.37. Esquema de conexiones de contador de energía monofásico de doble tarifa.

16.10. Medida de la frecuencia

La frecuencia se mide mediante el frecuencímetro. El frecuencímetro se conecta entre los extremos de las fases de la red cuya frecuencia se quiere medir (Figura 16.38).

Existen fundamentalmente dos tipos: de láminas vibrantes [Figura 16.39(a)] y de bobina móvil con convertidor interior de frecuencia a C.C. de función lineal [Figura 16.39(b)]. Además también se fabrican de indicación digital con convertidor.

Para la medida de frecuencias en tensiones elevadas el frecuencímetro se interconecta mediante transformadores de tensión.

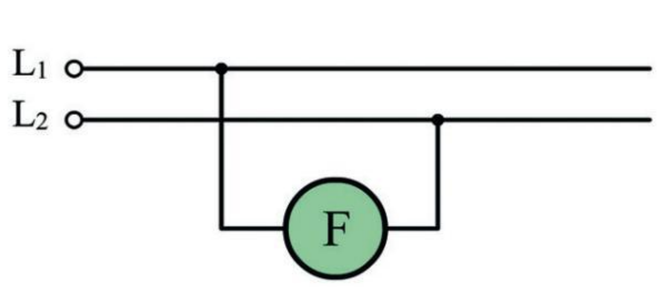
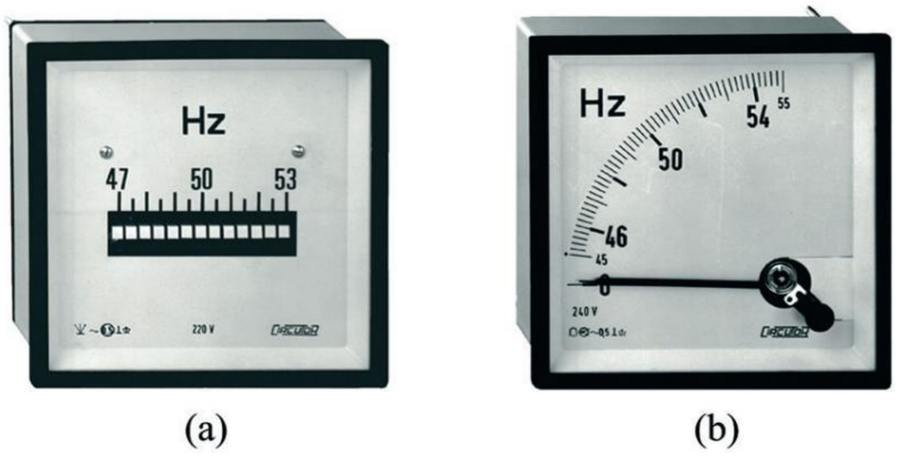


Figura 16.38. Esquema de conexiones de frecuencímetro.



(a) (b)

Figura 16.39. Frecuencímetro: (a) de láminas vibrantes; (b) de aguja.

16.11. Medida del factor de potencia

Para medir el factor de potencia de una instalación se utiliza el fasímetro. En la Figura 16.40 se muestra el aspecto que presenta la pantalla de un fasímetro basado en sistema de medida móvil con convertidor de ángulo de fase a C.C. de función lineal.



Figura 16.40. Fasímetro.

Este aparato de medida se conecta de forma similar a la de un vatímetro, ya que posee circuitos amperimétricos y voltimétricos. En la Figura 16.41 se muestra, como ejemplo, la conexión de un fasímetro trifásico. En la actualidad también se fabrican fasímetros de indicación digital con convertidor.

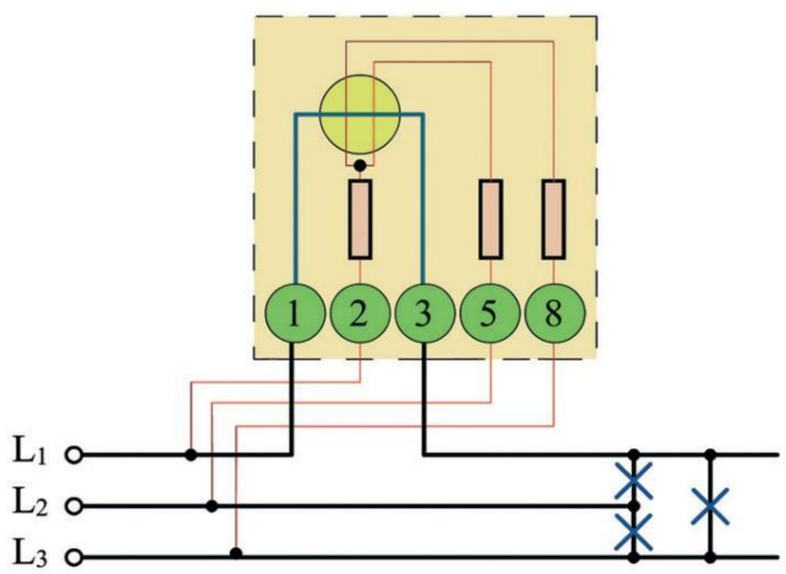


Figura 16.41. Esquema de conexiones de fasímetro trifásico.

16.12. Medida de resistencias eléctricas

La medida de la resistencia eléctrica se puede realizar simplemente midiendo la tensión y corriente que produce una resistencia al aplicar una fuente de alimentación de C.C. Aplicando la ley de Ohm se obtiene el valor de la resistencia. Evidentemente este no es el sistema más utilizado. Dependiendo del orden de magnitud a medir y nivel de precisión requerido se utilizan diferentes sistemas de medida.

16.12.1. Medida de resistencias con óhmetro amperimétrico

Este sistema es el que utilizan los polímetros analógicos. Al conectar la resistencia R_x que se va a medir se cierra un

© Ediciones Paraninfo

circuito, donde existe una pila, un amperímetro donde se toma la medida y una resistencia R para el ajuste a cero del indicador (Figura 16.42). La intensidad que mide el amperímetro es inversamente proporcional a la resistencia que se mide, por lo que al calibrar la escala del aparato de medida en ohmios habrá que poner el cero en el fondo de la escala. Dado que el resultado de la medida depende del estado de carga de la pila, antes de medir con este aparato conviene ajustar a cero la escala, para lo cual se cortocircuitan las puntas de prueba del instrumento y se modifica la resistencia variable mediante un cursor.

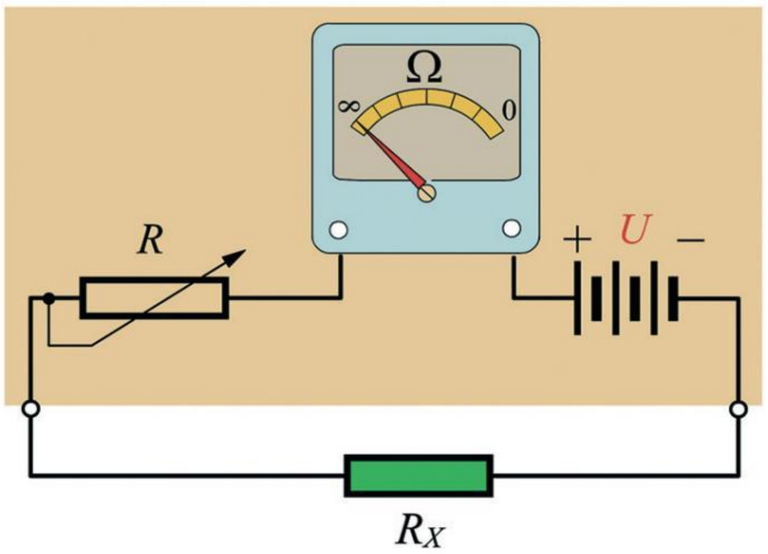


Figura 16.42. Óhmetro amperimétrico.

16.12.2. Medida de resistencias mediante puentes de medida

Cuando se desea obtener una precisión mayor en la medida de resistencias en un amplio campo de medidas se pueden utilizar puentes de medida, como el puente de Wheatstone o el puente de Thomson. En la Figura 16.42 se muestra el aspecto de un puente de medida comercial y en la Figura 16.43 el circuito básico de que consta un puente de Wheatstone. Un puente de Thomson comercial puede tener, por ejemplo, un campo de medida entre 500 μΩ y 6 Ω, mientras que el campo de medida de un puente de Wheatstone estaría entre 500 mΩ y 500 kΩ.



Figura 16.43. Óhmetro con puente de medida. (Cortesía de Chauvin Arnoux.)

El puente de Wheatstone de la Figura 16.44 sirve para medir el valor óhmico de una resistencia desconocida R_x.

Las resistencias R_1 y R_2 son fijas y de un valor conocido. La resistencia R_3 es variable y se mueve en una escala graduada, de tal forma que podemos saber su valor en todo momento. Se trata de modificar R_3 hasta conseguir equilibrar el puente. Este equilibrio se consigue cuando el galvanómetro indica que la corriente es cero.

Cuando el puente está equilibrado, aplicando la segunda ley de Kirchhoff a las dos mallas formadas, se cumple que:

$$(1) \qquad R_x I_1 = R_1 I_2$$

$$(2) \qquad R_3 I_1 = R_2 I_2$$

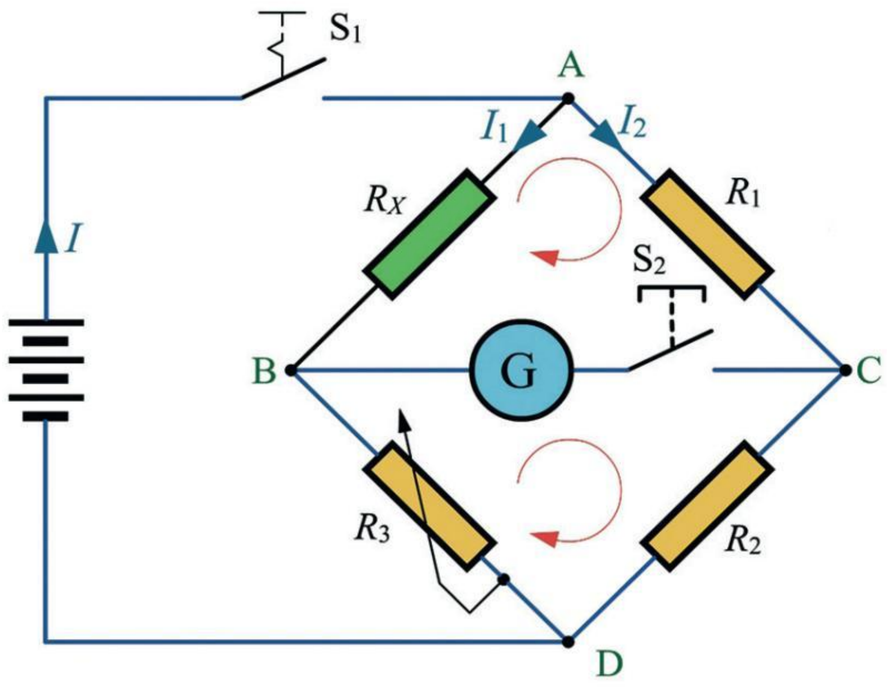


Figura 16.44. Esquema de puente de Wheatstone.

Al dividir la ecuación (1) con la (2) conseguimos que las intensidades I_1 e I_2 se cancelen:

$$\frac{R_x I_1}{R_3 I_1} = \frac{R_1 I_2}{R_2 I_2} \quad ; \quad \frac{R_x}{R_3} = \frac{R_1}{R_2}$$

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R_3$$

Con esta última ecuación se puede averiguar el valor de la resistencia a medir R_x después de equilibrar el puente.

La ventaja que supone el empleo de los puentes para la medida de resistencias eléctricas reside en el hecho de que el resultado de la medida no depende, en ningún caso, del valor de la tensión que proporciona la batería de C.C. al circuito.

Actividad resuelta 16.13

Al medir con el puente de Wheatstone el valor óhmico de una resistencia desconocida R_x, los valores fijos de R_1 y R_2 son de 10 y 1.000 Ω respectivamente, habiéndose conseguido el equilibrio del puente para un valor de R_3 = 5.879 Ω.

© Ediciones Paraninfo

Solución:

Aplicando estos valores a la ecuación:

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R_3 = \frac{10}{1.000} \cdot 5.879 = 58{,}79\ \Omega$$

En un puente de Wheatstone comercial no suele ser necesario aplicar la ecuación para determinar la resistencia desconocida, ya que al variar R_3 aparece el resultado de la medida directamente en una escala. El cociente R_1/R_2 también se suele poder modificar. De esta forma se consigue ampliar el campo de medida. Los resultados de esta última modificación suelen indicarse en el aparato de medida con un coeficiente de multiplicación de la medida ($\times 0{,}1$; $\times 1$; $\times 10$; $\times 100$, etc.).

Hoy en día existen óhmetros de indicación digital, como el de la Figura 16.43, que poseen un campo de medida muy amplio, como, por ejemplo, entre 20 mΩ y 20 MΩ, y consiguen una gran precisión en la medida.

16.12.3. Medida de resistencias de aislamiento

Dado que no existen aislantes perfectos, la mayor parte de las instalaciones eléctricas quedan conectadas a tierra a través de los materiales aislantes que rodean a los conductores, por lo que siempre aparecen pequeñas corrientes de fuga desde los conductores de fase a tierra. El buen estado de los aislamientos de una instalación es muy importante, ya que un aislante en mal estado puede provocar cortocircuitos e incendios. Por esta razón, las normas sobre instalaciones eléctricas exigen pruebas de inspección para comprobar el estado de los aislamientos, es decir, para comprobar si la resistencia de aislamiento es lo suficientemente elevada.

Dado que las resistencias de aislamiento suelen estar por encima de los 0,5 MΩ, es necesario el empleo de aparatos de medida especialmente diseñados para esta función, conocidos por el nombre de **megóhmetros** o **medidores de aislamiento.** Existe una amplia gama de diferentes aparatos de medida que cubren estas necesidades, unos con indicación analógica y otros con indicación digital, siendo estos últimos los que más se emplean en la actualidad. En la Figura 16.45 se muestra el aspecto de un medidor de aislamiento con indicación digital.

Para realizar las medidas de aislamiento de una instalación se procede de la siguiente forma:

- Se desconecta el interruptor general de alimentación de corriente de la instalación y se unen entre sí los conductores de alimentación. Seguidamente, se conecta el terminal positivo del medidor de aislamiento al conductor de tierra y el negativo a uno de los conductores de la instalación, tal como se muestra en la Figura 16.46. De esta forma mediremos la resistencia de aislamiento entre el total de la instalación y tierra.



Figura 16.45. Medidor de aislamiento digital.

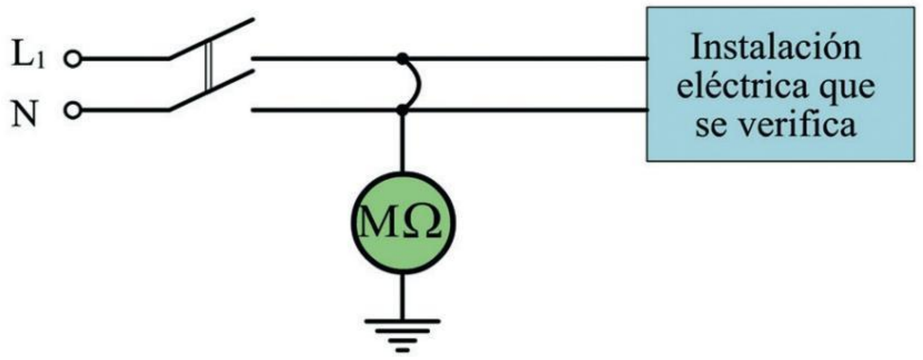


Figura 16.46. Esquema de conexiones para la medida de la resistencia de aislamiento entre la instalación y tierra.

- En el caso de que la resistencia de aislamiento total entre la instalación y tierra fuese inferior a la requerida por las normas vigentes, habrá que encontrar qué parte de la instalación es la que causa esta disminución del aislamiento, por lo que habrá que desconectar todos los receptores e ir comprobando la resistencia de aislamiento de cada uno de los conductores de la instalación respecto a tierra.

- Otra de las pruebas de aislamiento a realizar consiste en la medida de aislamiento entre los conductores activos. Para ello, se dejan conectados todos los receptores a la línea, pero con su respectivo interruptor en posición abierta, y se conecta el medidor de aislamiento entre los dos conductores activos de la instalación, tal como se muestra en la Figura 16.47.

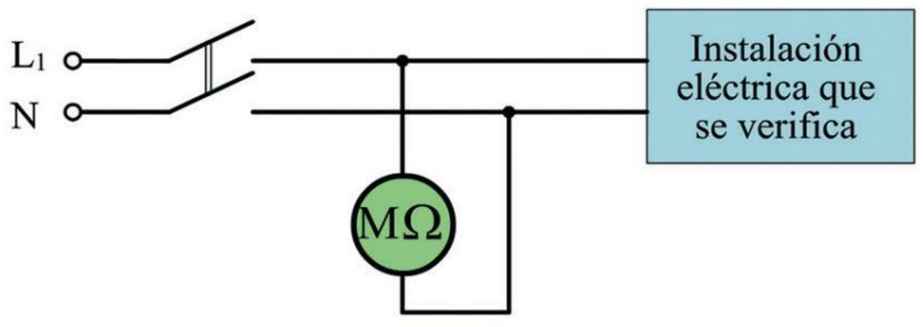


Figura 16.47. Esquema de conexiones para la medida de la resistencia de aislamiento entre los conductores activos de una instalación.

Los valores de resistencia de aislamiento que deberán presentar las instalaciones según el REBT se pueden consultar en la instrucción técnica complementaria **ITC-BT 19,** donde entre otras cosas se indica que para instalaciones con una tensión nominal inferior o igual a 500 V (excepto muy

© Ediciones Paraninfo

bajas tensiones de seguridad y protección) la resistencia de aislamiento deberá ser superior a 0,5 MΩ.

Consulta en el REBT la Instrucción Técnica ITC-BT 19 sobre Instalaciones Interiores o Receptoras, apartado 2.9.

16.12.4. Medida de resistencia de una toma de tierra

En las instalaciones eléctricas siempre existe el riesgo de que alguno de los conductores activos (con tensión respecto a tierra) se ponga por accidente en contacto con alguna envoltura metálica (chasis de los receptores, como, por ejemplo, carcasas de motores, cubiertas metálicas de electrodomésticos, etc.). En estos casos aparece en la masa metálica una tensión respecto a tierra que, al ser tocada por una persona, puede provocar la electrocución de esta (contacto indirecto). Para evitar estos accidentes se unen eléctricamente todas las masas metálicas de los receptores a tierra, con lo que se elimina la tensión que pudiera aparecer en ellas (Figura 16.48).

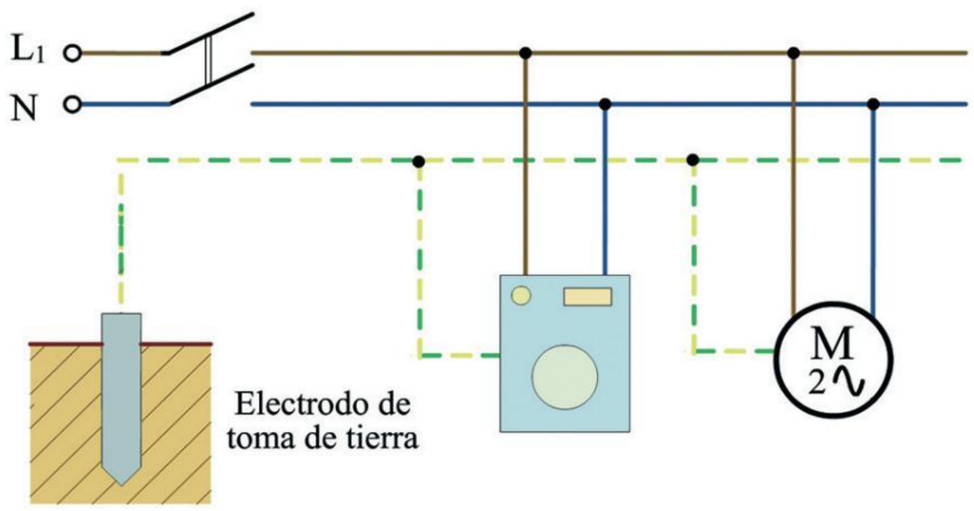


Figura 16.48. Puesta a tierra de las masas metálicas de los receptores.

Las tomas de tierra se realizan mediante electrodos metálicos enterrados (picas, barras, tubos, placas, cables, pletinas y en general cualquier objeto metálico) que produzcan un buen contacto con el terreno. Es imprescindible que la resistencia de la toma de tierra sea lo más baja posible, ya que de ello depende que la tensión que pudiera aparecer en las masas metálicas sea también baja.

El REBT indica en la **ITC-BT 18** que el valor de la resistencia de tierra será tal que cualquier masa no pueda dar lugar a tensiones de contacto superiores a 24 V en local o emplazamiento conductor y a 50 V en los demás casos.

Consulta en el REBT la Instrucción Técnica ITC-BT 18 sobre Instalaciones de Puesta a Tierra.

El valor de la resistencia a tierra depende fundamentalmente de la naturaleza del terreno, de los electrodos utilizados y de la calidad del contacto entre el electrodo y el terreno. Seguidamente se exponen los valores máximos que se recomiendan para la resistencia de tierra según el uso que se vaya a dar a las instalaciones eléctricas:

- Edificios de viviendas: 8 Ω.
- Edificios con pararrayos: 15 Ω.
- Instalaciones de máxima seguridad: 2 a 5 Ω.
- Instalación de ordenadores: 1 a 2 Ω.

Una vez realizada la toma de tierra hay que medir su resistencia para comprobar si su valor óhmico se encuentra según lo requerido. También es necesario realizar revisiones anuales de los valores de la resistencia de tierra, ya que estos podrían modificarse por diferentes factores, tales como corrosión de los electrodos, deterioro de conexiones, cambios en la composición de los terrenos (la resistividad de los terrenos aumenta al disminuir la humedad), etcétera.

Para la medida de la resistencia de tierra se utiliza el **telurómetro.** En el mercado existen diferentes tipos de telurómetros, pero básicamente todos emplean métodos de medida que consisten en clavar una serie de picas auxiliares a una determinada distancia de la toma de tierra.

En la Figura 16.49 se expone, a modo de ejemplo, un esquema de cómo se realiza la medida de resistencia de tierra con un telurómetro. Este dispone de un terminal que se conecta al electrodo R_x de la toma de tierra. Además se proporciona un par de picas auxiliares *Y* y *Z*, de unos 30 cm de longitud, que se clavan a una cierta distancia del electrodo *X* de la toma de tierra.

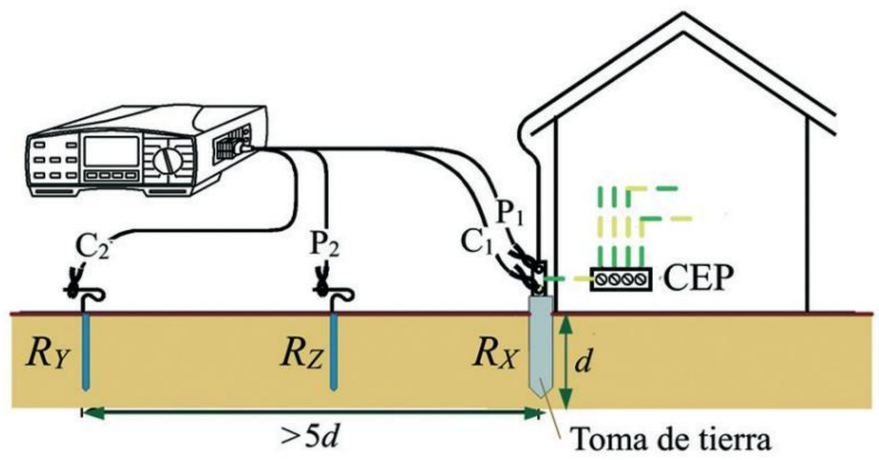


Figura 16.49. Esquema de conexiones para la medida de la resistencia de una toma de tierra con el EUROTEST de KOBAN.

En la Figura 16.50 se muestra el aspecto de un telurómetro comercial. Antes de realizar la medida de tierra con un determinado medidor de tierra conviene leer detenidamente sus instrucciones de manejo y operar en consecuencia.



Figura 16.50. Telurómetro incorporado en el EUROTEST.

© Ediciones Paraninfo

16.13. Sistemas avanzados de medida

El avance experimentado en los últimos años en la fabricación de microprocesadores y microcomputadores ha producido un fuerte avance en el desarrollo de nuevos instrumentos de medida, mucho más versátiles y de tamaño más reducido. Gracias a estos avances se ha aumentado el número de parámetros que se pueden medir con un solo instrumento a partir de las señales básicas de entrada (U e I). Además, se los ha dotado de una gran capacidad de comunicación con otros elementos de la instalación.

También es posible la conexión de los aparatos de medida con ordenadores personales a través de un bus de comunicaciones. De esta forma, se consigue procesar una gran cantidad de datos en un tiempo reducido. Con estas combinaciones se pueden efectuar muchas medidas a la vez, para, por ejemplo, realizar un control instantáneo de la energía consumida, establecer alarmas en caso de que alguna magnitud alcance valores inadecuados, evitar sobrecargas en las líneas, realizar estudios estadísticos, etcétera.

A continuación se exponen algunos de estos sistemas avanzados de medida.

16.13.1. Analizador de red trifásico

Este dispositivo posee 3 entradas de corriente mediante tenaza amperimétrica y 3 entradas de tensión independientes (Figura 16.51), a partir de las cuales se pueden obtener las siguientes medidas: tensión de línea y de fase en cada una de las fases, intensidad de línea en cada una de las fases, potencia activa y reactiva, potencia aparente, factor de potencia, frecuencia, energía activa, energía reactiva inductiva y energía reactiva capacitiva, tasa de armónicos de corriente y de tensión, verdadero valor eficaz, etc. Con él es posible realizar desde el registro y valoración de magnitudes de medición en energía eléctrica hasta el análisis del consumo de energía eléctrica.

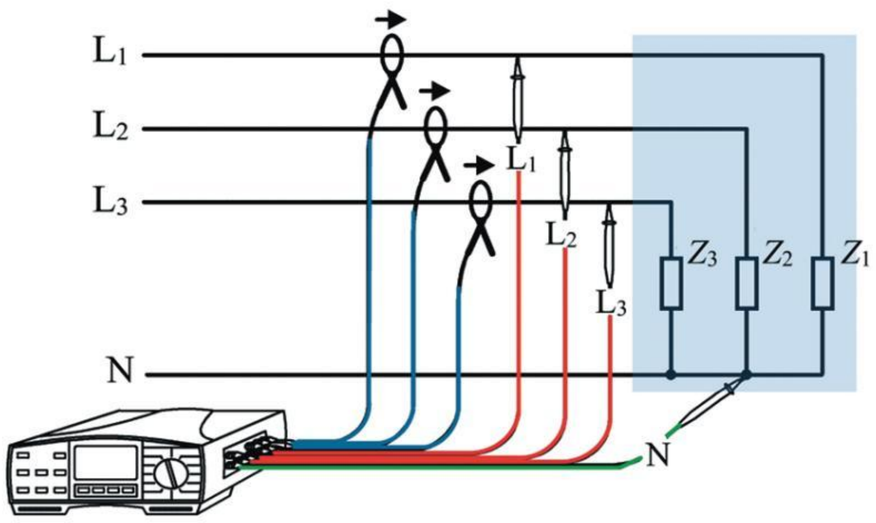


Figura 16.51. Esquema de conexiones del EUROTEST en la medida de armónicos de tensión y corriente en sistemas trifásicos.

La presentación de la medida en la pantalla o *display* del aparato puede ser de diferentes formas: de forma alfanumérica como valores numéricos, a modo de tabla, valoración máxima/mínima, en forma de gráfico representando una curva o diagrama de líneas. También es posible el almacenamiento de los valores medidos en una memoria, para ser consultados con posterioridad a la medida. Algunos modelos permiten imprimir los resultados en papel o conectarse a un ordenador personal dotado con un software capaz de procesar los datos obtenidos según nuestras necesidades.

16.13.2. Comprobador de instalaciones eléctricas de baja tensión

En el REBT en la Instrucción Técnica **ITC-BT 05** se indican las condiciones para la verificación e inspección de las instalaciones eléctricas en baja tensión. Además, se enumeran las verificaciones que son necesarias llevar a cabo antes de la puesta en servicio de las instalaciones. Para llevar a cabo estas verificaciones, en la instrucción técnica **ITC-BT 03** aparecen los medios técnicos con que han de contar los instaladores autorizados:

Para la categoría básica:

- Telurómetro.
- Medidor de aislamiento.
- Multímetro.
- Medidor de corrientes de fuga.
- Detector de tensión.
- Analizador-registrador de potencia y energía para C.A. trifásica.
- Verificador de la sensibilidad y tiempo de disparo de interruptores diferenciales.
- Medidor de resistencia de bucle.
- Luxómetro.

Para la categoría especialista, además de los medios anteriores:

- Analizador de redes, de armónicos y de perturbaciones de red.
- Electrodos para la medida de aislamiento de los suelos.
- Aparato comprobador del dispositivo de vigilancia del nivel de aislamiento de los quirófanos.

Consulta en el REBT la Instrucción Técnica ITC-BT 03 (Instaladores autorizados en baja tensión) y la ITC-BT 05 (Verificaciones e inspecciones).

En el mercado se pueden encontrar aparatos de medida portátiles que integran una gran cantidad de funciones, como por ejemplo la medición de tensiones, corrientes y

© Ediciones Paraninfo

frecuencias; verificación de resistencias de aislamiento, resistencias de tierra; comprobación de la continuidad de conductores, del estado de interruptores diferenciales; indicación del orden de sucesión de fases, etcétera.



Figura 16.52. Comprobador de instalaciones eléctricas de baja tensión.

16.13.3. Cámara termográfica

Este tipo de instrumento de medida nos permite tomar de forma rápida una imagen térmica de un equipo eléctrico en funcionamiento. Esto nos permite detectar con facilidad conexiones sueltas o en mal estado, detección de desequilibrios y sobrecargas eléctricas en conductores o en aparatos de maniobra y protección, inspección de motores eléctricos, etc. La termografía resulta muy útil en el mantenimiento de las instalaciones. Así, por ejemplo, si lo que se detecta son conexiones sobrecalentadas, se desmontan, se limpian y se vuelven ajustar hasta su correcto funcionamiento.

En la Figura 16.53 se muestra una cámara termográfica tomando una imagen térmica del estado de funcionamiento de las conexiones de un cuadro eléctrico.



Figura 16.53. Cámara termográfica.

16.14. El osciloscopio

El osciloscopio es un aparato de medida que nos va a ser indispensable para el análisis y comprobación de los valores que se dan en una tensión variable. Su aplicación en el campo de la electrónica se hace indispensable. Un osciloscopio lo que hace es mostrar en su pantalla la forma que posee una determinada tensión o corriente eléctrica. Es decir, representa en un eje de coordenadas las variaciones de estas magnitudes en función del tiempo.

Así, por ejemplo, la imagen que aparecería en la pantalla del osciloscopio al aplicarle una tensión alterna senoidal sería la mostrada en la Figura 16.54.

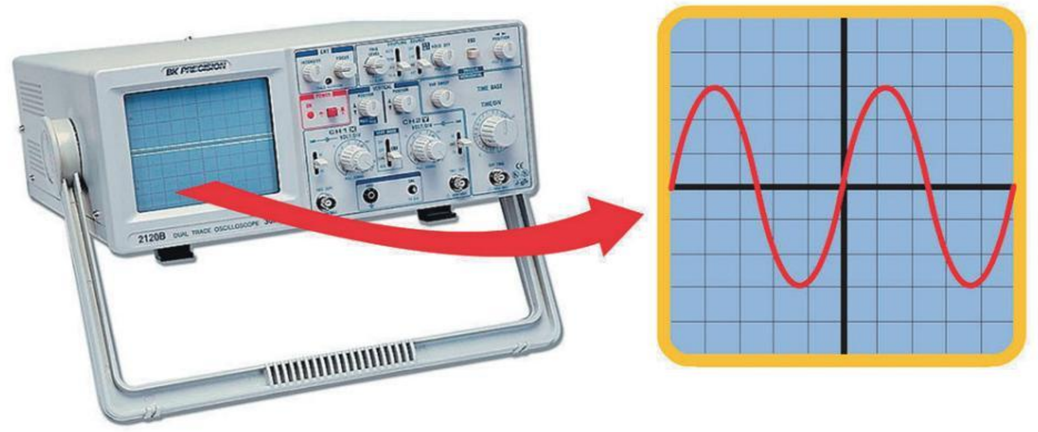


Figura 16.54. Imagen de una tensión senoidal en un osciloscopio.

El osciloscopio se vale de un tubo de rayos catódicos, sobre el cual incide un haz electrónico proyectado por el cátodo, para reproducir la imagen visual, tal como se muestra en la Figura 16.55.

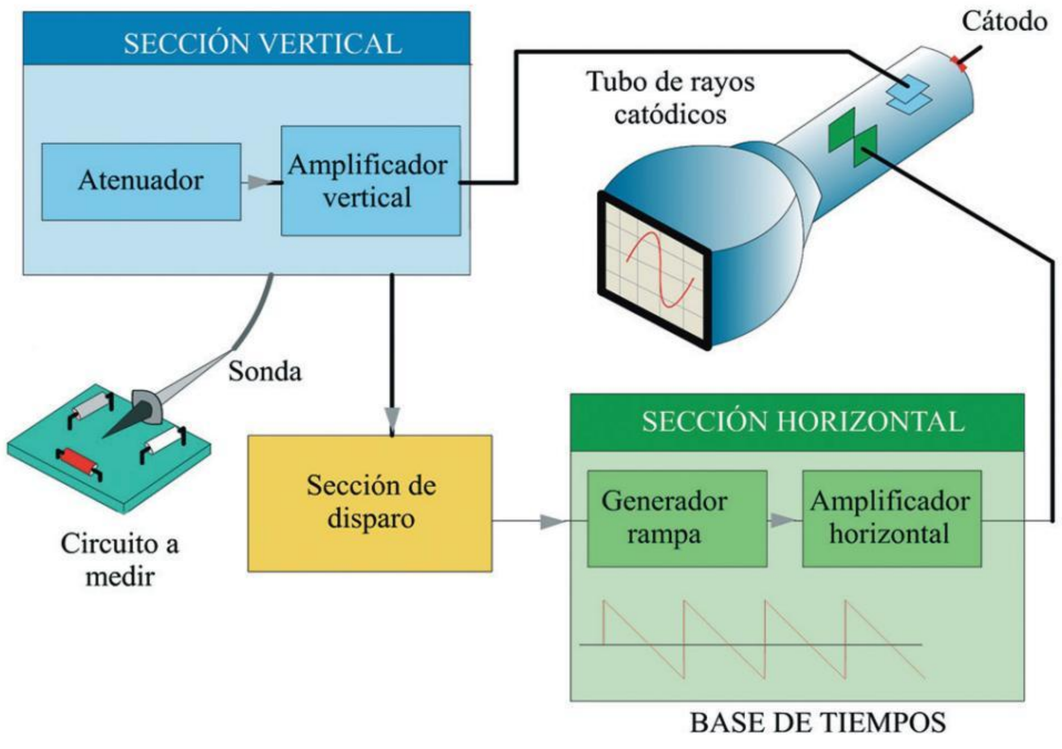


Figura 16.55. Funcionamiento básico de un osciloscopio analógico.

Mediante la sección de disparo y la sección horizontal se consigue generar una señal que es capaz de mover el haz de electrones, proyectado por el cátodo, de izquierda a derecha a una determinada frecuencia, produciendo en la capa fluorescente de la pantalla del tubo una línea horizontal. Mediante la base de tiempos se puede ajustar la frecuencia de barrido del haz electrónico.

© Ediciones Paraninfo

La sonda del osciloscopio toma la señal a medir, que se prepara en la sección vertical, para atacar las placas de deflexión vertical. Esto hace que el haz de electrones tienda a desviarse de arriba abajo en el tubo de rayos catódicos en función del orden de magnitud de la señal a medir (tensión en voltios). Mediante el amplificador vertical se consigue atenuar más o menos la señal a medir. Si la tensión a medir es positiva, el trazo presentado en la pantalla aparece por encima de la línea de referencia GND, y si es negativa, por debajo de dicha línea.

La combinación del trazo vertical y el horizontal produce en la pantalla la representación gráfica de la señal a medir.

Base de tiempos y amplificador horizontal

El circuito de base de tiempos de un osciloscopio es el que hace posible que la tensión que nosotros queremos representar aparezca en función del tiempo transcurrido. Mediante el circuito del amplificador horizontal podemos seleccionar las diferentes escalas de tiempos con las que nos interese trabajar en cada momento sobre el eje *X*, para lo que hacemos girar el selector de ajuste de la base de tiempos (Timebase). Para hacernos una idea del campo de medida de este circuito, se muestran, a continuación, los grados de desviación de un osciloscopio comercial: de 1 a 500 ms/división, de 1 a 500 µs/div y de 100 a 500 ns/div.

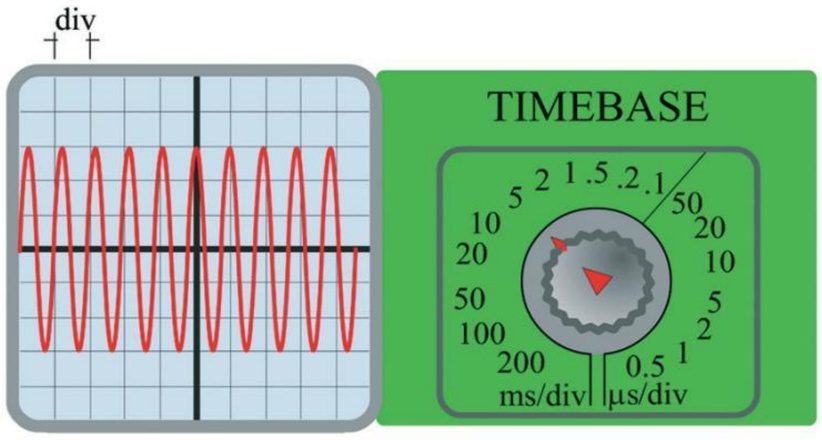


Figura 16.56. Selector de ajuste de la base de tiempos.

Amplificador vertical

Este circuito se encarga de que aparezcan representados los valores de tensión en el eje *Y* de la pantalla del osciloscopio. Mediante este circuito también podemos seleccionar diferentes escalas de tensión, como por ejemplo: de 1 a 10 V/div y de 2 a 500 mV/div.

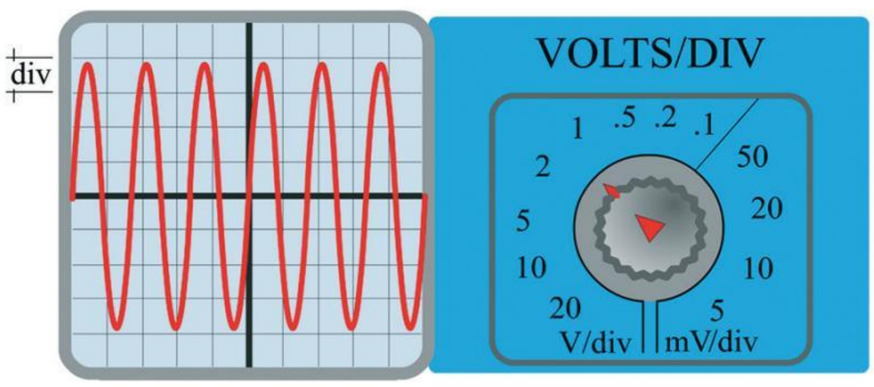
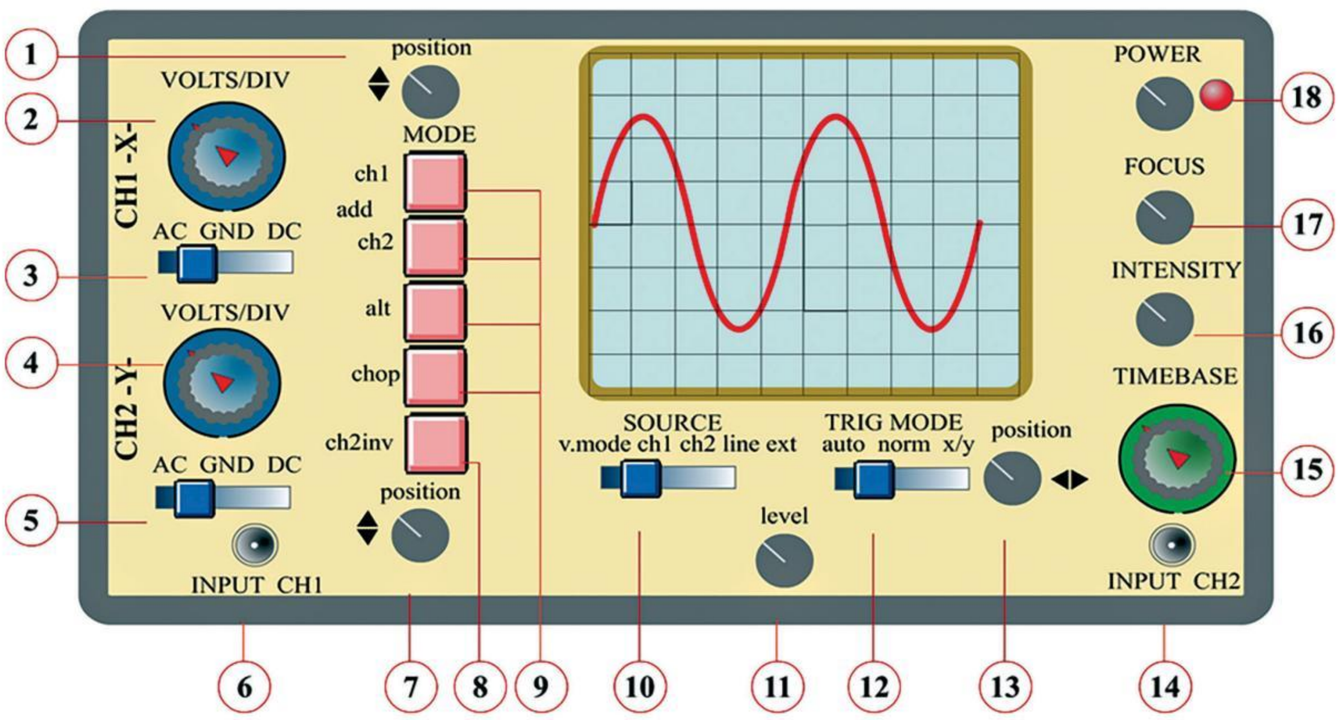


Figura 16.57. Selección del atenuador de entrada vertical.



1. **Desplazamiento vertical de canal 1:** permite desplazar la señal del canal 1 en sentido vertical.
2. **Atenuador vertical (CH1):** permite seleccionar la constante de medida en voltios/división del canal 1.
3. **Selector AC-GND-DC de canal 1:** con este conmutador podemos seleccionar el tipo de señal de entrada para el canal 1: AC para corriente alterna, CC para corriente continua y GND para señal de entrada desconectada [entrada conectada a masa; aquí podemos situar la señal de referencia con el mando de desplazamiento vertical (1) donde deseemos].
4. **Atenuador vertical (CH2).**
5. **Selector AC-GND-DC de canal 2.**
6. **Entrada vertical (CH1):** entrada del canal 1.
7. **Desplazamiento vertical de canal 2.**
8. **Inversor de la señal:** con este conmutador invertimos la señal del canal 1 o 2 en los modos de funcionamiento CH1 o CH2 (9).
9. **Modos de funcionamiento:** permite seleccionar la señal que se quiere visualizar en pantalla.
10. **Selector de la fuente de barrido.**
11. **Nivel (comienzo del trazo):** mediante este control se puede seleccionar el punto de la señal donde comience el trazo.
12. **Modos de disparo:** permite seleccionar el modo de disparo: Auto (los impulsos de barrido se producen internamente).
13. **Desplazamiento horizontal:** con este control podemos variar la posición horizontal del trazo.
14. **Entrada vertical (CH2).**
15. **Base de tiempos:** selecciona la constante del eje de tiempos.
16. **Brillo.**
17. **Foco:** enfocamos el trazo de la señal en pantalla.
18. **Interruptor de encendido.**

Figura 16.58. Osciloscopio genérico de laboratorio.

© Ediciones Paraninfo

Presentamos en la Figura 16.58 lo que podría ser un osciloscopio genérico, con sus controles más característicos, de forma que nos permita familiarizarnos con estos.

En la actualidad se están imponiendo los osciloscopios digitales debido a las ventajas que presentan frente a los analógicos. En estos tendremos más opciones a la hora de analizar una señal, que normalmente aparecerán mediante menús en pantalla.

16.14.1. Manejo del osciloscopio

Como medida de precaución general, antes de conectar un osciloscopio a la red eléctrica hay que asegurarse de que este esté debidamente conectado a tierra.

Una vez que se ha puesto en marcha el osciloscopio con el interruptor de encendido, seleccionaremos el conmutador de entrada de señal vertical en la posición GND y, con los controles de posición (POSITION), desplazaremos el trazo hasta el centro de la pantalla. Seguidamente se ajustan la intensidad y el foco del trazo en pantalla.

Tanto para medida de señales de C.A. como de C.C. lo primero que haremos será introducir la sonda en el conector correspondiente (INPUT).

Para la medida de corrientes alternas colocaremos el selector de entrada en AC. Además nos aseguraremos de que la fuente de barrido (SOURCE) del circuito de disparo (TRIGGER) seleccionada sea correcta. Seguidamente situaremos los mandos del atenuador vertical (volts/div) y de la base de tiempos (TIMEBASE) hasta conseguir encajar en la pantalla un ciclo completo de la señal (al manejar estos dos mandos se debe observar que el mando de ajuste fino se encuentra en posición desconectada CAL).

Para la medida de corrientes continuas colocaremos el selector de entrada en DC.

Actividad resuelta 16.14

Al realizar una medida de una tensión alterna con un osciloscopio aparece en la pantalla la imagen que se muestra en la Figura 16.59. Si los grados de desviación seleccionados fuesen: atenuador vertical (2 V/div), base de tiempos (5 ms/div), averigua el valor máximo y eficaz de la tensión, así como el periodo y la frecuencia.

Solución:

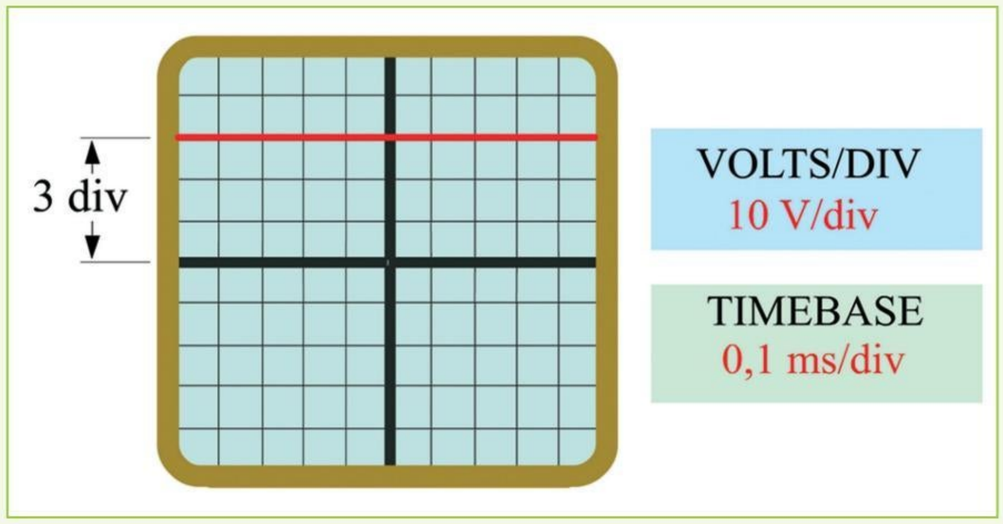


Figura 16.59.

$$U_{máx} = 4 \text{ div} \cdot 2 \text{ V/div} = 8 \text{ V}$$

$$T = 6 \text{ div} \cdot 5 \text{ ms/div} = 30 \text{ ms} = 0{,}03 \text{ s}$$

$$U_{eficaz} = \frac{U_{máx}}{\sqrt{2}} = \frac{8}{\sqrt{2}} = 5{,}66 \text{ V}$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0{,}03} = 33{,}33 \text{ Hz}$$

Actividad resuelta 16.15

Al realizar una medida con un osciloscopio de una tensión continua aparece en la pantalla la imagen que se muestra en la Figura 16.60. Si los grados de desviación seleccionados fuesen: atenuador vertical (10 V/div), base de tiempos (0,1 ms/div), averigua el valor medio de la tensión continua.

Solución:

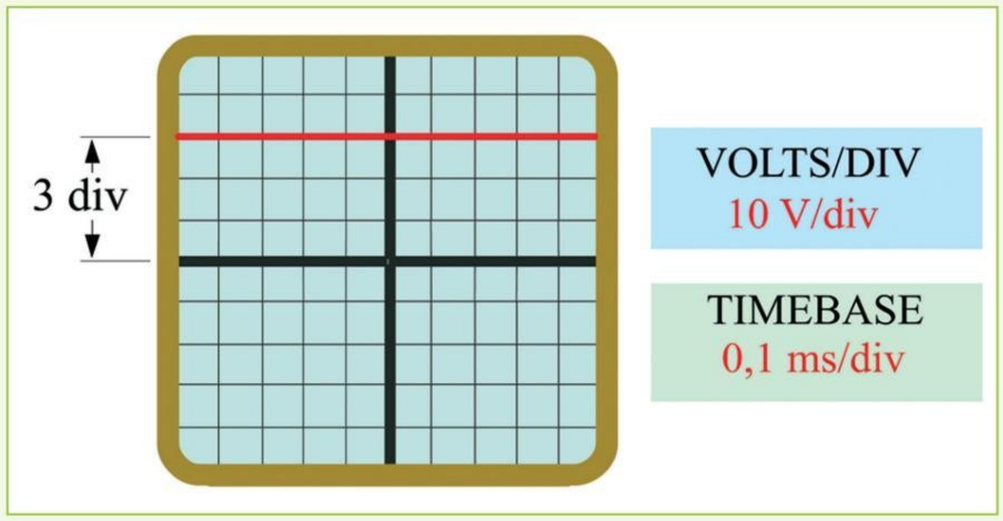


Figura 16.60.

$$U_{CC} = 3 \text{ div} \cdot 10 \text{ V/div} = 30 \text{ V}$$

© Ediciones Paraninfo

Comprobación práctica en el laboratorio

16.1. **Identificación de aparatos de medida.** Consigue diferentes modelos de aparatos de medida; observa todas las indicaciones que aparecen en pantalla o en sus instrucciones de manejo y con ellas indica: magnitud a medir, campo de medición, posición de funcionamiento, sistema de medición empleado, tipo de corriente, clase del instrumento, así como la constante de la escala.

16.2. **Amperímetro con *shunt*.** Consigue un amperímetro y varios *shunts* comerciales y observa sus características. Primero mide la corriente por un circuito de forma directa con el amperímetro y determina la constante de escala. Posteriormente conecta en paralelo con el amperímetro cada uno de los *shunts* comerciales de forma independiente, anota los resultados obtenidos y determina en cuánto se amplía el alcance del amperímetro en cada caso, así como las nuevas constantes de escala.

16.3. **Amperímetro con transformador de intensidad.** Consigue un amperímetro de C.A. y varios transformadores de intensidad comerciales y observa sus características. Primero mide la corriente por un circuito de C.A. de forma directa con el amperímetro y determina la constante de escala. Posteriormente conecta con el amperímetro cada uno de los transformadores de intensidad comerciales de forma independiente, anota los resultados obtenidos y determina en cuánto se amplía el alcance del amperímetro en cada caso, así como las nuevas constantes de escala.

16.4. **Voltímetro con transformador de tensión.** Consigue un voltímetro de C.A. y varios transformadores de tensión comerciales y observa sus características. Primero mide la tensión por un circuito de C.A. de forma directa con el voltímetro y determina la constante de escala. Posteriormente conecta con el voltímetro cada uno de los transformadores de tensión comerciales de forma independiente, anota los resultados obtenidos y determina en cuánto se amplía el alcance del voltímetro en cada caso, así como las nuevas constantes de escala.

16.5. **Manejo del polímetro.** Consigue un polímetro comercial, analiza sus características y sus diferentes campos de medida y comprueba su funcionamiento en la verificación de un circuito eléctrico.

16.6. **Vatímetro con transformadores de medida.** Consigue un vatímetro para la medida de C.A. monofásica, determina la constante de la escala y realiza la medida de potencia de un receptor. Seguidamente conecta un transformador de tensión en la bobina voltimétrica y un transformador de intensidad en la amperimétrica, calcula la nueva constante de la escala y compruébalo mediante la realización de una nueva medida.

16.7. **Medida de potencia reactiva.** Consigue un várметro y un vatímetro y realiza la medida de la potencia reactiva y activa de una carga monofásica (por ejemplo, un motor monofásico). Seguidamente calcula la potencia aparente y el factor de potencia.

16.8. **Medida del factor de potencia.** Conecta un vatímetro, un voltímetro y un amperímetro a un motor monofásico. Con los datos obtenidos determina su factor de potencia.

16.9. **Vatímetro trifásico.** Consigue un vatímetro trifásico para medida de potencias sin neutro. Mide la potencia de un motor trifásico. Seguidamente consigue tres vatímetros monofásicos y mediante una de las conexiones estudiadas mide la potencia del motor. A continuación, repite la medida con el sistema de dos vatímetros y compara todos los resultados obtenidos.

16.10. **Contador de energía trifásico.** Consigue un contador de energía trifásico de inducción, analiza sus características y mide la energía consumida por un motor trifásico en un periodo de tiempo determinado.

16.11. **Medida de la frecuencia.** Consigue diferentes tipos de frecuencímetros y analiza y compara sus características. Seguidamente realiza la medida de la frecuencia de la red eléctrica.

16.12. **Manejo del fasímetro.** Consigue diferentes tipos de fasímetros y analiza y compara sus características. A continuación realiza la medida del factor de potencia de un motor trifásico.

© Ediciones Paraninfo

16.13. Medida de la resistencia con puente de medida. Consigue un puente de medida, analiza sus características y realiza con él la medida de varias resistencias de diferentes valores óhmicos.

16.14. Medida de la resistencia de aislamiento. Consigue un medidor de resistencias de aislamiento, analiza sus características y verifica la resistencia de aislamiento de una sencilla instalación eléctrica.

16.15. Manejo del telurómetro. Consigue un telurómetro, analiza sus características, estudia el procedimiento de medida proporcionado por el fabricante y verifica la resistencia de una toma de tierra.

16.16. Manejo del osciloscopio. Consigue un osciloscopio, analiza sus características y con la ayuda de un generador de funciones comprueba los valores de las magnitudes asociadas a señales senoidales de diferentes frecuencias. Para hacerlo correctamente sigue atentamente las siguientes recomendaciones:

a) Poner en marcha el osciloscopio siguiendo las instrucciones que aparecen en el manual de funcionamiento.

b) Situar el mando del amplificador vertical en su valor máximo. De esta forma, evitaremos que la tensión que deseamos medir sea superior a la que está preparada el osciloscopio.

c) Situar el conmutador de entrada en C.A.

d) Aplicar la tensión alterna a medir a la entrada vertical.

e) Girar el mando del atenuador vertical hasta que sea fácilmente visible la señal senoidal en la pantalla.

f) Girar el selector de la base de tiempos hasta que se pueda ver claramente un ciclo completo de la señal alterna en la pantalla.

g) Estabilizar la imagen mediante el control de sincronismo.

h) Tomar las lecturas de la pantalla y determinar el valor máximo y el periodo. Con estos datos se pueden calcular el valor eficaz y la frecuencia.

Al finalizar cada una de estas actividades deberás elaborar un informe-memoria sobre la actividad desarrollada, indicando los resultados obtenidos y estructurándolos en los apartados necesarios para una adecuada documentación de las mismas (descripción del proceso seguido, medios utilizados, esquemas y planos utilizados, cálculos, medidas, etc.).

© Ediciones Paraninfo

Actividades de comprobación

16.1. El sistema de medida de bobina móvil:

a) Sirve para medir directamente grandes corrientes.

b) En combinación con un rectificador sirve para medir C.C. y C.A.

c) Sirve para medir la potencia.

16.2. El sistema de medida de hierro móvil:

a) Sirve para medir directamente grandes corrientes.

b) Sirve para medir C.C. y C.A.

c) Sirve para medir tensiones y corrientes hasta frecuencias elevadas.

16.3. El sistema de medida electrodinámico:

a) Se utiliza fundamentalmente para la medida de la potencia.

b) Sirve para medir en C.C. y C.A.

c) Sirve para medir corrientes y tensiones.

16.4. El sistema de medida de inducción:

a) Se utiliza fundamentalmente para la medida de energía en C.A.

b) Sirve para medir en C.C.

c) Sirve para medir el ángulo de desfase.

16.5. El sistema de medida bimetálico:

a) Mide el valor medio de la corriente en C.C. y el eficaz en C.A.

b) Sirve para medir solo en C.C.

c) Se utiliza para medir la potencia.

16.6. El sistema de láminas vibrantes:

a) Se utiliza para medir la energía eléctrica.

b) Sirve para medir en C.C. y C.A.

c) Se utiliza para la medida de frecuencias.

16.7. El *shunt*:

a) Es una resistencia para ampliar el alcance de un voltímetro.

b) Es una resistencia para ampliar el alcance de un amperímetro.

c) Se conecta en serie con el amperímetro.

16.8. El transformador de intensidad:

a) No debe dejarse nunca abierto el circuito secundario de medida.

b) Se utiliza para ampliar el alcance de amperímetros en C.A.

c) Se utiliza para ampliar el alcance de amperímetros en C.C.

16.9. Para comprobar el error que comete un amperímetro se toma una medida de 350 mA y luego se comprueba esa medida con un amperímetro de gran precisión, que da como resultado 335 mA. Determina el error absoluto y relativo cometido por el amperímetro.

16.10. Para verificar la precisión de un voltímetro se lo somete a una contrastación con un voltímetro patrón, y se anotan los siguientes resultados:

Voltímetro a verificar:	0 V	50 V	100 V	200 V
Voltímetro patrón:	0 V	49 V	98 V	197 V

¿Cuál será la clase de este voltímetro si el valor máximo de su escala es de 200 V?

16.11. Calcula el error máximo que puede cometer un vatímetro de clase 2,5 si su campo de medida es 0-500 W.

16.12. Se desea ampliar el alcance de un amperímetro de C.C. con sistema de medida de cuadro móvil. La corriente máxima que admite es de 100 mA y su resistencia interna es de 0,19 Ω. Calcula el valor de la resistencia del *shunt* para ampliar el alcance del aparato de medida hasta los 2 A.

16.13. Un amperímetro comercial de C.C. permite medir una corriente como máximo de 10 A. Posee una escala fraccionada en 80 divisiones y una resistencia interna de 1,9 Ω. Se desea ampliar el alcance del aparato para poder realizar medidas de hasta 200 A. Calcula la resistencia del *shunt* y la constante de la escala del aparato con y sin *shunt*. ¿Cuál será el resultado de la medida del amperímetro con *shunt* y sin *shunt* si se lee en la escala 65 divisiones?

16.14. La potencia nominal de una estación depuradora es de 70 kW con un factor de potencia de 0,8. El suministro de energía es trifásico a 230 V. Para realizar la medida de la intensidad de línea se dispone de un amperímetro con un fondo de escala de 5 A. Selecciona el transformador de intensidad más adecuado, así como su relación de transformación. Suponiendo que el amperímetro posee una escala fraccionada en 40 divisiones, ¿cuál será el resultado de la medida si se lee en la escala 35 divisiones?

16.15. Se desea ampliar el alcance de un voltímetro, con un campo de indicación de 20 V, hasta los 1.000 V. Este posee una resistencia interna de 5 kΩ y su escala está fraccionada en 100 divisiones. Calcula el valor de la resistencia adicional a conectar en serie con el voltímetro para ampliar su alcance, así como la constante del instrumento con y sin resistencia adicional. ¿Cuál será el resultado de la medida, con y sin la resistencia adicional, si se lee en la escala 22 divisiones?

© Ediciones Paraninfo

16.16. Para realizar la medida de tensión de una línea de distribución de 10 kV/50 Hz se dispone de un voltímetro de 0-110 V. Selecciona el transformador de tensión más adecuado para ello, así como su relación de transformación. Suponiendo que el voltímetro posee una escala fraccionada en 50 divisiones, ¿cuál será el resultado de la medida si se lee en la escala 45 divisiones?

16.17. El vatímetro ferrodinámico:

a) En C.A. indica la potencia activa.

b) En C.C. indica la potencia en VAR.

c) Posee una bobina voltimétrica de gran resistencia y una amperimétrica de baja resistencia.

16.18. El frecuencímetro se conecta:

a) En serie con la línea.

b) En paralelo con la línea.

c) La bobina amperimétrica en serie y la voltimétrica en paralelo.

16.19. El fasímetro se conecta:

a) En serie con la línea.

b) En paralelo con la línea.

c) La bobina amperimétrica en serie y la voltimétrica en paralelo.

16.20. Para la medida de resistencias eléctricas resulta más preciso:

a) El óhmetro amperimétrico.

b) Los puentes de medida.

c) El vármetro.

16.21. La resistencia de aislamiento de una instalación eléctrica:

a) Si es baja nos indica que algún aislante de la instalación está en mal estado.

b) Se mide con el megóhmetro.

c) Debe ser tan elevada como se indique en la normativa vigente.

16.22. La resistencia de una toma de tierra:

a) Si es muy alta puede causar accidentes por contactos indirectos.

b) Se mide con el telurómetro.

c) Debe ser lo más pequeña posible.

16.23. Un vatímetro electrodinámico posee dos alcances de tensión: 50 V y 150 V, y un alcance de intensidad: 5 A. Averigua las constantes de la escala para cada una de las combinaciones posibles, si la escala está fraccionada en 25 divisiones. ¿Cuál será el resultado de la medida si se leen 15 divisiones para el campo de medida de 150 V-5 A?

Actividades de evaluación resueltas

A continuación se dan los enunciados de una serie de actividades de evaluación. Estas actividades las podrás encontrar resueltas accediendo al MATERIAL WEB creado para este texto.

16.1. Durante la medida de la potencia de un motor monofásico con un vatímetro de alcance 5 A/300 V y 750 divisiones en la escala, la lectura efectuada es de 200 divisiones. La medida de la corriente del motor se efectúa al mismo tiempo con un amperímetro que indica un valor de 3 A y la tensión de un valor de 220 V. El amperímetro y el circuito amperimétrico del vatímetro están conectados a un transformador de corriente de relación 15/5:

a) Dibuja un esquema del sistema de medida.

b) Calcula la potencia activa absorbida por el motor y el factor de potencia del mismo.

16.2. El circuito puente que se muestra en la Figura 16.61 está equilibrado si $R_1 = 100\ \Omega$, $R_2 = 1.000\ \Omega$ y $R_3 = 150\ \Omega$. El puente recibe su energía de una fuente de 5 V:

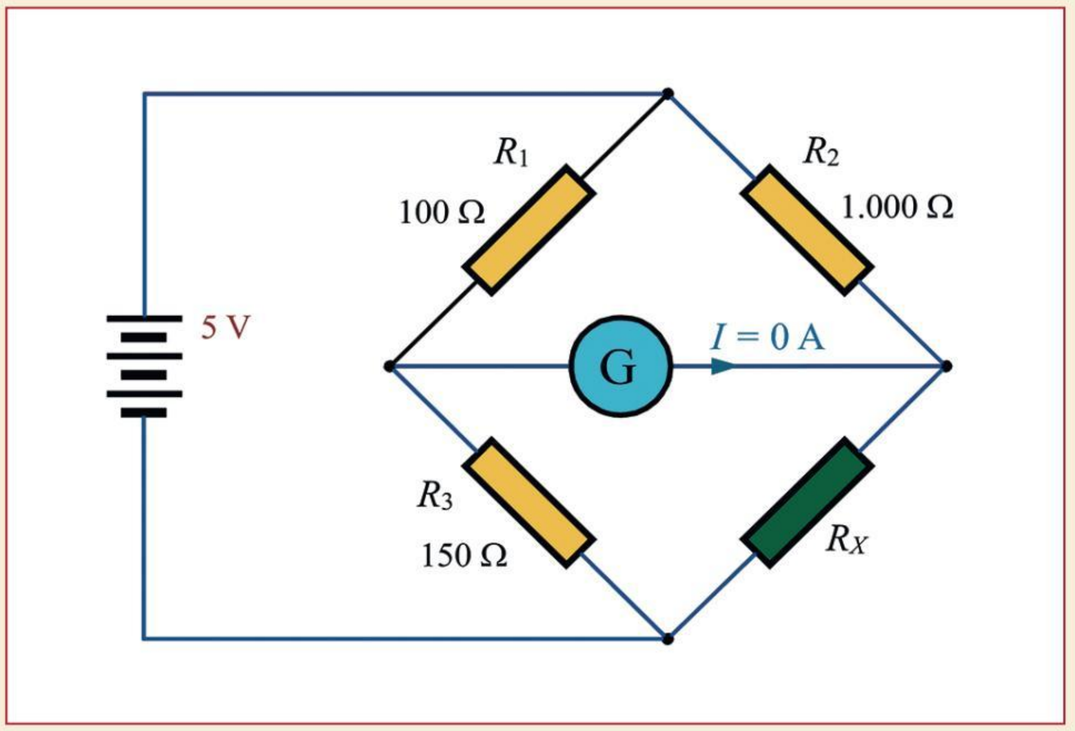


Figura 16.61.

a) ¿Cuál será el valor de R_X?

b) Si las resistencias del puente disipan 250 mW como máximo, ¿se sobrepasará la máxima potencia disipable?

© Ediciones Paraninfo

16.3. Calcula el error relativo porcentual producido en la medida de corriente de R_3 al insertar un amperímetro cuya resistencia interna es de 100) (Figura 16.62).

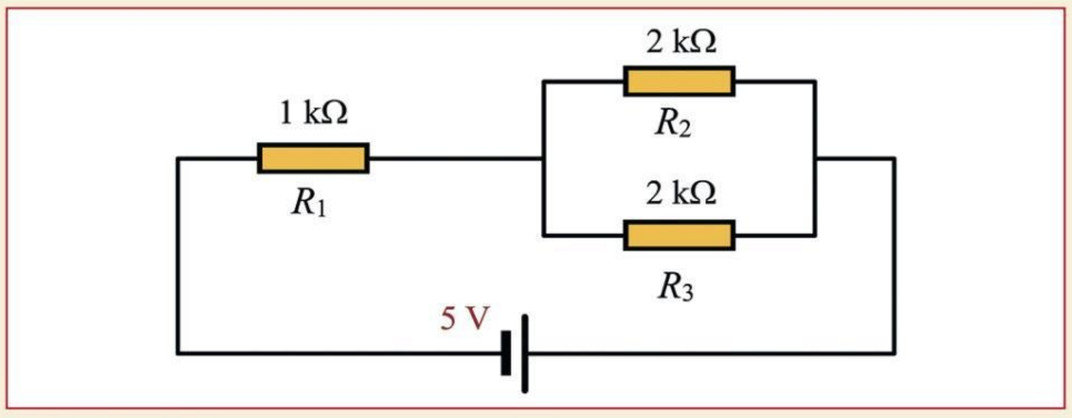


Figura 16.62.

16.4. Desde una red trifásica de 380 V de tensión de línea se alimenta una carga trifásica que absorbe una potencia activa de 15 kW y una potencia reactiva de 6 kVAR. Determina:

a) Indica con un esquema cómo se puede hacer la medida de estas potencias con el método de los dos vatímetros y la lectura que se obtendría en cada uno de ellos.

b) La intensidad de línea absorbida de la red.

c) El módulo de la impedancia por fase de la carga, en el supuesto de que esté conectada en estrella.

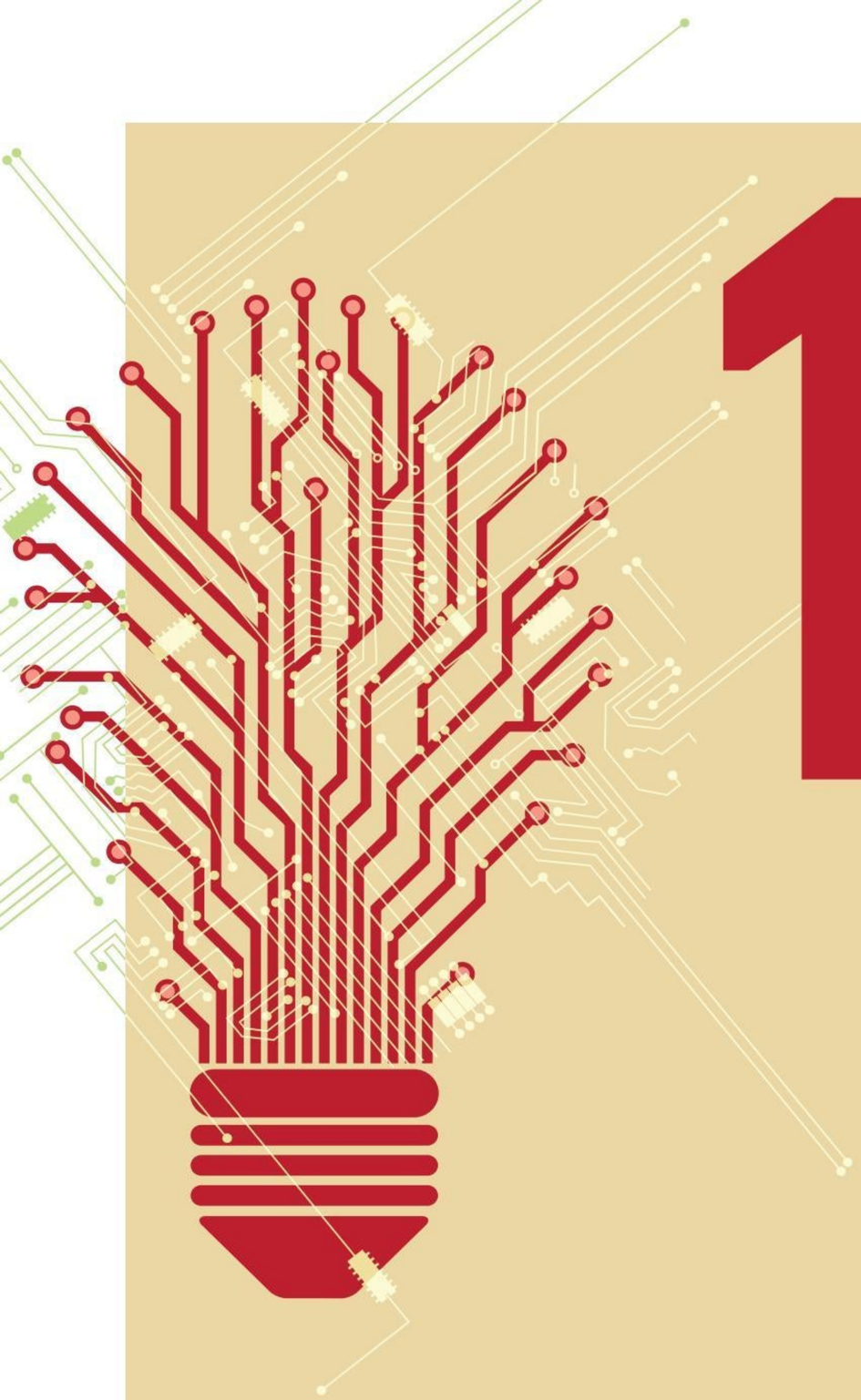
Actividades de ampliación

16.1. Con el fin de conseguir una mayor profundización en la materia, se han incluido los enunciados de una serie de ***«actividades de evaluación propuestas de ampliación (16)»*** para esta unidad que podrás encontrar dentro del MATERIAL WEB elaborado para este texto. Selecciona alguna de estas actividades y encuentra su solución.

16.2. Busca en internet varios fabricantes de aparatos de medida y recaba información sobre los productos que comercializan. Descárgate catálogos comerciales y analiza las características técnicas de los mismos.

© Ediciones Paraninfo

17 Lámparas eléctricas



Contenidos

- **17.1.** Magnitudes luminosas de las lámparas eléctricas
- **17.2.** Tipos de lámparas eléctricas
- **17.3.** Proyectos de alumbrado de interiores

Hoy en día es impensable vivir sin la comodidad que proporciona la luz eléctrica. Para cubrir estas necesidades se fabrica una gran variedad de lámparas eléctricas. Cada una de ellas posee cualidades específicas que las hacen ideales para ciertas aplicaciones.

Las lámparas incandescentes se pueden conectar directamente a la red; sin embargo, las lámparas de descarga en un gas, como por ejemplo las fluorescentes, vapor de mercurio y vapor de sodio, necesitan de equipos especiales para su funcionamiento.

Objetivos

- Comparar las diferentes lámparas eléctricas a través de sus características luminosas y eléctricas.
- Seleccionar la lámpara más adecuada para cada aplicación.
- Describir los equipos de arranque de las lámparas de descarga.
- Realizar un pequeño proyecto de alumbrado.

17.1. Magnitudes luminosas de las lámparas eléctricas

La luz es una forma de energía que se transmite por medio de ondas electromagnéticas a una velocidad de unos 300.000 km/s. Estas ondas electromagnéticas vibran en un ancho espectro de frecuencias. Sin embargo, el ojo humano solo es capaz de percibir una pequeña parte de esta vibración, lo que se conoce como espectro visible. En la Figura 17.1 se muestra el espectro de la radiación visible que se encuentra entre los 420 nm de longitud de onda y los 780 nm (la longitud de onda es la inversa de la frecuencia de vibración de radiación electromagnética).

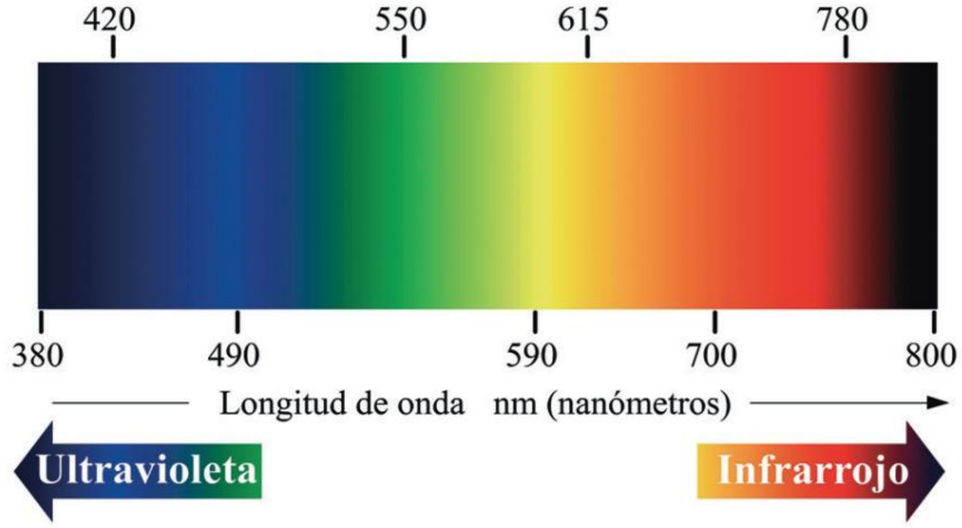


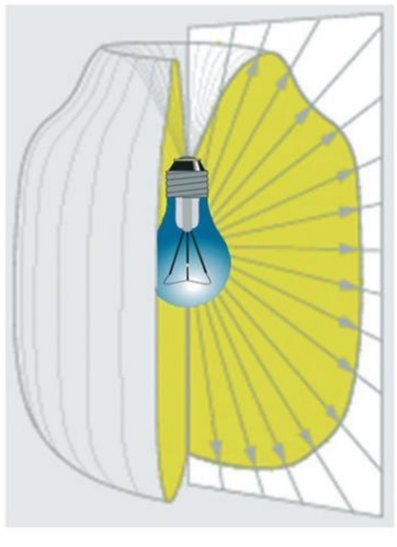
Figura 17.1. Espectro de la luz.

Dependiendo de la longitud de onda que perciba el ojo, la luz se observará con un color o con otro. De esta forma tendremos 490 nm para el color azul, 590 para el amarillo y 700 para el rojo.

Para definir las magnitudes luminosas tendremos que disponer de una fuente luminosa que proporcione luz, así como de los objetos que se van a iluminar.

17.1.1. Flujo luminoso

El flujo luminoso es la cantidad de luz emitida por una fuente de luz, dentro del espectro visible, en un segundo y en todas las direcciones. Se representa por la letra griega Φ y su unidad de medida es el **lumen** (lm) (Figura 17.2).



Flujo luminoso	
Símbolo:	Unidad:
Φ	lumen (lm)

Figura 17.2. Flujo luminoso.

Así, por ejemplo, una lámpara incandescente de 60 W produce un flujo luminoso de unos 600 lm, mientras que una fluorescente de 65 W (blanco industrial) proporciona un flujo de 5.000 lm, y una lámpara de vapor de sodio a alta presión de 1.000 W nos da un flujo luminoso de hasta 130.000 lm.

17.1.2. Eficacia luminosa

La eficacia luminosa de una lámpara es el cociente entre el flujo luminoso emitido en lúmenes y la potencia consumida en vatios.

El rendimiento o eficacia de una lámpara es importante, ya que indica los lúmenes que emite esta por cada vatio consumido de la red eléctrica. Este dato será muy importante a la hora de seleccionar la lámpara más adecuada para una determinada aplicación, ya que cuanto mayor sea su eficacia luminosa, menor será el consumo de energía eléctrica del sistema de alumbrado. Su unidad es el **lm/W** (Figura 17.3).

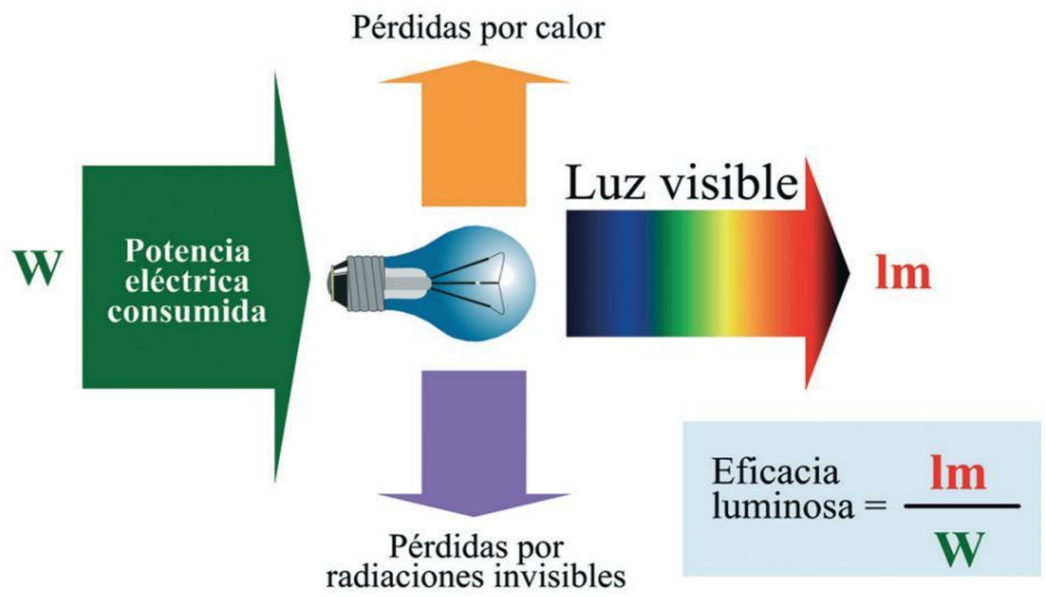


Figura 17.3. Eficacia luminosa de una lámpara.

Así, por ejemplo, una lámpara incandescente viene a tener una eficacia de entre 8 y 20 lm/W, mientras que una fluorescente puede alcanzar una eficacia entre 40 a 93 lm/W. En el otro extremo tenemos a las lámparas de sodio a baja presión, que alcanzan una eficacia luminosa de hasta 183 lm/W.

17.1.3. Índice de reproducción cromático (IRC)

El IRC indica el grado de calidad que poseen las fuentes luminosas para reproducir los colores lo más exactamente posible.

El valor 100 indica la reproducción de color de mayor calidad. Las normas clasifican a las fuentes luminosas en grupos, según sea su índice de reproducción cromático, tal como se indica en la Tabla 17.1.

© Ediciones Paraninfo

Así, por ejemplo, mientras una lámpara incandescente tiene un IRC de 100, una fluorescente, dependiendo del tipo, puede tener un IRC de 50 a 97, y una de vapor de mercurio, entre 48 y 50.

Tabla 17.1. Clasificación del índice de reproducción cromático (IRC) de una lámpara

Índice de reproducción cromático (IRC)	Nivel de reproducción cromático
IRC de 85 a 100	Excelente
IRC de 70 a 84	Bueno
IRC de 40 a 69	Aceptable
IRC menor de 40	Limitado

17.1.4. Temperatura de color (K)

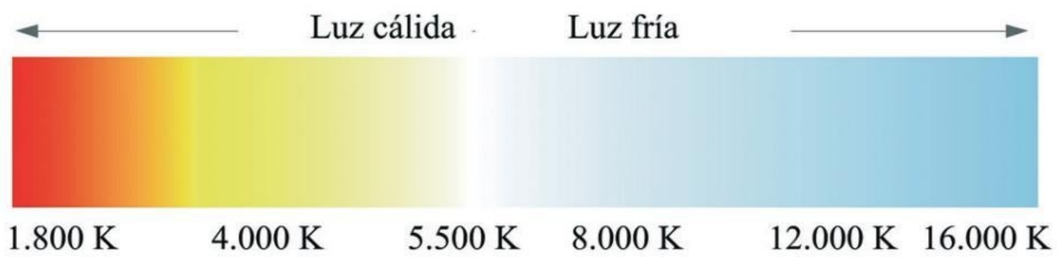


Figura 17.4. Temperatura de color.

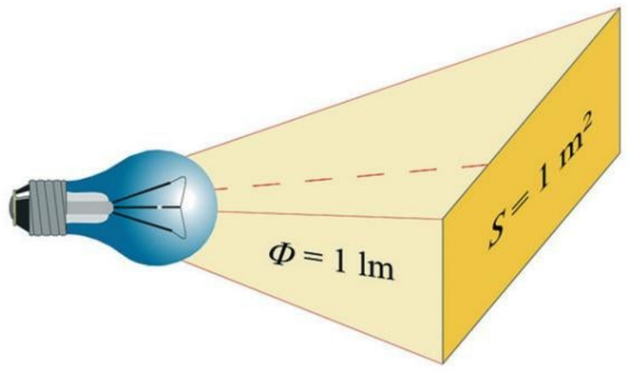
En el lenguaje común, se acostumbra a hablar de luces frías o de luces cálidas. En las frías predominan las radiaciones visibles de color azul, verde, etc. Este aspecto de tonalidad de las lámparas se denomina temperatura de color. Una luz cálida puede ser muy confortable en un ambiente de distensión y relax, a pesar de que este tipo de tonalidades disminuye el índice de reproducción cromático. Por otro lado, una luz fría puede ser muy eficaz para ambientes donde se quiere conseguir una gran actividad. La temperatura de color se mide en grados Kelvin (K). En la Tabla 17.2 se muestra, como ejemplo, la temperatura de color aproximada de algunas fuentes de luz conocidas.

Tabla 17.2. Temperatura de color de fuentes luminosas

Fuente de luz	Temperatura de color en K
Lámpara incandescente	2.800
Tubo fluorescente (blanco cálido)	3.000
Tubo fluorescente (blanco día)	4.000
Tubo fluorescente (luz de día)	6.000
Luz solar directa con el cielo despejado	6.000

17.1.5. Iluminancia o nivel de iluminación (*E*)

La iluminancia es el flujo luminoso recibido por una unidad de superficie. Su unidad es el lux, pudiendo expresar que cuando una superficie de 1 metro cuadrado recibe un flujo luminoso de 1 lumen posee un nivel de iluminación de 1 lux (Figura 17.5).



$$E = \frac{\Phi}{S}$$

$$1 \text{ lux} = \frac{1 \text{ lm}}{1 \text{ m}^2}$$

Figura 17.5. Nivel de iluminación.

El conocimiento del nivel de iluminación necesario para realizar una determinada tarea visual de una forma adecuada es muy importante, ya que con él podremos definir el sistema de alumbrado más idóneo para conseguirlo. En la Tabla 17.3 se dan los niveles de iluminación recomendables según la actividad a realizar en el espacio a iluminar.

Tabla 17.3. Nivel de iluminación recomendable

Espacio a iluminar	Nivel de iluminación (lux)
Iluminación mínima de servicio en espacios exteriores.	20
Almacenes exteriores y patios de almacenamiento.	30
Pasillos exteriores, plataformas, aparcamientos cerrados.	50
Diques, muelles.	75
Teatros, salas de concierto, dormitorios de hoteles, aseos y lavabos.	100
Zonas de circulación en industrias, depósitos y almacenes.	150
Iluminación mínima de servicio para locales cerrados.	200
Trabajos medios manuales y a máquina. Trabajos normales en la industria química y alimentación; lectura ocasional y archivo.	300
Trabajos medios manuales y a máquina; montaje de automóviles; naves de imprentas; oficinas en general, almacenes y tiendas.	500

© Ediciones Paraninfo

Espacio a iluminar	Nivel de iluminación (lux)
Salas de lectura de pruebas, salas de dibujo y oficinas con máquinas de contabilidad.	750
Trabajos finos manuales y a máquina; montaje de máquinas para oficinas, trabajos con colores; salas donde se realicen dibujos muy precisos.	1.000
Trabajos muy finos manuales y a máquina; montaje de instrumentos y pequeños mecanismos de precisión, componentes electrónicos, calibración e inspección de piezas pequeñas y complicadas.	1.500
Trabajos minuciosos y muy precisos, por ejemplo, partes muy pequeñas de instrumentos, relojería y grabado; zona de operaciones en quirófano.	2.000

Mediante el luxómetro es posible medir el nivel de iluminación de un espacio y con esta información tomar las medidas oportunas para mejorar la iluminación (Figura 17.6).



Figura 17.6. Luxómetro digital.

Actividad resuelta 17.1

Una biblioteca recibe en la superficie de lectura flujo luminoso de 16.500 lm. Determina el nivel de iluminación conseguido si el local posee unas dimensiones de 11 m de largo por 5 de ancho.

Solución:

$$E = \frac{\Phi}{S} = \frac{16.500}{11 \cdot 5} = 300 \text{ lux}$$

Actividad resuelta 17.2

Se desea iluminar una oficina con un nivel de iluminación de 400 lux. Determina el flujo luminoso que deben proporcionar las lámparas (en el caso de que todo el flujo producido por las mismas aparezca en la superficie de trabajo) si el local posee una superficie de 100 m^2.

Solución:

$$\Phi = E \cdot S = 400 \cdot 100 = 40.000 \text{ lm}$$

17.2. Tipos de lámparas eléctricas

Las lámparas eléctricas tienen la misión de transformar la energía eléctrica en luminosa. Se pueden construir basándose en tres principios claramente diferenciados:

- Lámparas de incandescencia.
- Lámparas de descarga en un gas.
- Lámparas con LED.

Las lámparas incandescentes basan su funcionamiento en la emisión de luz cuando un filamento resistivo se calienta a elevadas temperaturas. Dentro de estas lámparas también se encuentran las halógenas.

Por otro lado, las lámparas de descarga en un gas funcionan gracias al efecto de la luminiscencia, y se caracterizan por producir luz cuando un gas es recorrido por una corriente eléctrica. Como ejemplos de lámparas de descarga tenemos las fluorescentes, las lámparas compactas de bajo consumo, las lámparas de vapor de mercurio, las lámparas de luz mezcla, las lámparas de vapor de sodio a alta presión y las lámparas de vapor de sodio a baja presión.

Hoy en día, las lámparas con LED, que aprovechan el efecto de electroluminiscencia que aparece en los semiconductores, se están imponiendo con fuerza gracias a su reducido consumo y larga vida útil.

17.2.1. Lámparas incandescentes

El funcionamiento de una lámpara incandescente es muy sencillo. Al atravesar la corriente un filamento resistivo, este alcanza una gran temperatura (unos 2.000 °C) poniéndose al rojo blanco, o sea incandescente, lo que provoca una emisión de radiaciones luminosas (Figura 17.7).

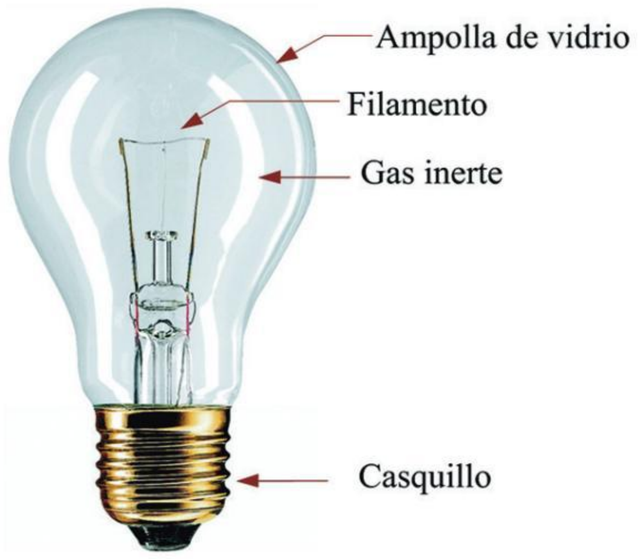


Figura 17.7. Lámpara incandescente.

© Ediciones Paraninfo

Las lámparas incandescentes han sido las lámparas más utilizadas durante el siglo XX por su bajo precio y facilidad de montaje. La vida útil de las mismas no suele superar las 1.000 horas de funcionamiento, frente a las 10.000 de una lámpara fluorescente o las 50.000 de una lámpara LED.

Debido a su baja eficacia luminosa (en torno a 15 lm/W), desde el año 2012 la Unión Europea prohíbe su fabricación.

El filamento de esta lámpara está formado por un conductor resistivo, de tungsteno o wolframio con una alta temperatura de fusión (3.400 ºC). Dado que el filamento está sometido a altas temperaturas, se produce una leve evaporación del mismo, que con el tiempo lo adelgaza y lo acaba destruyendo.

La ampolla se rellena con un gas inerte (mezcla de argón y nitrógeno) y se retira el oxígeno para evitar la combustión del filamento.

La temperatura de color que alcanzan estas lámparas está en torno a los 3.000 K, siendo su índice de reproducción cromático (IRC) entre 85 y 100. Por lo que se puede decir que reproducen muy bien los colores y aportan un ambiente cálido en la zona que iluminan.

A modo de ejemplo, en la Tabla 17.4 se muestran algunas de las características de una lámpara incandescente estándar.

Tabla 17.4.

Potencia (W)	Flujo luminoso (lm)	Casquillo
25	120	E27
40	430	E27
60	730	E27
100	1.380	E27
200	3.000	E27
500	8.400	E40

17.2.2. Lámparas incandescentes con halógenos

Las lámparas halógenas son muy parecidas a las incandescentes, pero se construyen de tal forma que se consigue elevar considerablemente su vida y su eficacia luminosa (Figura 17.8).

En este tipo de lámparas incandescentes se introduce en la ampolla un elemento halógeno, como el yodo, en combinación con los clásicos gases nobles que suelen contener las lámparas incandescentes. Cuando se pone en funcionamiento la lámpara, los átomos de tungsteno, de que se compone el filamento, se volatilizan y reaccionan químicamente con los átomos del halógeno para formar yoduro de tungsteno. Este compuesto gaseoso tiende a reaccionar nuevamente con los átomos del filamento, depositando los átomos volatilizados de tungsteno en dicho filamento y dejando libre el yodo para repetir el proceso. De esta forma se evita que se ennegrezca la ampolla y que el filamento se vaya regenerando, por lo que la vida de una lámpara halógena se alarga desde las 2.000 horas hasta las 3.000 horas.

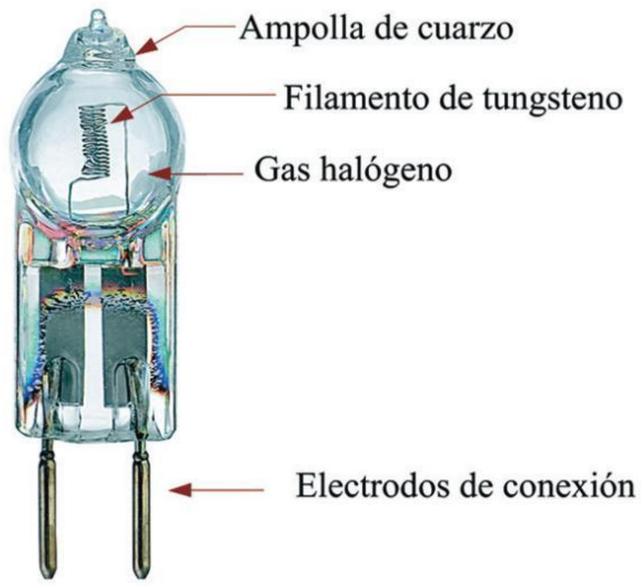


Figura 17.8. Lámpara halógena. (Cortesía de Philips.)

Para que el proceso de recombinación se produzca es necesario que se den temperaturas superiores a los 2.000 ºC y que la ampolla sea de pequeñas dimensiones. Por esta razón se construyen las ampollas de un material que soporte altas temperaturas como el cristal de cuarzo, ya que la temperatura que se puede llegar a dar en la superficie de la ampolla es del orden de 300 ºC a 600 ºC (Figura 17.9).

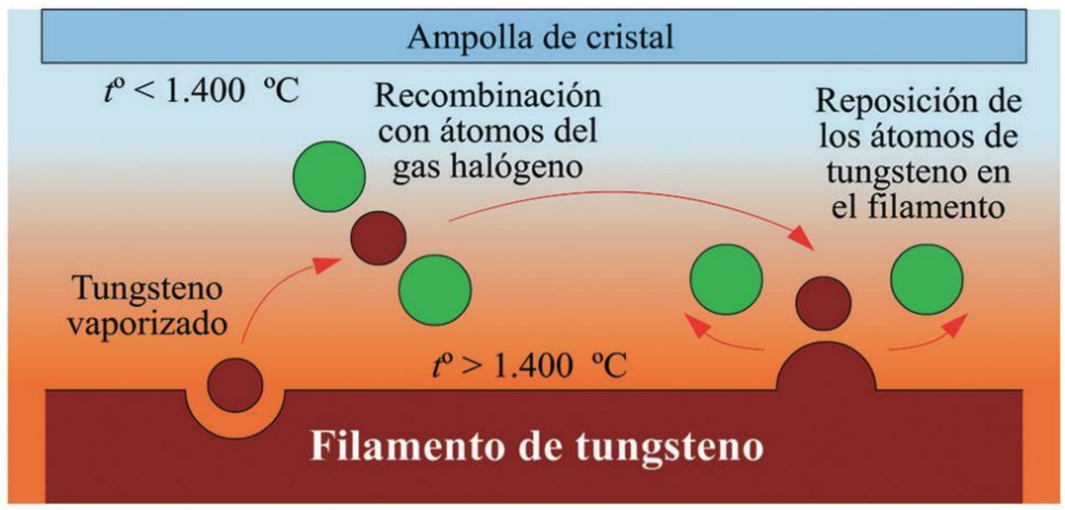


Figura 17.9. Ciclo del halógeno.

Seguro que alguna vez habrás oído comentar que no se debe tocar con los dedos una lámpara halógena. Efectivamente, debe evitarse tocar con los dedos estas lámparas, ya que la grasa que queda en la superficie de la ampolla en combinación con las altas temperaturas puede desvitrificar el cuarzo, lo que implica que la ampolla pueda llegar a romperse.

Con este tipo de lámparas se consigue una temperatura de color de unos 3.000 K (luz cálida) y una eficacia luminosa de unos 20 lm/W, siendo su índice de reproducción cromático de 100 (reproduce perfectamente los colores).

© Ediciones Paraninfo

En la actualidad se fabrica una amplia gama de lámparas halógenas. Así, por ejemplo, es muy popular el uso de estas lámparas para fines decorativos en el comercio y en el hogar. Generalmente se las hace funcionar a baja tensión a través de un transformador. Algunas llevan incorporado un reflector al que se le añade una doble envoltura (encima de la ampolla de cuarzo se coloca otra de vidrio), lo que facilita las labores de manipulación. En otros casos se dota a la lámpara de un reflector parabólico selectivo, de tal forma que solo refleja parte del espectro luminoso, como el rojo, verde, azul o amarillo, y es de gran aplicación en escaparates, escenarios, etc. En la Figura 17.10 se muestran diferentes tipos constructivos de lámparas halógenas.



Figura 17.10. Lámparas halógenas. (Cortesía de Philips).

Las aplicaciones más comunes de las lámparas halógenas las encontramos en el alumbrado del automóvil, proyectores de cine y diapositivas, fotografía, teatro, televisión, decoración de interiores y escaparates, galerías de arte, museos, etc. En la gama de alta potencia (hasta unos 2.000 W) en combinación con aparatos de proyección son ideales para el alumbrado exterior de edificios y monumentos, pequeñas instalaciones deportivas, etcétera.

Al igual que ha ocurrido con las lámparas incandescentes, debido a su baja eficacia luminosa (en torno a 25 lm/W), desde el año 2018 la Unión Europea prohíbe su fabricación. Algunas lámparas halógenas especializadas están exentas de la prohibición. Se refiere a aquellas aplicaciones donde las lámparas LED u otras alternativas de bajo consumo energético no estén disponibles aún. En este grupo se incluyen las lámparas que se utilizan en algunos hornos, así como lámparas halógenas especiales para proyectores.

17.2.3. Lámparas fluorescentes

La utilización de lámparas fluorescentes para la iluminación de todo tipo de locales es muy común, dado el buen rendimiento luminoso que estas poseen (unas cuatro veces mejor que una incandescente) y su larga duración (8.000 horas). El único inconveniente que quizás puedan presentar las lámparas fluorescentes frente a las incandescentes es que necesitan un equipo suplementario para su funcionamiento.

El funcionamiento de una lámpara fluorescente difiere totalmente de las incandescentes; en las primeras, la corriente debe atravesar un gas o un vapor metálico que está encerrado en un tubo, donde se desprende luz a baja temperatura (luz fría). Las lámparas fluorescentes, como todas aquellas que se basan en el mismo principio (lámparas de vapor de mercurio, de vapor de sodio, etc.), se conocen por el nombre de **lámparas de descarga** y se basan en el fenómeno de la **luminiscencia.** Veamos en qué consiste este fenómeno.

Se introduce un gas noble en un tubo cerrado (Figura 17.11). Si sometemos a los electrodos del tubo a una tensión lo suficientemente alta, algún electrón será arrancado del electrodo negativo y se sentirá atraído hacia el positivo. A medida que estos electrones chocan con los átomos del gas y arrancan electrones superficiales de aquellos átomos, se sigue este proceso indefinidamente, ya que cada vez se desencadenan más choques.

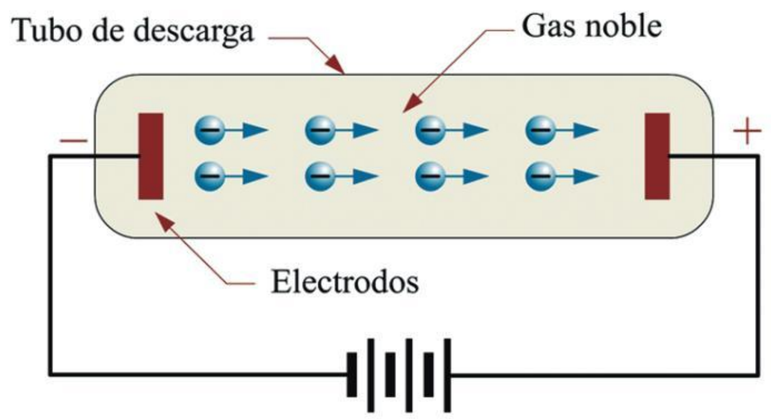


Figura 17.11. Funcionamiento de una lámpara de descarga.

Cuantos más electrones libres existan, mayor será la corriente que circule por el tubo y menor la resistencia que ofrezca el tubo al paso de la corriente eléctrica, por lo que será necesario limitarla desde el exterior por medio de un dispositivo adecuado (la reactancia).

El átomo que queda sin un electrón después de un choque se llama ion. Ahora bien, no todos los choques entre un electrón y un átomo producen la ionización de este último, sino que, con gran frecuencia, la energía del choque del electrón libre no es suficiente para arrancar un electrón del átomo, dejándolo sujeto a este, pero en una órbita superior (Figura 17.12). Cuando sucede esto último, los electrones tienden a volver a su órbita inicial, restituyendo, en forma de radiaciones electromagnéticas, la energía recibida en el choque (átomo excitado). Estas radiaciones son visibles en algunos gases.

En las lámparas fluorescentes se utiliza gas argón a baja presión y una pequeña cantidad de mercurio líquido que se evapora al entrar en funcionamiento el tubo. Como la radiación que emiten estas lámparas no es visible, se deposita en las paredes internas del tubo de descarga una capa de polvos fluorescentes que transforman dichas radiaciones en visibles.

© Ediciones Paraninfo

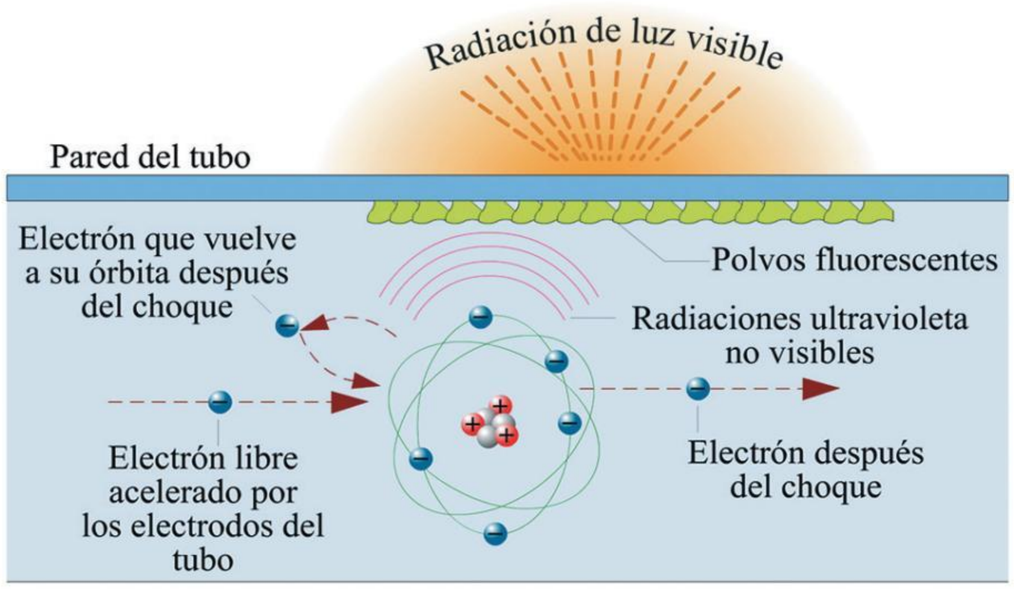


Figura 17.12. Efecto de luminiscencia en una lámpara fluorescente.

En la Figura 17.13 se muestra el aspecto de un tubo fluorescente al que se le ha añadido en cada uno de sus extremos un filamento incandescente para facilitar el proceso de arranque del tubo.

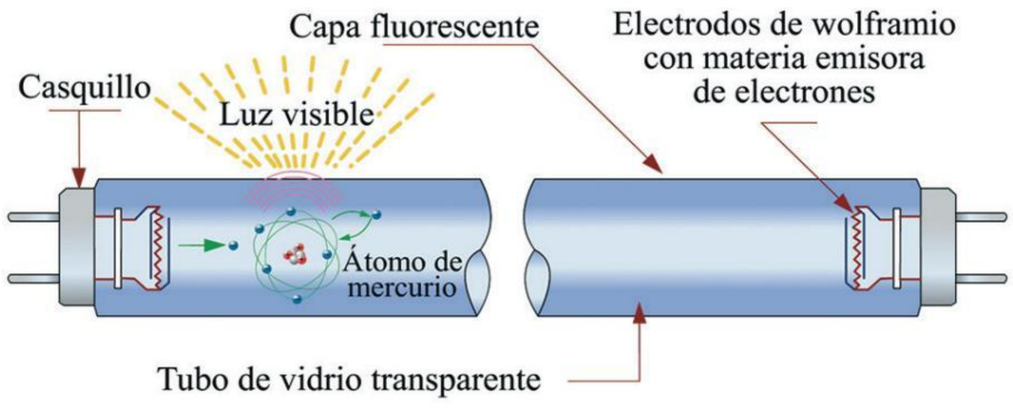


Figura 17.13. Tubo fluorescente.

Una de las características de los tubos fluorescentes es que no funcionan de forma espontánea cuando son conectados directamente a la red, por lo que es necesario equiparlos con un circuito de arranque (Figura 17.14). Este deberá cumplir las siguientes funciones:

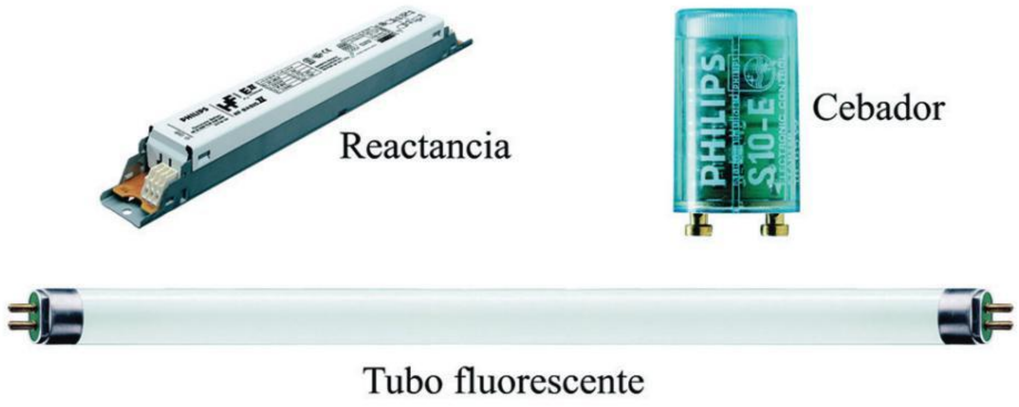


Figura 17.14. Equipo de arranque de un tubo fluorescente.

a) Nada más cerrar el interruptor de alimentación, el equipo debe proporcionar una tensión entre los electrodos mucho más elevada que la de la red, para que así pueda ionizarse, en un primer momento, la atmósfera de argón (hay que tener en cuenta que la separación que existe entre los electrodos de un tubo fluorescente viene a ser del orden de 1,5 m y que, por tanto, la resistencia de este es muy elevada al principio).

b) Una vez que el tubo se ha encendido y el mercurio se ha vaporizado, la atmósfera del vapor metálico se hace muy conductora, lo que provoca una avalancha de electrones que hay que limitar a un valor adecuado antes de que destruya el tubo.

En la Figura 17.15 se muestra el circuito de arranque de un tubo fluorescente.

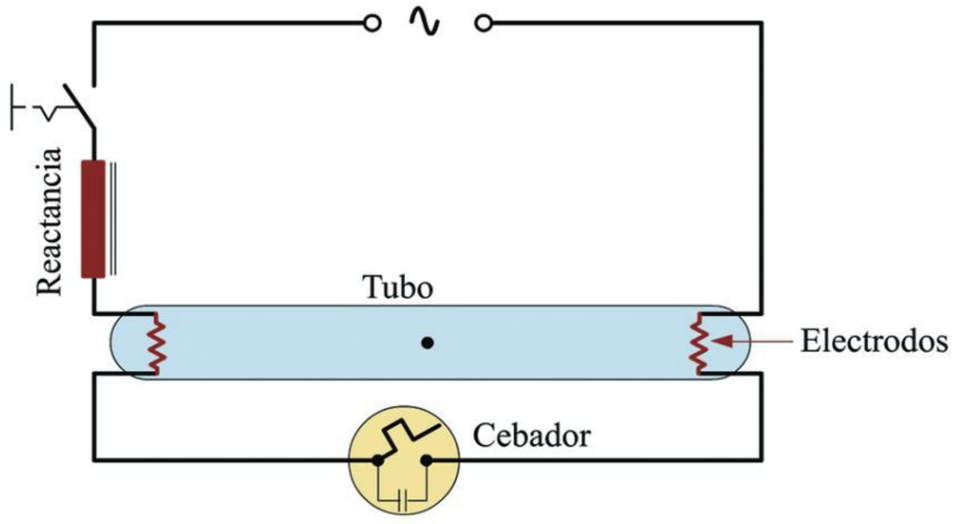


Figura 17.15. Circuito de arranque de una lámpara fluorescente.

Para conseguir una tensión elevada en el arranque se incorpora una bobina de alto coeficiente de autoinducción o reactancia, que se conecta en serie con el tubo de descarga. Cuando cerramos el interruptor, el cebador cierra sus contactos, permitiendo que los filamentos de los extremos calienten los electrodos de emisión (esto facilita la emisión electrónica). En muy poco tiempo, el cebador abre bruscamente sus contactos y provoca una fuerte f. e. m. de autoinducción en la bobina. Esta tensión queda aplicada a los extremos del tubo y es suficiente para que este se encienda. Una vez arrancado el tubo, el cebador mantiene sus contactos abiertos.

Al estar la reactancia conectada en serie con el tubo de descarga, esta produce una caída de tensión en el circuito que hace que la tensión y la corriente entre los extremos del tubo queden limitadas a valores adecuados para este.

¿Cómo funciona el cebador en el circuito? El cebador se compone de dos láminas, una de ellas bimetálica, situadas en el interior de una pequeña ampolla de vidrio llena de gas helio a baja presión (Figura 17.16).

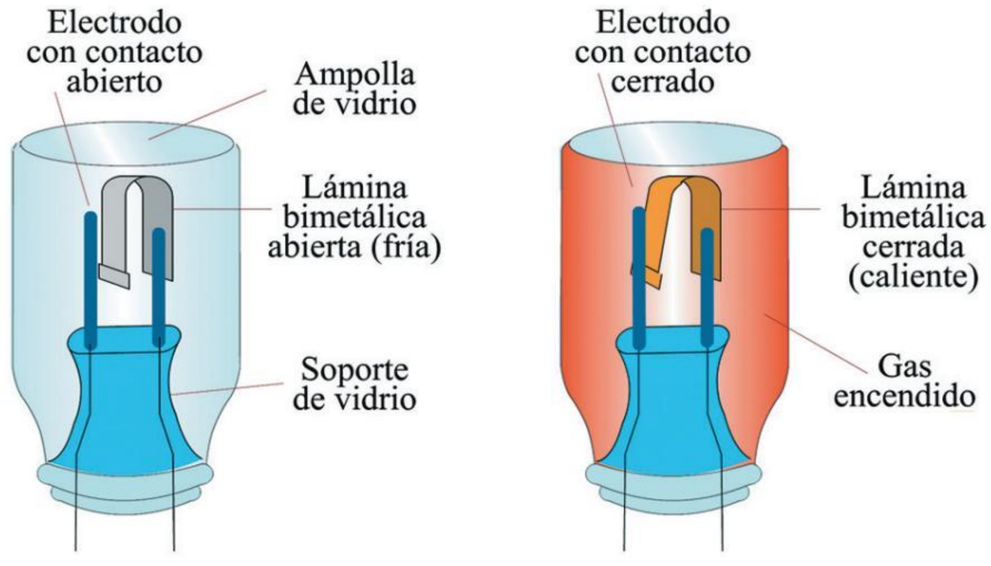


Figura 17.16. Cebador.

© Ediciones Paraninfo

Al cerrar el interruptor de alimentación, la tensión queda aplicada totalmente entre las dos láminas del cebador.

Como dichas láminas están muy próximas, se establece entre ellas, y a través del gas de relleno, un pequeño arco, el cual produce un aumento de la temperatura en el interior de la ampolla (el cebador lanza un destello luminoso). Esto hace que la lámina bimetálica se deforme hasta ponerse en contacto con la fija, cerrando con ello el circuito de caldeo. Como la corriente ya no circula a través del gas, sino que lo hace a través de los contactos del cebador, la lámina bimetálica se enfría y abre bruscamente el circuito, induciéndose una sobretensión en la reactancia, lo que determina el establecimiento de corriente por el interior del tubo de descarga y la consiguiente emisión de radiaciones luminosas. Una vez que el tubo se ha encendido, la reactancia produce una caída de tensión, por estar en serie con el circuito, lo que hace que la tensión existente entre las dos láminas del cebador sea insuficiente para hacerlo funcionar de nuevo.

Una de las grandes ventajas de las lámparas fluorescentes es su gran eficacia luminosa, del orden de 80 lm/W. En la Tabla 17.5 se indican algunas de las características más importantes de una gama comercial de lámparas fluorescentes.

Como se deduce de la Tabla 17.5, existen tubos fluorescentes en tres tonalidades básicas según sea su temperatura de color: blanco cálido, blanco frío o industrial, luz de día. De esta forma siempre existe una lámpara que se adecue a las necesidades específicas de cada aplicación.

Como se puede comprobar en la Tabla 17.5, según se aumenta la temperatura de color de los tubos fluorescentes se aumenta también su eficacia para reproducir los colores, aunque, eso sí, a costa de reducir la eficacia luminosa.

Otro aspecto destacable de este tipo de lámparas es que el flujo luminoso depende de la temperatura exterior, logrando la máxima efectividad a los 40 ºC. Para temperaturas por debajo de los 0 ºC el flujo luminoso puede descender hasta el 10 %, por lo que no se recomienda la instalación de tubos fluorescentes para iluminación de exteriores donde se prevea la aparición de heladas nocturnas.

La utilización de reactancias para el encendido de las lámparas fluorescentes produce un factor de potencia bajo (en torno a 0,6), que se corrige mediante un condensador de compensación, normalmente incorporado en el equipo de arranque.

Los tubos fluorescentes aumentan su eficacia luminosa hasta los 104 lm/W si se les aumenta la frecuencia de alimentación hasta los 28 kHz. En la actualidad, en sustitución de la reactancia y del cebador, se fabrican balastos electrónicos, como el que se muestra en el esquema de la Figura 17.17 que consiguen arrancar el tubo fluorescente de una forma instantánea y sin parpadeos gracias a las altas frecuencias que proporcionan. Además, es posible reducir el flujo luminoso de la lámpara con un simple potenciómetro.



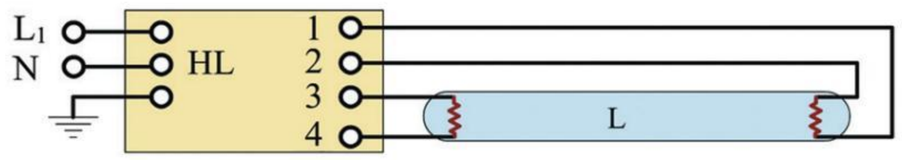


Figura 17.17. Circuito de arranque de una lámpara fluorescente con balasto electrónico.

Dada la buena eficacia luminosa de los tubos fluorescentes, su larga vida y sus variadas posibilidades de temperatura de color, estos se han convertido en una de las fuentes luminosas de más extendida aplicación para el alumbrado de interiores en los que las alturas de los techos no sean excesivas.

17.2.4. Lámparas fluorescentes compactas o de bajo consumo

Este tipo de lámparas se está popularizando mucho en sustitución de las lámparas incandescentes. Básicamente son lámparas fluorescentes con potencias entre 5 y 60 W que, por lo general, llevan incorporado el equipo de arranque y disponen de un casquillo E.27 para ser conectadas a los portalámparas clásicos de las incandescentes (Figura 17.18).

Algunas de estas lámparas incorporan equipo de arranque mediante balasto electrónico.

Existen algunos modelos que solo incorporan el cebador en su base, siendo necesaria una reactancia exterior para

Tabla 17.5. Características de lámparas fluorescentes

Potencial (W)	Longitud (mm)	Temperatura (color aprox.)	IRC	Flujo luminoso (lm)	Eficacia luminosa (lm/W)	Tono
40	1.200	3.000 K	55	3.200	80	Blanco cálido
40	1.200	4.000 K	66	3.200	80	Blanco fría
40	1.200	6.000 K	75	2.600	65	Luz día

© Ediciones Paraninfo

su funcionamiento. Este tipo de lámparas suelen poseer un conector de cuatro patillas, tal como se muestra en la Figura 17.18.



Figura 17.18. Lámparas fluorescentes compactas. (Cortesía de Philips.)

En la Figura 17.19 se expone una comparativa para sustituir una lámpara incandescente por una lámpara fluorescente compacta que produzca el mismo flujo luminoso.

	9 W 28 lm/W	11 W 36 lm/W	13 W 46 lm/W	17 W 28 lm/W
	25 W 10 lm/W	40 W 12 lm/W	60 W 13 lm/W	75 W 14 lm/W

Figura 17.19. Comparativa entre lámparas incandescentes y lámparas fluorescentes compactas.

Este tipo de lámparas posee una vida media de unas 6.000 horas; su temperatura de color está en torno a los 2.700 K, que se corresponde con el blanco cálido (muy similar a las incandescentes); su índice de reproducción cromático es alto, en torno a 85. Estas buenas características, unidas a la facilidad de montaje, hacen que estén sustituyendo paulatinamente a las lámparas incandescentes. El único inconveniente que presentan es su más alto precio.

17.2.5. Lámparas de vapor de mercurio de color corregido

En estas lámparas, la descarga se realiza a través de una atmósfera de vapor de mercurio. Para mejorar el índice de reproducción cromático de estas lámparas se recubre el interior de la ampolla con polvos fluorescentes de vandato de itrio (Figura 17.20). Las características más importantes de estas lámparas son las siguientes:

- Necesitan de un equipo de arranque.
- El rendimiento es de 40 a 60 lm/W.
- Vida útil entre 8.000 y 16.000 horas.
- Tiempo de encendido entre 4 y 5 minutos.
- IRC de 40 a 60.
- Potencias entre 50 y 2.000 W.
- Temperatura de color: 3.500/4.500 K.
- Tiempo de reencendido entre 3 y 6 minutos.

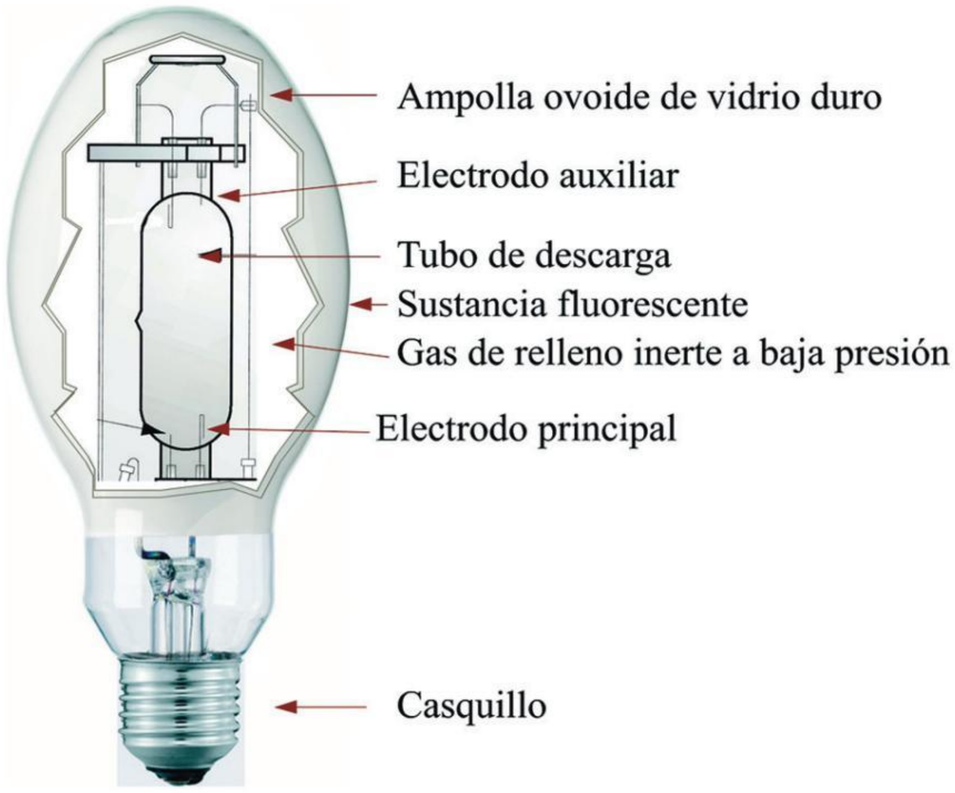


Figura 17.20. Lámpara de vapor de mercurio de color corregido.

Como se desprende de sus características, las lámparas de vapor de mercurio de color corregido consiguen una buena eficacia luminosa, una larga duración, una temperatura de color intermedia y un índice de reproducción cromático aceptable. Esto, unido a que se fabrican unidades de gran potencia, las hace adecuadas para iluminar grandes áreas como garajes, zonas de almacenaje, estaciones de servicio, aeropuertos, zonas deportivas, calles comerciales y carreteras, etcétera.

El encendido de estas lámparas se hace directamente con la tensión de red y con la ayuda del electrodo auxiliar, pero una vez encendida la lámpara es necesario limitar la tensión sobre ella, para lo que se suele utilizar una reactancia conectada en serie, tal como se muestra en la Figura 17.21. Para compensar el bajo factor de potencia ocasionado por esta reactancia se conecta un condensador en paralelo.

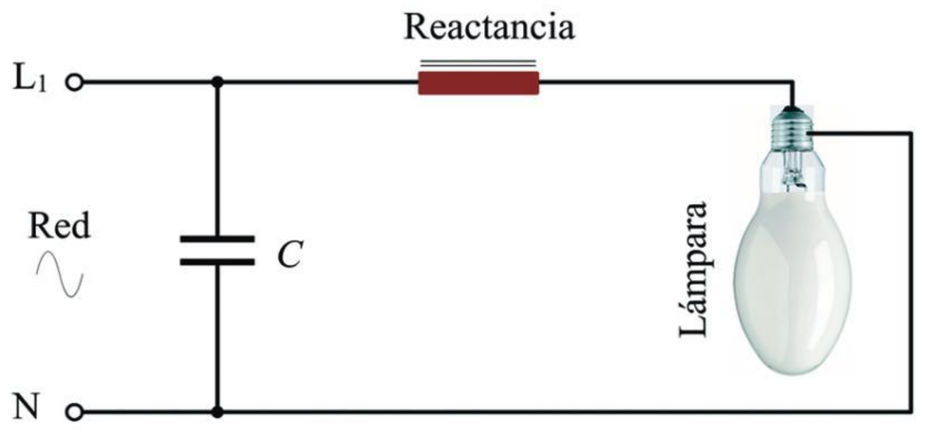


Figura 17.21. Esquema de conexiones para el encendido de una lámpara de vapor de mercurio de color corregido.

© Ediciones Paraninfo

17.2.6. Lámparas de vapor de mercurio con halogenuros metálicos

Estas lámparas son básicamente iguales que las anteriores en las que el vapor de mercurio está a alta presión; al introducir halogenuros metálicos en el interior del tubo se consigue una mayor eficacia luminosa (65 lm/W a 90 lm/W) y una fiel reproducción de los colores (IRC = 60 a 85), una buena temperatura de color (4.000 a 6.000 K) y una vida útil larga (6.000 a 10.000 horas).

En la Figura 17.22 se muestra el aspecto y constitución de una lámpara de vapor de mercurio con halogenuros metálicos, donde se observan los dos tipos de ampollas exteriores con que se suelen fabricar, bien cilíndrica u ovoide satinada.

Se fabrican en potencias que van de 250 a 5.000 W y de diferentes apariencias de color. Además se adaptan muy bien a sistemas de proyección. Se utilizan para iluminar grandes áreas donde la calidad de reproducción de los colores sea importante: exposiciones, retransmisiones deportivas para TV, hipódromos, parques, monumentos, etcétera.

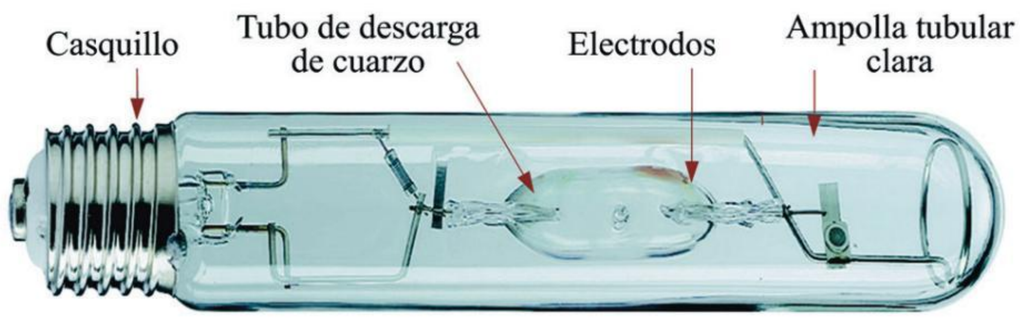


Figura 17.22. Lámpara de vapor de mercurio con halogenuros metálicos. (Cortesía de Philips.)

Antes de montar estas lámparas es importante observar las indicaciones que dan los fabricantes en cuanto a las posibles posiciones de funcionamiento, ya que estas quedan limitadas por la acción que ejerce la gravedad sobre los componentes halogenados.

El encendido de estas lámparas es lento (entre 3 y 10 minutos), al igual que el reencendido. Para el funcionamiento de este tipo de lámparas es necesaria la aplicación de tensiones de encendido muy elevadas (1,5 a 5 kV), para lo que se utilizan arrancadores especiales en combinación con reactancias de alto carácter inductivo, tal como se muestra en la Figura 17.23.

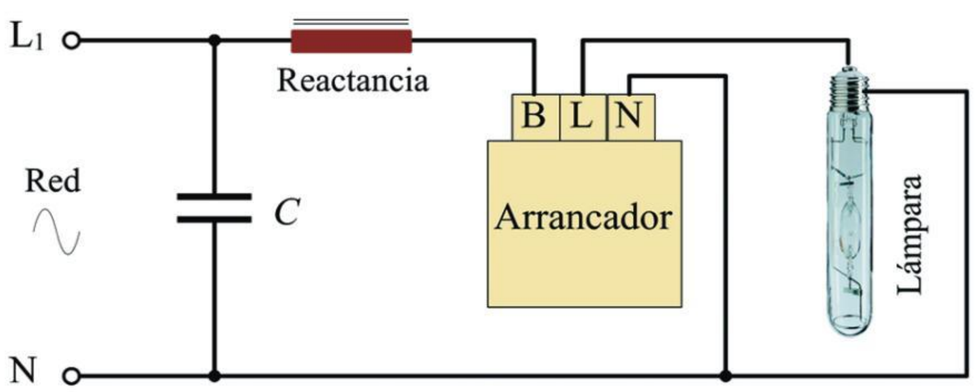


Figura 17.23. Esquema de conexiones para el encendido de una lámpara de vapor de mercurio con halogenuros metálicos.

17.2.7. Lámparas de vapor de sodio a alta presión

La descarga se realiza a través de vapor de sodio de alta presión (véase el aspecto de la lámpara en la Figura 17.24), con lo que se consigue aumentar bastante el rendimiento luminoso (60 a 130 lm/W).

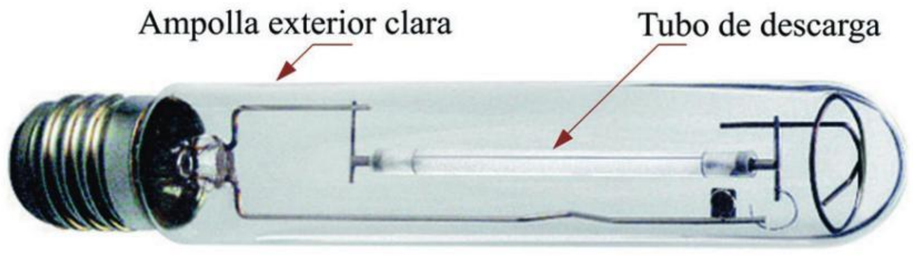


Figura 17.24. Lámpara de vapor de sodio a alta presión. (Cortesía de Philips.)

En un principio el índice de reproducción cromático que se conseguía con estas lámparas era muy bajo, del orden de 25, por lo que su uso quedaba limitado a zonas donde la reproducción de los colores no fuese importante, como autopistas, acerías, muelles marítimos, etc. Los nuevos desarrollos consiguen elevar el IRC entre 65 y 80, lo que, unido a su larga vida útil (12.000 horas), las hace ideales para la iluminación de alumbrado público, zonas peatonales, monumentos, paseos, etcétera.

El proceso de encendido de estas lámparas es muy similar al que precisan las lámparas de vapor de mercurio con halogenuros metálicos (véase el esquema de conexiones de la Figura 17.23). No obstante, hay que pensar que los esquemas de conexión pueden variar de una lámpara a otra (según modelo comercial, potencia, etc.), por lo que se recomienda ajustarse a las indicaciones que proporciona el fabricante en cada caso.

17.2.8. Lámparas de vapor de sodio a baja presión

Estas lámparas son básicamente iguales a las anteriores; al introducir vapor de sodio a baja presión en el interior del tubo se consigue una muy alta eficacia luminosa (100 lm/W a 200 lm/W)). A cambio, se consigue muy baja temperatura de color (1.800 K) y una muy mala reproducción de los colores (IRC es nulo). Se produce una emisión de luz amarilla monocromática que se corresponde con la máxima sensibilidad del ojo.

En la Figura 17.25 se muestra el aspecto tubular en forma de U de una lámpara de vapor de sodio a baja presión.

Se fabrican en potencias que van de 18 a 130 W y se utilizan para iluminar grandes áreas donde la calidad de reproducción de los colores no sea importante frente a la eficacia luminosa: autopistas, pasos subterráneos, puertos, etcétera.

Para el encendido de estas lámparas se requiere una tensión relativamente elevada (400-600 V), para lo que se

© Ediciones Paraninfo

puede utilizar un autotransformador o un arrancador electrónico como el de la Figura 17.23.

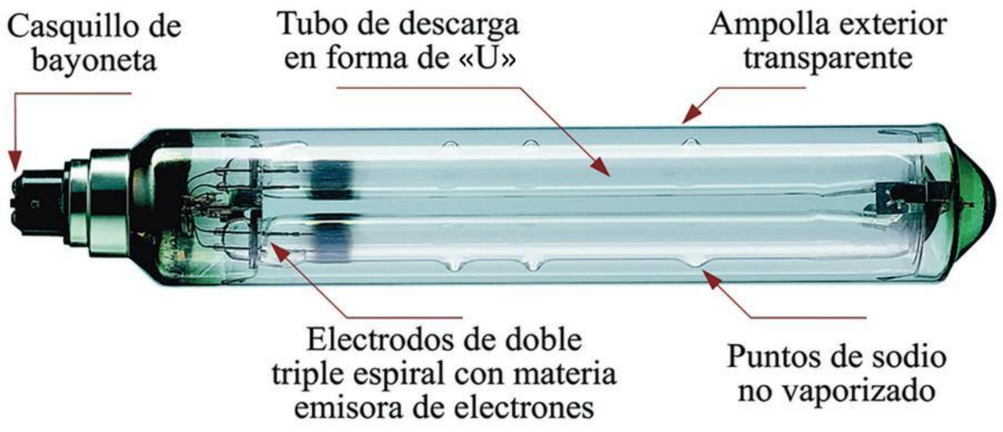


Figura 17.25. Lámpara de vapor de sodio a baja presión. (Cortesía de Philips.)

En la Figura 17.26, se muestra el esquema del circuito de conexión para el encendido de estas lámparas mediante autotransformador. Este proporciona un impulso de tensión inicial suficiente para el inicio de la descarga, para posteriormente limitar la corriente a valores aceptables para el funcionamiento de la lámpara.

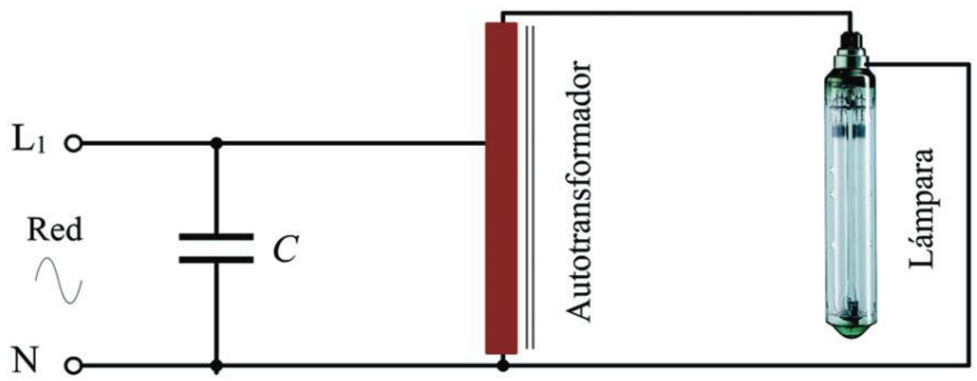


Figura 17.26. Esquema de conexiones para el encendido de una lámpara de vapor de sodio a baja presión mediante autotransformador.

17.2.9. Lámparas de descarga de gas a baja presión por inducción

Estas lámparas constan de un tubo con gas a baja presión donde se sustituyen los electrodos por una antena. Esta antena es alimentada por un generador externo de alta frecuencia (en torno a 250 kHz) con el fin de generar un campo electromagnético dentro del gas. Esto hace que aparezcan corrientes eléctricas por inducción electromagnética directamente en el gas que lo ioniza y produce su encendido (Figura 17.27).

La principal ventaja de estas lámparas frente a las convencionales con electrodos es su vida útil, que se encuentra en torno a las 60.000 horas. Se pueden utilizar como sistema de alumbrado general o especial con el fin de reducir el coste de mantenimiento, ya que se eliminan prácticamente los costes de la sustitución de lámparas, por lo que las hace ideales para instalaciones donde el mantenimiento sea difícil o costoso (iluminación de túneles, techos de naves industriales excesivamente altos y en general para zonas de difícil acceso de instalación).

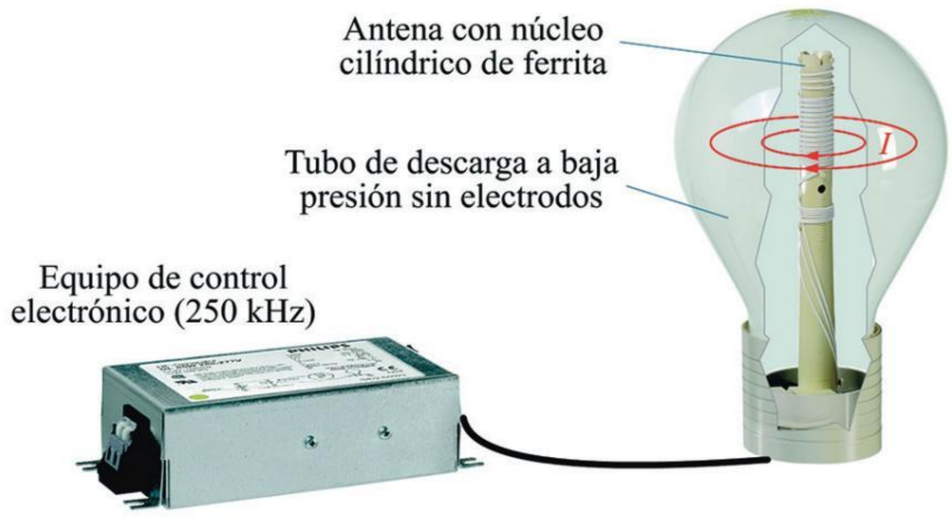


Figura 17.27. Lámpara de inducción. (Master QL de Philips.)

La luz que producen es blanca, de alta calidad y agradable, con alto confort visual, sin parpadeos ni destellos. Se fabrican en potencias de 55 a 165 W, un IRC de 80 y con una eficacia luminosa de 80 lm/W.

17.2.10. Lámparas led

Estas lámparas se construyen a base de múltiples diodos leds interconectados (diodos emisores de luz - *Light Emitting Diodes*). No poseen ni filamento ni gas, ni ampolla de vidrio. El led es un semiconductor unido a dos terminales cátodo y ánodo (negativo y positivo respectivamente) recubierto por una resina epoxi transparente. Cuando se hace circular una corriente continua por los terminales del led se produce luz gracias a un efecto llamado electroluminiscencia.



Figura 17.28. Lámparas led.

Dado que las agrupaciones de diodos led, interconectados en serie y paralelo, que constituyen una lámpara deben funcionar en C.C., es necesario añadir una pequeña fuente de alimentación en su interior que convierta la C.A. de la red en C.C. y que baje la tensión a un valor adecuado (Figura 17.29).

Los diodos led tienden a deteriorarse con el exceso de temperatura, por lo que se suele equipar las lámparas con disipadores y aletas de refrigeración.

© Ediciones Paraninfo



Figura 17.29. Constitución de una lámpara led.

Hoy en día, las lámparas led se utilizan para múltiples aplicaciones, tal como, iluminación doméstica, comercial, vías públicas, industrial, alumbrado decorativo, automoción, señalización vial, etcétera.

En función del material con el que se fabrica el chip-reflector es posible la fabricación de lámparas de todos los colores y con diferentes temperaturas de color.

Las lámparas led poseen una alta eficacia luminosa, superior a las fluorescentes y no producen parpadeos. Pueden llegar a alcanzar cuotas de 150 a 200 lm/W, frente a los 100 lm/W a las que puede rendir una lámpara fluorescente. Además producen muy poco calor, poseen una alta resistencia a los golpes y vibraciones, y una larga vida (de 50.000 a 100.000 horas).

17.3. Proyectos de alumbrado de interiores

Para llevar a cabo la iluminación de un determinado espacio habrá que tener en cuenta diferentes aspectos; el más importante de ellos es la actividad que se va a realizar en dicho espacio.

Una vez conocida la actividad y el lugar que se va a iluminar habrá que optar por alguno de los diferentes **sistemas de alumbrado,** así como la ubicación y tipo de lámpara y luminaria más adecuado para cada caso. Los sistemas de alumbrado que se pueden utilizar son:

- **Iluminación general:** este tipo de iluminación se consigue colocando las luminarias simétricamente en el techo. El resultado obtenido es una distribución uniforme de la luz en la zona a iluminar.
- **Iluminación localizada:** consiste en situar luminarias a poca distancia de la zona a iluminar, con lo que se consigue un alto nivel de iluminación en zonas de trabajo donde se requiere una gran precisión de operación.
- **Iluminación general localizada:** consiste en dotar a las áreas generales de paso de una iluminación general suficiente, añadiendo un sistema de iluminación localizado que concentre la luz sobre las áreas específicas de trabajo. De esta forma se consigue un ahorro considerable de energía.

Otro aspecto importante a tener en cuenta en el proyecto de alumbrado es el **deslumbramiento.** Este se traduce en una sensación molesta y desagradable que propicia la fatiga visual. El deslumbramiento aparece si las lámparas, luminarias, ventanas u otras superficies se muestran mucho más brillantes que la luminancia general interior.

Para reducir el deslumbramiento causado por las lámparas se puede optar por diferentes sistemas, algunos de los cuales apuntamos a continuación:

- Situando materiales traslúcidos alrededor de la lámpara, de tal forma que consigan difundir la luz.
- Situando las luminarias a una altura y orientación adecuadas.
- Utilizando pantallas que hagan que la lámpara quede prácticamente siempre oculta de la línea de visión. Este método se emplea sobre todo para controlar el deslumbramiento en las lámparas muy potentes y en aquellas luminarias que quedan suspendidas a una altura muy próxima a la zona de trabajo.

Otro aspecto importante a tener en cuenta es la elección del **tipo de lámpara** más adecuado en cada caso. Para ello tendremos en cuenta las características ya estudiadas, como: eficacia luminosa, índice de reproducción cromático, temperatura de color, flujo luminoso, vida media, etcétera.

Por lo general, las lámparas necesitan de un equipamiento adicional para realizar adecuadamente la tarea para la que han sido diseñadas. La **luminaria** es todo el conjunto de dispositivos que sirven de soporte a una o varias lámparas. En la luminaria se incluyen todos los accesorios para instalarla, así como pantallas, difusores, proyectores, etcétera.

Dependiendo de las necesidades del local a iluminar es posible añadir a las luminarias sistemas de difusión y transmisión de diferentes maneras. Según esto se pueden clasificar los sistemas de alumbrado según cómo el sistema de alumbrado distribuya la luz. Seguidamente indicamos los cuatro sistemas más relevantes (Figura 17.30):

- **Alumbrado directo:** todo el flujo luminoso se proyecta sobre el plano de trabajo, lo que hace que el techo y las paredes queden oscuros, pudiendo producirse deslumbramientos.

© Ediciones Paraninfo

- **Alumbrado semidirecto:** la mayor parte del flujo luminoso se dirige hacia el plano de trabajo y el resto se dirige hacia el techo y las paredes. En este caso se consigue un buen aprovechamiento de la luz, aunque todavía puede producirse algún deslumbramiento.
- **Alumbrado indirecto:** todo el flujo luminoso se proyecta sobre el techo, con lo que se reducen las sombras y los deslumbramientos. Con este sistema es necesario aumentar el flujo luminoso que emiten los aparatos de alumbrado para conseguir los mismos niveles de iluminación que con los anteriores sistemas citados.
- **Alumbrado semiindirecto:** la mayor parte del flujo luminoso se dirige hacia el techo y el resto se dirige hacia el plano de trabajo, con lo que se consigue eliminar las sombras y el deslumbramiento sin perder tanta efectividad como con el indirecto.

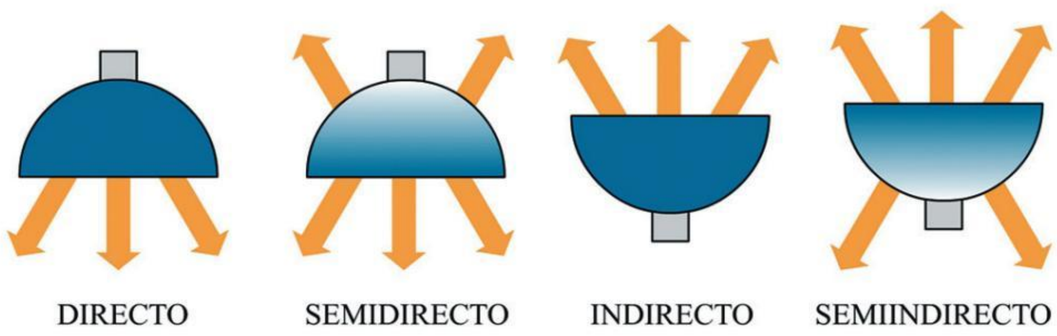


Figura 17.30. Sistemas de alumbrado.

A modo de ejemplo, expondremos un método sencillo de cálculo para el alumbrado de interiores.

El flujo útil total que se requiere para iluminar un local se obtiene mediante el producto del nivel de iluminación a alcanzar por la superficie del local:

$$\Phi_u = E \cdot S$$

Este sería el flujo que tendrían que emitir la totalidad de las lámparas en caso de que toda la luz emitida por ellas llegase al plano útil de trabajo. Sin embargo, existen diferentes factores que hacen que este flujo luminoso no produzca la iluminación deseada. De esta forma, para calcular el flujo total que deben emitir las lámparas habrá que tener en cuenta el rendimiento total de la iluminación η_i:

$$\Phi_T = \frac{\Phi_u}{\eta_i}$$

Para calcular este rendimiento total de la instalación es necesario consultar en tablas, donde este estará en función del tipo de alumbrado (directo, indirecto, semidirecto), de las dimensiones del local, del color de techos y paredes, de la altura de suspensión de las luminarias sobre el plano de trabajo y factores de depreciación (factores que influyen en la disminución del flujo efectivo de las lámparas, como el grado de ensuciamiento).

Una vez conocido el flujo luminoso total necesario y seleccionada la lámpara más adecuada para llevar a cabo la iluminación, se consultan las informaciones técnicas, proporcionadas por los fabricantes, el flujo emitido por lámpara Φ_L y mediante la siguiente expresión se calcula el número de lámparas a instalar:

$$n = \frac{\Phi_T}{\Phi_L}$$

Consulta en el REBT la Instrucción Técnica ITC-BT 44 sobre la instalación de receptores para alumbrado.

Actividad resuelta 17.3

Se desea iluminar una sala de dibujo de 16 metros de largo por 8 metros de ancho y 5 metros de alto. El color del techo y las paredes es claro. Determina el número de lámparas que se necesitan.

Solución:

Primero calculamos la superficie del local:

$$S = 16 \cdot 8 = 128 \text{ m}^2$$

Consultando en la Tabla 17.3 tenemos que para iluminar una sala de dibujo se recomiendan 750 lux, por lo que el flujo luminoso útil que se necesita para conseguir este nivel de iluminación será de:

$$\Phi_u = E \cdot S = 750 \cdot 128 = 96.000 \text{ lm}$$

El tipo de lámpara a utilizar que se considera más adecuada para este caso es la fluorescente. Dado que se requiere alcanzar un alto nivel de iluminación se utilizarán 2 tubos fluorescentes de 65 W de color blanco normal montados en una luminaria, a la que se dotará de pantalla difusora de plástico para evitar deslumbramientos.

Para este tipo de aparato de alumbrado y según las dimensiones del local y el color de techos y paredes se viene a recomendar un rendimiento de iluminación de 0,5, por lo que el flujo luminoso total que deben aportar las lámparas es de:

$$\Phi_T = \frac{\Phi_u}{\eta_i} = \frac{96.000}{0{,}5} = 192.000 \text{ lm}$$

Consultando en las especificaciones técnicas de la lámpara a utilizar comprobamos que emite un flujo luminoso de 5.000 lm, por lo que el número de lámparas a utilizar es de:

$$n = \frac{\Phi_u}{\Phi_L} = \frac{192.000}{5.000} = 38 \text{ lámparas}$$

© Ediciones Paraninfo

Dado que cada aparato de alumbrado va equipado con 2 lámparas, el número necesario de aparatos es:

$$\text{Número de aparatos de alumbrado} = \frac{38}{2} = 19$$

En la solución definitiva utilizaremos 20 aparatos de alumbrado para que el reparto de estos en el techo sea uniforme.

17.3.1. Programas informáticos para el cálculo del alumbrado

En la actualidad, el proceso de cálculo y dimensionado de un proyecto de iluminación se lleva a cabo con programas informáticos, que son capaces de realizar los cálculos y el diseño de forma mucho más rápida y precisa. Actualmente, algunos de los programas para hacer cálculos de iluminación son:

- Calculux.
- Dialux.
- OxyTech.
- Relux.
- Litestar.
- Ecos.
- Lxwin.
- Mura2.

Para el manejo de estos programas es necesario introducir en su sistema los datos específicos de la instalación, que dependiendo del programa, pueden ser:

- Dimensiones del local a iluminar.
- Altura del plano de trabajo.
- Nivel de iluminación media.
- Elección del tipo de lámpara.
- Elección del tipo de luminaria y su altura de suspensión.
- Determinar el coeficiente de utilización de luminarias.
- Configuración de las características de cada uno de los elementos (paredes, suelo, etc.).
- Grado de reflexión, transparencia y rugosidad.
- Determinar el coeficiente de mantenimiento según el tipo de local.

Con toda esta información el programa calcula el número de luminarias, el emplazamiento y la distribución de las mismas y comprueba los resultados.

Estos programas nos ayudan a realizar y obtener una mejor relación de gasto energético-contaminación-salud. De esta forma se consiguen obtener instalaciones más eficientes y que eviten el deslumbramiento producido sobre observadores colocados en distintas posiciones.

Actividad propuesta 17.1

Busca en internet algunos de los programas para el cálculo de alumbrado y, siguiendo las instrucciones propias del programa, intenta resolver la Actividad resuelta 17.3, o algún proyecto de iluminación más ambicioso que tú mismo propongas.

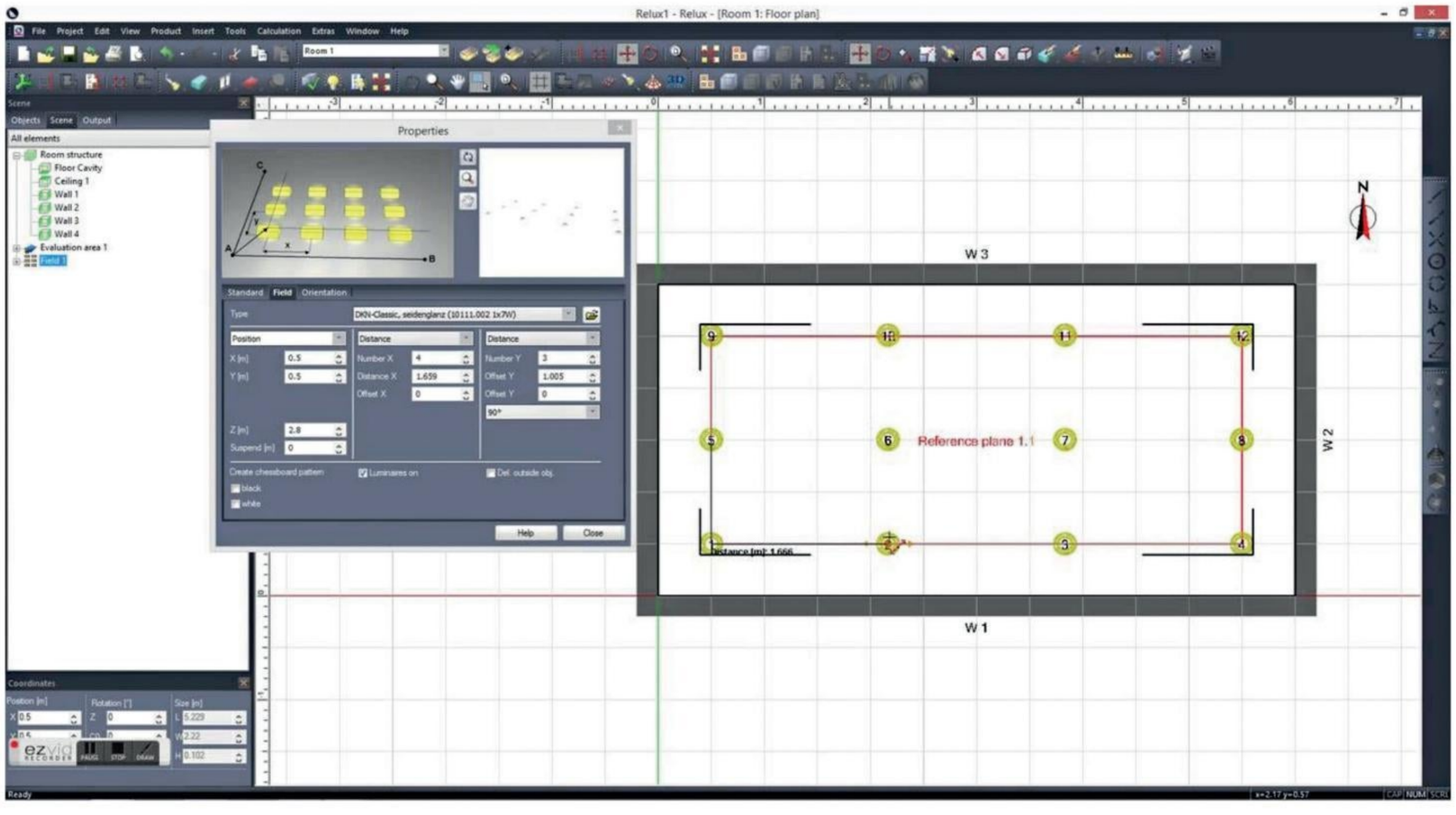


Figura 17.31. Programa de cálculo de iluminación Relux.

© Ediciones Paraninfo

Comprobación práctica en el laboratorio

17.1. Análisis de diferentes tipos de lámparas. Consigue diferentes lámparas comerciales, así como las informaciones técnicas que proporcionan los fabricantes y estudia sus características. Seguidamente realiza el montaje para el encendido de tubos fluorescentes, lámparas de vapor de mercurio y de vapor de sodio siguiendo las indicaciones que facilitan los fabricantes. Utiliza el polímetro para medir las diferentes magnitudes eléctricas que se dan en las distintas partes de los circuitos de encendido de las lámparas de descarga.

Analiza y compara las características de las diferentes lámparas estudiadas, para seguidamente confeccionar un cuadro resumen donde aparezcan, por un lado, los tipos de lámparas y, por otro, sus características más relevantes, tales como gama de potencias, eficacia luminosa, IRC, temperatura de color, vida útil y alguna otra más que consideres interesante.

Como en otras ocasiones, al finalizar esta actividad deberás elaborar un informe-memoria sobre la actividad desarrollada, indicando los resultados obtenidos y estructurándolos en los apartados necesarios para una adecuada documentación de las mismas (descripción del proceso seguido, medios utilizados, esquemas y planos utilizados, cálculos, medidas, etc.).

© Ediciones Paraninfo

Actividades de comprobación

17.1. ¿Qué lámpara produce más flujo luminoso?

a) Incandescente de 60 W.

b) Fluorescente de 40 W.

17.2. El flujo luminoso se mide en:

a) Lux.

b) Lumen.

c) Candela.

17.3. Un índice de reproducción cromático de 100 indica que la luz proporcionada por la fuente luminosa:

a) Es de un tono anaranjado.

b) Reproduce muy mal los colores.

c) Reproduce perfectamente los colores.

17.4. Una temperatura de color elevada indica que la luz proporcionada por la fuente luminosa:

a) Es de un tono muy cálido y anaranjado.

b) Es de un tono frío y blanquecino.

c) Reproduce muy mal los colores.

17.5. Las lámparas de descarga en un gas:

a) Funcionan gracias a la alta temperatura que se da en el gas.

b) Funcionan gracias al efecto de la luminiscencia.

c) Poseen un índice de reproducción cromático superior a las incandescentes.

17.6. Las lámparas incandescentes poseen:

a) Un bajo IRC.

b) Una alta eficacia luminosa.

c) Una vida corta.

17.7. Las lámparas incandescentes halógenas:

a) Poseen una vida más larga que las incandescentes.

b) Funcionan gracias al fenómeno de la luminiscencia.

c) Proporcionan un IRC muy bajo.

17.8. Las lámparas fluorescentes:

a) Mejoran su eficacia luminosa al aumentar la frecuencia.

b) Poseen un IRC más elevado que las incandescentes.

c) Se fabrican de potencias elevadas.

17.9. Las lámparas de vapor de mercurio de color corregido:

a) Su tiempo de encendido es largo.

b) No necesitan de equipo de arranque.

c) Su IRC es muy alto.

17.10. Las lámparas de vapor de mercurio con halogenuros metálicos:

a) Su vida útil es baja.

b) Desarrollan una eficacia luminosa baja.

c) Necesitan de un equipo especial para su encendido.

17.11. Las lámparas de vapor de sodio a baja presión poseen:

a) Una eficacia luminosa elevada.

b) Un IRC elevado.

c) Una temperatura de color elevada.

17.12. Una lámpara fluorescente de 40 W (blanco industrial) produce un flujo luminoso de 2.500 lm, mientras que una incandescente de la misma potencia produce 500 lm. Determina la eficacia luminosa de ambas lámparas.

17.13. Calcula el nivel de iluminación medio de un local de 20 m de largo por 10 de ancho si la superficie de trabajo recibe un flujo luminoso de 50.000 lm.

17.14. Determina el flujo que ha de recibir un pasillo de 50 m de largo por 2 m de ancho si se desea obtener un nivel de iluminación de 200 lux.

17.15. Se trata de iluminar una oficina de 8 m de largo por 6 m de ancho. Se desea conseguir un nivel de iluminación de 300 lux mediante tubos fluorescentes de 40 W. Las paredes y el techo son de color claro. Teniendo en cuenta un rendimiento de iluminación de 0,35 y que cada tubo fluorescente emite un flujo de 2.500 lm, calcula el número total de lámparas necesarias.

© Ediciones Paraninfo

18 El transformador

Contenidos

- **18.1.** El transformador monofásico
- **18.2.** Autotransformadores
- **18.3.** Transformadores trifásicos
- **18.4.** Ensayos para transformadores monofásicos y trifásicos

El transformador se puede considerar como una máquina eléctrica estática (sin movimiento) que es capaz de cambiar los valores de tensión y corriente sin alterar la frecuencia ni la potencia de forma significativa.

Una de las principales razones por las que se emplea la corriente alterna y no la corriente continua en la producción, transporte, distribución y consumo de la electricidad es que se puede elevar fácilmente este tipo de corriente y reducir su tensión mediante el transformador.

Gracias a los transformadores se puede aumentar la tensión antes de transportar la energía a grandes distancias por las líneas de alta tensión, con el fin de reducir la intensidad y con ella las pérdidas que se dan en los conductores por efecto Joule. Con ellos también se puede reducir la tensión, con el fin de poder distribuirla y consumirla en las industrias y viviendas, a valores que sean seguros para las personas que manipulan los sistemas eléctricos.

Objetivos

- Describir el funcionamiento del transformador.
- Seleccionar las características de un transformador para una determinada aplicación práctica.
- Analizar el funcionamiento de un transformador en vacío, en carga y en cortocircuito.
- Determinar el rendimiento de un transformador.
- Describir los tipos de ensayos fundamentales y normalizados que se deben realizar con transformadores, identificando las magnitudes que se deben medir y explicando las curvas características que relacionan dichas magnitudes.

18.1. El transformador monofásico

Un transformador monofásico posee dos bobinados, uno primario y otro secundario, que se arrollan sobre un núcleo magnético común, formado por chapas magnéticas apiladas (Figura 18.1). Por el bobinado primario se conecta la tensión de entrada y por el bobinado secundario obtenemos la tensión de salida. El mismo transformador puede funcionar como elevador o reductor. Así, por ejemplo, con un transformador de 400/230 V, si conectamos el bobinado de 400 V a una red de la misma tensión, obtendremos en el otro bobinado una tensión de salida de 230 V (transformador reductor); a la inversa, si conectamos el bobinado de 230 V a una red de la misma tensión, obtendremos en el otro bobinado una tensión de salida de 400 V (transformador elevador).

N_1 = N.º de espiras del primario.
N_2 = N.º de espiras del secundario.
U_1 = Tensión del primario.
U_2 = Tensión del secundario.

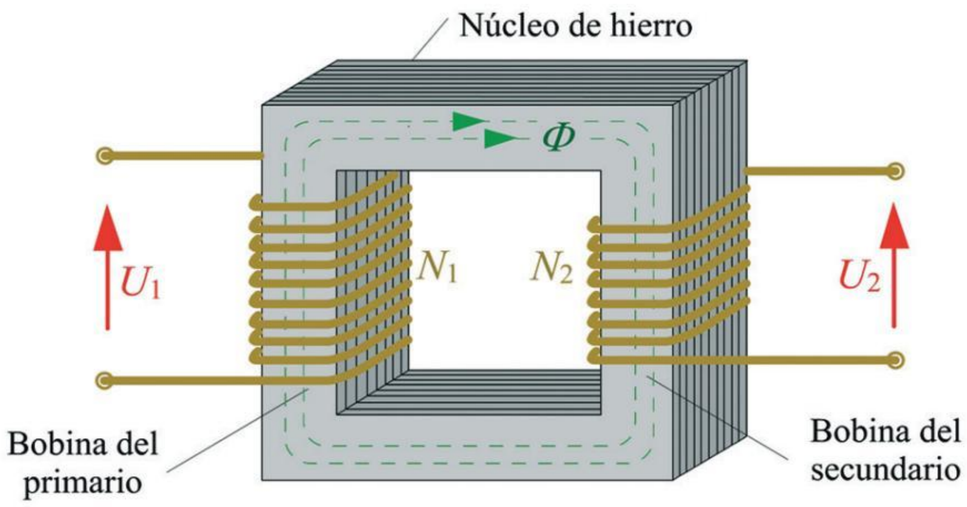


Figura 18.1. Transformador elemental.

¿Cómo consigue cambiar la tensión un transformador? Si observas la Figura 18.1, podrás comprobar que no existe conexión eléctrica entre el bobinado primario y el secundario. ¿Por dónde pasa entonces la energía eléctrica de un bobinado a otro? Estos fenómenos se pueden explicar gracias a la inducción electromagnética.

Al conectar el bobinado primario, de N_1 espiras, a una tensión alterna senoidal U_1, aparece una pequeña corriente por dicho bobinado que produce en el núcleo magnético un flujo variable (J) también de carácter senoidal. Este flujo variable se cierra por todo el núcleo magnético y corta los conductores del bobinado secundario, por lo que se induce una fuerza electromotriz en el secundario que dependerá del número de espiras de este.

De esta forma, la transferencia de energía eléctrica se hace a través del campo magnético variable que aparece en el núcleo del transformador, no siendo necesaria la conexión eléctrica entre ambos bobinados, por lo que se puede decir que un transformador aísla eléctricamente el circuito del primario del secundario (la bobina del primario convierte la energía eléctrica en energía en forma de campo magnético variable; la bobina del secundario se comporta como un generador y transforma dicho campo variable otra vez en energía eléctrica gracias a la inducción electromagnética).

En el caso de que el número de espiras del primario N_1 fuese igual al del secundario N_2, la tensión U_2, que se induce en el secundario, sería aproximadamente igual a la aplicada al primario U_1. Hay que pensar que el flujo que se produce en el primario es proporcional a la tensión aplicada a la bobina y al número de espiras de esta. Por otro lado, la tensión que se induce en el secundario es proporcional al flujo común y al número de espiras del secundario. Si el número de espiras es igual, la tensión que se induce en el secundario es igual que la administrada por el primario.

En el caso de que el número de espiras del secundario sea mayor que el del primario, la tensión del secundario también será mayor. Volviendo al mismo razonamiento, para un mismo flujo común, en cada una de las espiras del secundario se induce una cierta tensión, por lo que, cuantas más espiras tenga este bobinado, más tensión aparecerá en él. El mismo razonamiento se puede hacer para un transformador reductor. En general, se cumple con gran aproximación que:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = m \text{ (relación de transformación)}$$

Por lo general, los transformadores monofásicos comerciales presentan la disposición que se aprecia en la Figura 18.2. El núcleo de hierro posee la forma de ventana y está constituido por numerosas chapas magnéticas de pequeño espesor, apiladas unas sobre otras y aisladas entre sí mediante un barniz. Esta disposición reduce considerablemente las pérdidas que aparecen en el hierro por efecto de las corrientes parásitas.

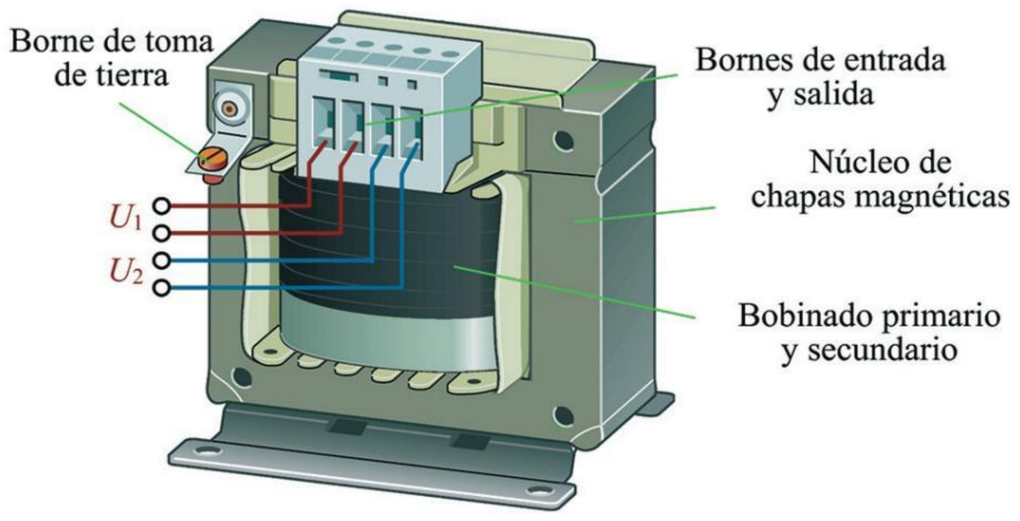


Figura 18.2. Constitución de un transformador monofásico.

Para formar el paquete de chapas se utilizan tornillos o remaches, procurando que estos queden aislados eléctricamente de las chapas. Además, se tratan adecuadamente las superficies exteriores del núcleo para evitar la corrosión (Figura 18.3).

© Ediciones Paraninfo

Los dos bobinados aparecen arrollados sobre un carrete que abraza la columna central del núcleo. De esta forma, se consigue que el flujo creado por el primario abrace mejor al secundario, con lo que se reducen considerablemente los flujos de dispersión. El conductor que se utiliza para las bobinas suele ser de cobre aislado mediante un barniz. Las diferentes capas de los bobinados se aíslan eléctricamente mediante papeles especiales, y la separación entre el bobinado primario y el secundario se aísla mediante tejidos engrasados.

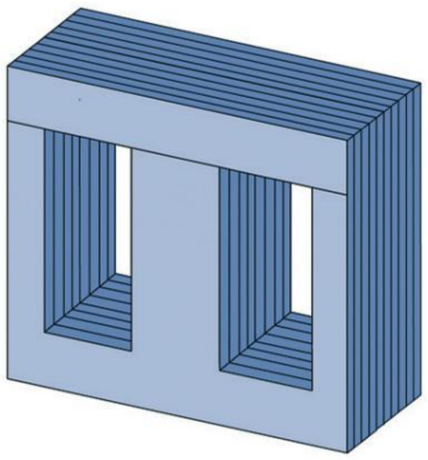


Figura 18.3. Núcleo de hierro de un transformador monofásico.

18.1.1. Funcionamiento de un transformador ideal

Con la idea de hacer más sencillo el estudio del transformador, comenzaremos considerando que este es ideal, por lo que no tendremos en cuenta las pérdidas que se puedan dar tanto en los circuitos eléctricos (efecto Joule) como en los magnéticos (corrientes parásitas, histéresis, dispersión de flujos).

Actividad experimental 18.1

Conecta a una red de 230 V el primario de un transformador monofásico de 230/110 V y mide la tensión en vacío en el primario y en el secundario. Con los datos obtenidos en el ensayo averigua la relación de transformación del transformador (Figura 18.4).

En estas condiciones conecta un amperímetro en el primario. ¿Cómo es la corriente en vacío por el primario? Ahora repite la misma actividad experimental conectando el secundario a una red de 110 V.

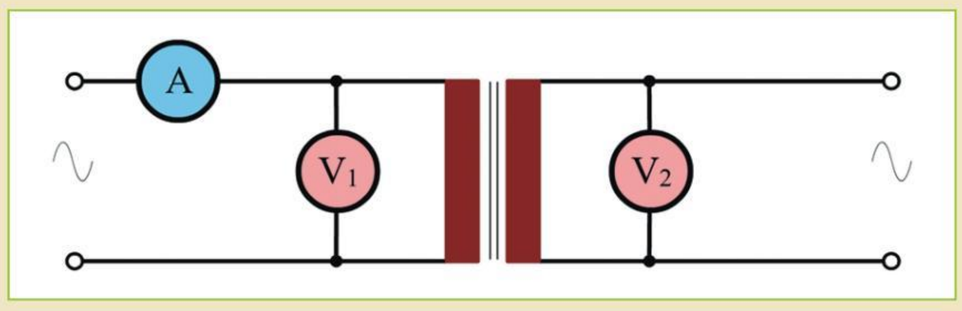


Figura 18.4.

Estando conectado el primario a la red eléctrica, conecta una lámpara incandescente al secundario y mide la corriente en el primario y en el secundario (Figura 18.5). ¿Qué relación hay entre ellas?

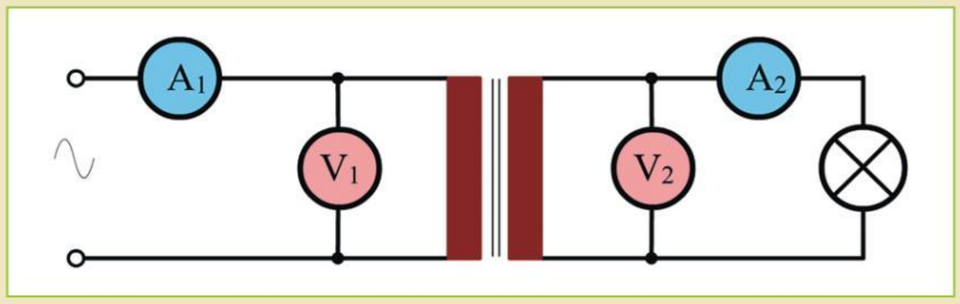


Figura 18.5.

En conclusión, en vacío, la corriente por el primario de un transformador es muy pequeña. Al conectar una carga al secundario, aparece una corriente por este que, a su vez, hace circular una corriente por el primario, cumpliéndose con una cierta aproximación que $U_1/U_2 = I_2/I_1 = m$.

Funcionamiento de un transformador ideal en vacío

Se conecta el primario a la red, mientras que el secundario no se conecta a carga alguna (Figura. 18.6). Por el primario aparece una corriente de vacío I_0, de carácter senoidal, que al recorrer los conductores de la bobina produce, a su vez, un flujo alterno senoidal común a ambos bobinados. Al cortar este flujo a la bobina primaria, se induce en ella, por efecto de autoinducción, una fuerza electromotriz en el primario E_1, cuyo valor instantáneo dependerá del número de espiras del primario y de lo rápido que varíe el flujo, es decir:

$$e_1 = N_1 \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

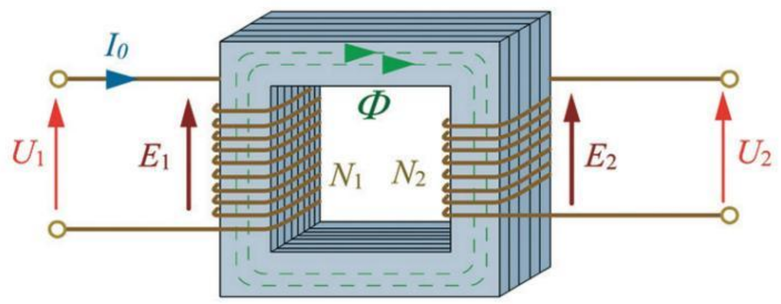


Figura 18.6. Transformador ideal en vacío.

Según la ley de Lenz, esta f. e. m. se opone en todo momento a la causa que la produce, es decir, a la tensión U_1 aplicada al primario. Como se supone que no hay ningún tipo de pérdidas, los valores instantáneos de U_1 y e_1 son iguales y de signos opuestos, tal como se muestra en el diagrama vectorial de la Figura 18.7.

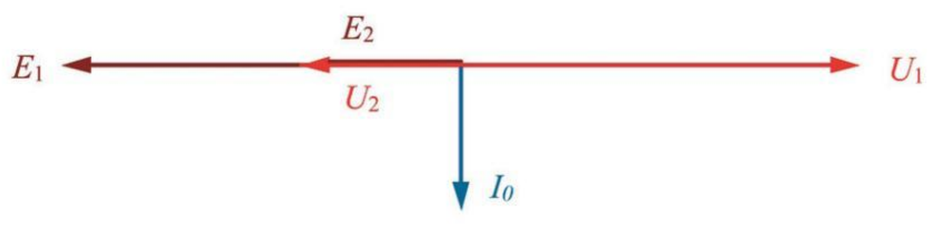


Figura 18.7. Diagrama vectorial de un transformador ideal en vacío.

© Ediciones Paraninfo

Partiendo de la expresión general de inducción electromagnética (ley de Faraday), para una corriente alterna senoidal, el valor eficaz de esta f. e. m. viene determinado por la expresión:

$$E_1 = 4{,}44\, f\, N_1 \Phi_{máx}$$

E_1 = f. e. m. eficaz inducida en el primario (V).
f = Frecuencia (Hz).
N_1 = Número de espiras del primario.
$\Phi_{máx}$ = Flujo máximo (Wb).

El bobinado secundario es cortado también por el flujo común engendrado por el primario, por lo que se generará en él una f. e. m., que tendrá por valor eficaz:

$$E_2 = 4{,}44\, f\, N_2 \Phi_{máx}$$

E_2 = f. e. m. eficaz inducida en el secundario (V).
N_2 = Número de espiras del secundario.

Si dividimos las dos expresiones de las fuerzas electromotrices eficaces, como la frecuencia y el flujo son comunes, obtendremos el siguiente resultado:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = m \text{ (relación de transformación)}$$

En definitiva, hemos podido comprobar que la f. e. m. inducida en ambos bobinados depende del número de espiras de estos. Dado que no existen pérdidas, los valores eficaces de las tensiones en el primario y en el secundario son iguales a sus respectivas f. e. m., cumpliéndose con aproximación que:

$$m = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2}$$

Actividad resuelta 18.1

En la fabricación de un transformador monofásico se han utilizado 750 espiras en el primario y 1.500 en el secundario. El flujo máximo que aparece en el núcleo magnético es de 3 mWb. Determina las tensiones en el primario y en el secundario para una frecuencia de 50 Hz, así como la relación de transformación.

Solución:

$E_1 = 4{,}44\, f\, N_1 \Phi_{máx} = 4{,}44 \cdot 50 \cdot 750 \cdot 0{,}003 = 499{,}5$ V

$E_2 = 4{,}44\, f\, N_2 \Phi_{máx} = 4{,}44 \cdot 50 \cdot 1.500 \cdot 0{,}003 = 999$ V

Lo cual nos indica que es un transformador elevador, siendo su relación de transformación:

$$m = \frac{N_1}{N_2} = \frac{750}{1.500} = 0{,}5$$

Actividad resuelta 18.2

Un transformador ideal con 500 espiras en el primario y 100 en el secundario se conecta a una red de C.A. de 1.900 V, 50 Hz. Averigua la relación de transformación y la tensión en el secundario.

Solución:

$$m = \frac{N_1}{N_2} = \frac{500}{100} = 5$$

Como el número de espiras del secundario es menor que en el primario, el transformador reducirá la tensión (en este caso 5 veces).

$$m = \frac{U_1}{U_2} \quad \Rightarrow \quad U_2 = \frac{U_1}{m} = \frac{1.900}{5} = 380 \text{ V}$$

Funcionamiento del transformador ideal en carga

Al conectar el secundario del transformador a una carga $Z \angle \varphi$, la f. e. m. E_2 hace que aparezca una corriente por la carga I_2, desfasada un ángulo φ de la misma (Figura 18.8).

En un principio podría parecer que la corriente I_2 al recorrer el bobinado secundario tendería a modificar el flujo común Φ generado por el primario, pero vamos a comprobar cómo esto no ocurre así.

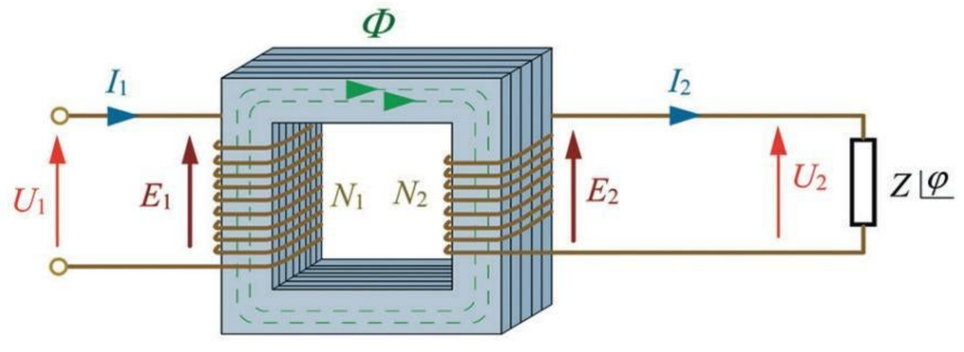


Figura 18.8. Transformador ideal en carga.

Cuando tratamos el funcionamiento en vacío se dijo que la f. e. m. del primario era de sentido opuesto e idealmente igual a la tensión aplicada (Figura 18.9), es decir:

$$U_1 = E_1 = 4{,}44\, f\, N_1 \Phi_{máx} \quad \Rightarrow \quad \Phi_{máx} = \frac{U_1}{4{,}44\, f\, N_1}$$

© Ediciones Paraninfo

Tanto la frecuencia como el número de espiras permanecen constantes, por lo que el valor del flujo común depende exclusivamente de la tensión que se aplique al primario.

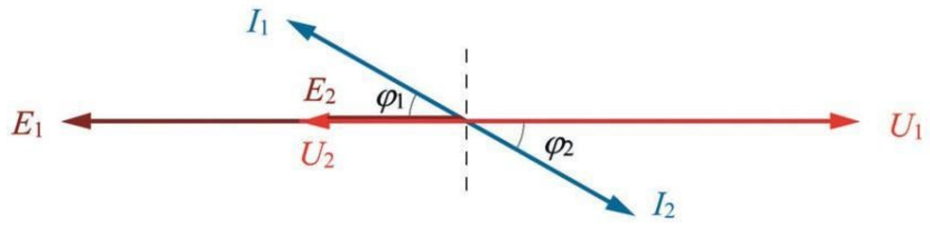


Figura 18.9. Diagrama vectorial del transformador ideal en carga.

En el transformador en carga, la intensidad I_2 produce una fuerza magnetomotriz secundaria ($N_2\ I_2$) que tiende a modificar el flujo común. Como acabamos de comprobar que dicho flujo permanece fijo con la tensión primaria, el primario se verá forzado a producir otra fuerza magnetomotriz de sentido contrario que equilibre la originada por el secundario. Para ello tendrá que circular una corriente extra por el primario, de tal forma que se cumpla la igualdad de dichas fuerzas magnetomotrices:

$$N_1\ I_1 = N_2\ I_2$$

Despejando, se cumple que:

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} = m = \frac{E_1}{E_2}$$

En conclusión, vemos que la relación de transformación de intensidades por el primario y por el secundario son inversas a las de las tensiones. Por supuesto que para que esto se cumpla hay que suponer que la corriente de vacío I_0 es despreciable (en un transformador real esta corriente no es superior al 5 % de la corriente a plena carga). De aquí también se puede extraer la siguiente relación:

$$E_1\ I_1 = E_2\ I_2$$

Expresión que nos indica que un transformador ideal, en el cual se supone que las pérdidas de potencia son nulas, la potencia transferida al secundario es igual que la tomada por el primario. De la misma forma, también podemos decir que las potencias activas, reactivas y aparentes absorbidas por el primario son iguales que las suministradas por el secundario:

$$U_1\ I_1 \cos \varphi_1 = U_2\ I_2 \cos \varphi_2$$
$$U_1\ I_1 \operatorname{sen} \varphi_1 = U_2\ I_2 \operatorname{sen} \varphi_2$$
$$U_1\ I_1 = U_2\ I_2$$

Actividad resuelta 18.3

Un transformador reductor de 230/110 V proporciona energía a una motobomba de 2 kW, 110 V, cos = 0,6. Suponiendo la corriente de vacío y las pérdidas despreciables, determina la intensidad por el primario y por el secundario, así como la relación de transformación del transformador. ¿Cuál es la potencia aparente que suministra el transformador?

Solución:

Calculamos primero la corriente por el secundario:

$$P = U_2\ I_2 \cos \varphi \quad \Rightarrow \quad I_2 = \frac{P}{U_2 \cos \varphi} = \frac{2.000}{110 \cdot 0{,}6} = 30{,}3\ \text{A}$$

La relación de transformación es:

$$m = \frac{U_1}{U_2} = \frac{230}{110} = 2{,}01$$

La corriente por el secundario la calculamos teniendo en cuenta la relación de transformación:

$$m = \frac{I_2}{I_1} \quad \Rightarrow \quad I_1 = \frac{I_2}{m} = \frac{30{,}3}{2{,}01} = 15{,}07\ \text{A}$$

La potencia aparente que suministra el transformador es:

$$S = U_2\ I_2 = 110 \cdot 30{,}3 = 3.333\ \text{VA}$$

Actividad resuelta 18.4

Una subestación de transformación es alimentada con una red trifásica a 45 kV y 50 Hz, reduciendo la tensión hasta 10 kV para su distribución. Para ello dispone de un transformador reductor de 45 kV/10 kV. Determina las intensidades de línea por el primario y por el secundario del transformador si la demanda de potencia es de 10 MVA.

Solución:

Para resolver este ejercicio nos valdremos de las expresiones de potencia aparente trifásica:

$$S = \sqrt{3}\ U_L\ I_L$$

La intensidad por el primario es:

$$I_{1L} = \frac{S}{\sqrt{3}\ U_{1L}} = \frac{10.000.000}{\sqrt{3} \cdot 45.000} = 128\ \text{A}$$

La intensidad por el secundario es:

$$I_{2L} = \frac{S}{\sqrt{3}\ U_{2L}} = \frac{10.000.000}{\sqrt{3} \cdot 10.000} = 577\ \text{A}$$

© Ediciones Paraninfo

Actividad resuelta 18.5

Se precisa de un pequeño transformador monofásico de 500 VA de potencia, con una relación de transformación de 230/12 V y una frecuencia de 50 Hz. La chapa magnética con la que se va a construir el núcleo posee una inducción máxima de 1,3 T. Considerando el transformador ideal, calcula el número de espiras por el primario y por el secundario. Calcula también la sección de los conductores por el primario y por el secundario si se admite una densidad de corriente de 4 A/mm^2.

Solución:

Para calcular el número de espiras necesitamos conocer primero el flujo magnético máximo por el núcleo. Conocemos la inducción magnética máxima pero no la sección del núcleo. Esta se puede calcular con aproximación mediante la siguiente expresión:

$$S_n = \sqrt{S} = \sqrt{500} = 22{,}4 \text{ cm}^2$$

El flujo máximo que se da en el núcleo para una inducción de 1,3 T es:

$$\Phi_{máx} = S_n B_{máx} = 22{,}4 \cdot 10^{-4} \cdot 1{,}3 = 0{,}0029 \text{ Wb}$$

Partiendo de la expresión de la fuerza electromotriz eficaz podemos calcular ya el número de espiras del primario y del secundario:

$$E_1 = U_1 = 4{,}44 \Phi_{máx} f N_1 \quad \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \quad N_1 = \frac{U_1}{4{,}44 \Phi_{máx} f} = \frac{230}{4{,}44 \cdot 0{,}0029 \cdot 50} = 357 \text{ espiras}$$

$$N_2 = \frac{U_2}{4{,}44 \Phi_{máx} f} = \frac{12}{4{,}44 \cdot 0{,}0029 \cdot 50} = 19 \text{ espiras}$$

Para determinar las secciones de los conductores de ambos bobinados calcularemos primero las intensidades nominales por los mismos:

$$I_1 = \frac{S}{U_1} = \frac{500}{230} = 2{,}2 \text{ A}$$

$$I_2 = \frac{S}{U_2} = \frac{500}{12} = 41{,}7 \text{ A}$$

La sección de los conductores la calculamos una vez que conocemos que la densidad que admiten los conductores que se van a emplear para los bobinados es de 4 A/mm^2:

$$S_1 = \frac{2{,}2 \text{ A}}{4} = 0{,}6 \text{ mm}^2 \qquad S_2 = \frac{41{,}7 \text{ A}}{4} = 10{,}4 \text{ mm}^2$$

18.1.2. Transformador real

Actividad experimental 18.2

Conecta un transformador de 230/110 V a una red de 230 V y mide la tensión por el secundario en vacío. A continuación, conecta una lámpara incandescente a la salida del transformador y mide la tensión en el secundario. Seguidamente, ir conectando más lámparas en paralelo, con el fin de aumentar la potencia en la carga, en secundario del transformador, e ir comprobando la tensión de salida.

Se podrá comprobar que la tensión que proporciona el transformador a su salida disminuye al ir aumentando la carga. Esto es debido a que al conectar una carga en el secundario aparece una corriente por este bobinado y, a su vez, aumenta la corriente por el primario. Estas corrientes producen caídas de tensión en las resistencias y reactancias inductivas de ambos bobinados. También se puede comprobar que la temperatura del transformador aumenta con la carga, debido al aumento de las pérdidas.

Para hacer el estudio del transformador real hay que tener en cuenta los siguientes aspectos:

a) Tanto el bobinado primario como el secundario poseen una cierta resistencia óhmica, R_1 y R_2, que habrá que tener en cuenta, ya que provocarán una cierta caída de tensión y una pérdida de potencia por efecto Joule cuando circule corriente por ambos bobinados (Figura 18.10).

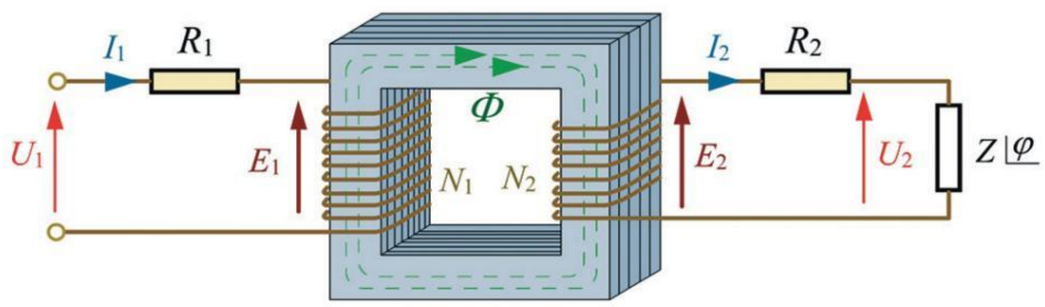


Figura 18.10. Resistencias óhmicas de los devanados en un transformador real.

b) El núcleo del transformador está constituido por chapas magnéticas de alta permeabilidad, bajo campo coercitivo y baja resistencia óhmica, con el fin de reducir las pérdidas en los circuitos magnéticos, debidas sobre todo a la histéresis y las corrientes parásitas o de Foucault. A pesar de ello, todavía persisten estos fenómenos, aunque no en gran medida, que hacen que la potencia transferida al secundario del transformador no sea exactamente la misma que la absorbida por el mismo de la red.

c) El flujo no es del todo común, ya que este tiende a dispersarse por el propio chasis del transformador e incluso por el aire, lo que hace que dicho flujo de

© Ediciones Paraninfo

dispersión solo atraviese los propios bobinados que lo han producido (Φ_{d1} lo produce N_1, y Φ_{d2} lo produce N_2) (Figura 18.11). Esto origina a su vez una f. e. m. de autoinducción en cada uno de los bobinados, que se puede sustituir con bastante aproximación por bobinas ficticias en serie con el primario y el secundario de reactancias X_{d1} y X_{d2}.

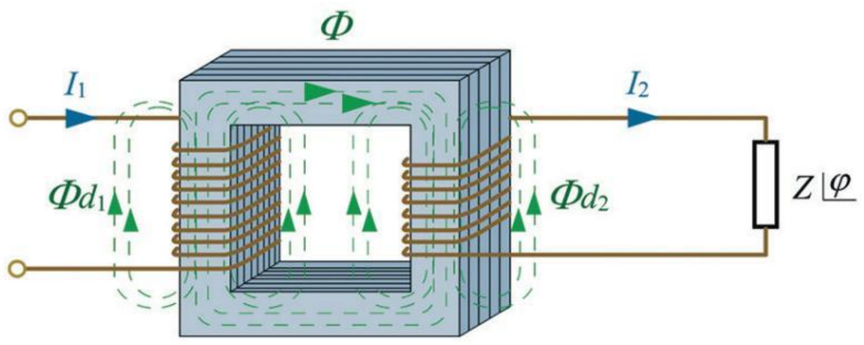


Figura 18.11. Flujo de dispersión en un transformador real.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, el circuito equivalente podría quedar tal como se indica en la Figura 18.12.

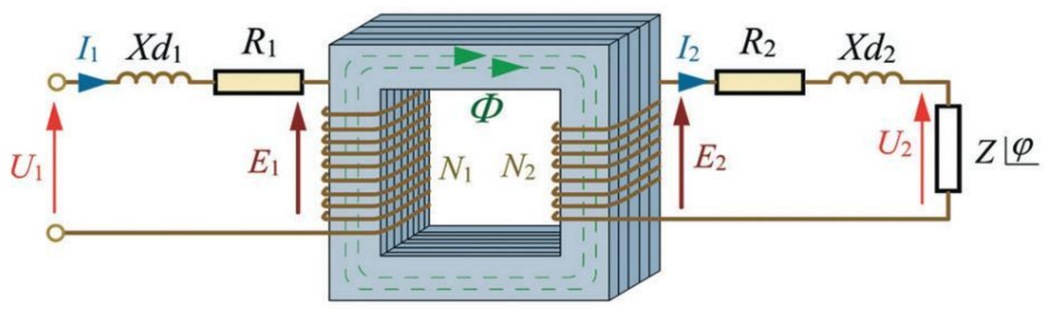


Figura 18.12. Circuito equivalente de un transformador real.

R_1 = Resistencia del primario.

R_2 = Resistencia del secundario.

X_{d1} = Reactancia de dispersión del primario.

X_{d2} = Reactancia de dispersión del secundario.

Transformador real en vacío

Al conectar el primario a una tensión de red U_1 aparece una corriente de vacío I_0, que es la encargada de producir el flujo magnético común del transformador. El bobinado primario se comporta como si fuese una inductancia, y la pequeña corriente de vacío que aparece depende fundamentalmente de la tensión aplicada a dicho bobinado. En la Tabla 18.1, que se expone más adelante, se puede comprobar el valor de la corriente de vacío de diferentes transformadores.

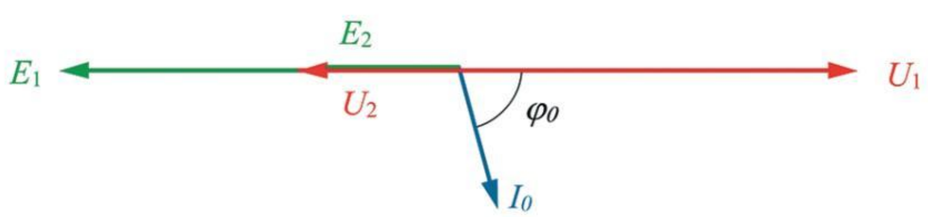


Figura 18.13. Diagrama vectorial del transformador real en vacío.

¿Qué ocurre si conectamos el primario de un transformador de relación 230/110 V a una tensión de 400 V?

Dado que el transformador es reductor, con una relación de transformación igual a $m = 230/110 = 2{,}01$, en un principio cabría esperar una tensión por el secundario igual a 400/2,01 = 199 V. En la práctica esto no se cumple. Además se aprecia un considerable aumento de la corriente de vacío y de la temperatura en el transformador, que puede llegar a destruirlo.

La razón de este comportamiento hay que buscarla en el hecho de que cuando aumentamos la tensión aplicada al primario, el flujo magnético tiende también a aumentar. Dado que el núcleo magnético se dimensiona normalmente para trabajar en niveles de inducción de saturación magnética para valores de la tensión nominal, para conseguir un aumento sustancial del flujo magnético y de la inducción se necesita aumentar considerablemente la corriente magnetizante de vacío. Esta corriente elevada puede llegar a destruir el bobinado por sobrecalentamiento.

De esta forma, hay que indicar que no se deben conectar los bobinados de un transformador a tensiones más elevadas que las indicadas en sus características nominales.

Pérdidas en el hierro

El núcleo del transformador está sometido constantemente a un campo magnético alterno, lo que produce los fenómenos de histéresis y de corrientes parásitas. Estos fenómenos producen unas pérdidas en el núcleo de hierro que se transforman en calor y que reducen el rendimiento del transformador.

¿Qué ocurre si conectamos un transformador de 50 Hz a una red de 100 Hz?

Dado que los fenómenos de histéresis y de corrientes parásitas dependen de la frecuencia, al aumentar esta también aumentan las pérdidas en el hierro, por lo que se producen sobrecalentamientos en el núcleo que, al ser transmitidos a los bobinados, pueden llegar a destruirlos.

En la Tabla 18.1 se puede comprobar el valor de las pérdidas en el hierro (pérdidas en vacío) de diferentes transformadores. Para determinar las pérdidas en el hierro se realiza el ensayo en vacío del transformador.

18.1.3. Ensayo en vacío del transformador

Mediante una sencilla experiencia se puede determinar:

- La relación de transformación (m).
- La corriente de vacío (I_0).
- Las pérdidas en el hierro (P_{Fe}).

© Ediciones Paraninfo

Para llevar a cabo este ensayo se deja abierto el circuito del secundario y se conecta un voltímetro (U_1) en el primario y otro en el secundario (U_2). Además, se intercala un amperímetro (A) y un vatímetro (W) en el circuito primario (Figura 18.14).

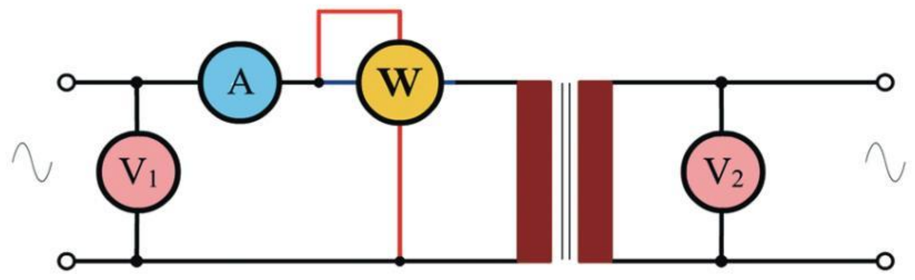


Figura 18.14. Ensayo en vacío de un transformador monofásico.

El amperímetro indica la corriente de vacío I_0.

El voltímetro U_2 mide la fuerza electromotriz E_2 inducida en el secundario, y el U_1 la tensión de red U_1 aplicada al primario.

La relación de transformación exacta se calcula mediante la expresión:

$$m = \frac{E_1}{E_2}$$

Dado que la corriente de vacío es tan pequeña, se pueden despreciar las caídas de tensión en el primario en relación con los valores de U_1 y E_1. Por tanto, se puede afirmar con bastante aproximación que en vacío se cumple que:

$$U_1 \cong E_1$$

Por lo que la relación de transformación se obtiene del cociente de las lecturas de los dos voltímetros:

$$m = \frac{V_1}{V_2}$$

El vatímetro indica la potencia de vacío (P_0), que será igual a:

$$P_0 = U_1 I_0 \cos \varphi_0$$

Esta potencia será la suma de las pérdidas en vacío producidas en los conductores de cobre de la bobina primaria por efecto Joule ($P_{0\,Cu} = R_1 I_0^2$) más las originadas en el hierro por efecto de las corrientes parásitas y por histéresis. Como la corriente I_0 es muy pequeña, se puede considerar que las pérdidas en los conductores de cobre en vacío son prácticamente despreciables con respecto a las del hierro. Por otro lado, las pérdidas en el hierro dependen, sobre todo, del flujo magnético, que como ya hemos visto permanece prácticamente constante en carga y en vacío, ya que su valor depende de la tensión de red U_1. Por todo esto, se puede decir que las pérdidas en el cobre se miden con bastante aproximación con el vatímetro conectado en vacío.

$$P_0 \cong P_{Fe}$$

Actividad resuelta 18.6

Se somete a un ensayo en vacío a un transformador monofásico de 5 kVA, 1.000/400 V, 50 Hz, y se obtienen los siguientes resultados: voltímetro en el primario (V_1) = 1.000 V; voltímetro en el secundario (V_2) = 400 V; amperímetro en el primario (A) = 0,5 A, y vatímetro en el primario (W) = 30 W. Determina la relación de transformación, las pérdidas en el hierro y la corriente de vacío.

Solución:

La relación de transformación es:

$$m = \frac{V_1}{V_2} = \frac{1.000}{400} = 2{,}5$$

Las pérdidas en el hierro son:

P_{Fe} = lectura del vatímetro = 30 W.

La corriente de vacío es:

I_0 = lectura del amperímetro = 0,5 A.

18.1.4. Transformador real en carga

Para hacer el estudio del transformador real en carga (Figura 18.15), habrá que tener en cuenta las mismas consideraciones que para el ideal; es decir, el flujo magnético tiende a ser el mismo en carga y en vacío. Para que esto se cumpla, la fuerza magnetomotriz producida por las bobinas del transformador debe ser igual en carga que en vacío. La expresión de los amperivueltas puede quedar así:

$$\overrightarrow{N_1 I_0} = \overrightarrow{N_2 I_2} + \overrightarrow{N_1 I_1}$$

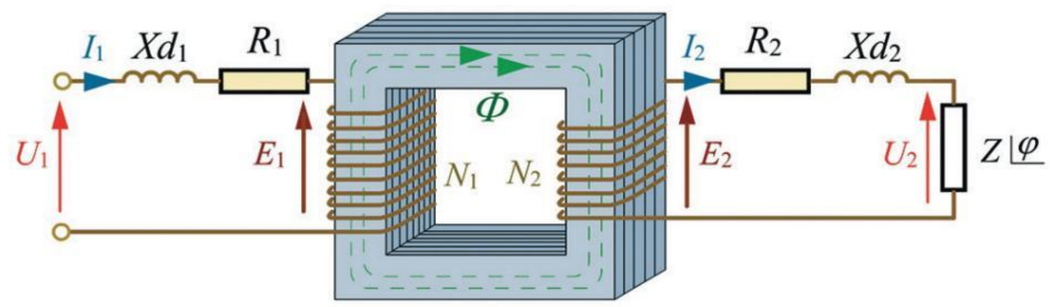


Figura 18.15. Transformador real en carga.

Esta ecuación se explica de la siguiente forma. Al conectar una carga en el secundario, circula una corriente I_2 por el bobinado secundario que produce la fuerza magnetomotriz

© Ediciones Paraninfo

$N_2\ I_2$. Esta tiende a modificar el flujo común creado por la f. m. m. de vacío $N_1\ I_0$, pero como esto no es posible, en el primario aparece una corriente I_1 que produce otra f. m. m. $N_1\ I_1$ para poder compensar los efectos de la producida por el secundario.

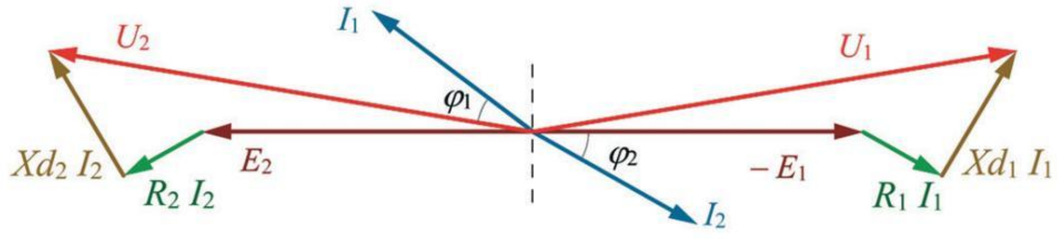


Figura 18.16. Diagrama vectorial del transformador real en carga.

A plena carga, la corriente de vacío se puede considerar despreciable respecto a las corrientes del primario y el secundario, por lo que en valores algebraicos se cumple que:

$$I_1 = \frac{I_2}{m} \quad \Rightarrow \quad m = \frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2}$$

Cuando el transformador trabaja con valores muy por debajo de su carga nominal, esta última apreciación es bastante inexacta.

Dado que tanto en el primario como en el secundario existe resistencia óhmica y reactancia inductiva, al circular por ellos la corriente primaria y secundaria, aparece una serie de caídas de tensión en ambos bobinados que hace que en carga la relación de tensiones primaria y secundaria no coincida con la relación de transformación.

18.1.5. Circuito equivalente en cortocircuito del transformador

Para poder valorar con aproximación y con cierta sencillez los fenómenos que producen las resistencias y reactancias de los bobinados de un transformador se utiliza normalmente un circuito equivalente del transformador que produzca con bastante aproximación los mismos efectos que el real y que permita, a su vez, determinar las relaciones fundamentales (caída de tensión en el secundario, intensidad de cortocircuito, pérdidas en los conductores por efecto Joule).

Para encontrar este circuito se cortocircuita el secundario y se hace pasar por el primario la corriente nominal I_{1n} a una tensión de red reducida (U_{cc} = tensión de cortocircuito aplicada al primario) (Figura 18.17). Si en estas condiciones tomamos al transformador como una carga, desde el primario se observará que existe una impedancia que consta de una resistencia de cortocircuito R_{cc} en serie con una reactancia de cortocircuito X_{cc}.

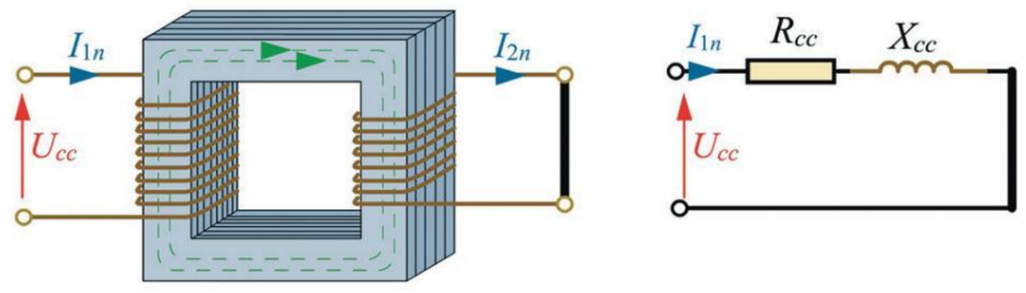


Figura 18.17. Circuito equivalente en cortocircuito del transformador.

De tal forma que se cumplen las siguientes relaciones (según el triángulo de impedancias de la Figura 18.18):

$$Z_{cc} = \sqrt{R_{cc}^2 + X_{cc}^2}$$

$$U_{cc} = Z_{cc} I_{1n}$$

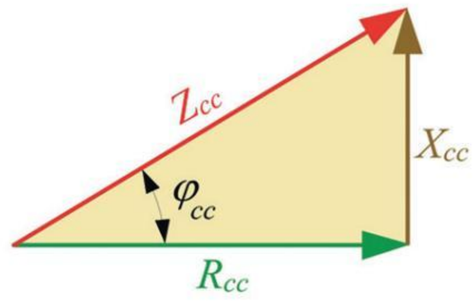


Figura 18.18. Triángulo de impedancias de cortocircuito.

Este circuito equivalente indica que el transformador posee una resistencia R_{cc}, vista desde el primario, que suma los efectos de las resistencias del primario y del secundario. La X_{cc} da el valor de la reactancia total en el primario y en el secundario.

Como estudiaremos más adelante, la tensión de cortocircuito U_{cc} que es necesario aplicar al transformador con el secundario en cortocircuito y para que circule la intensidad nominal primaria, será de mucha utilidad para conocer a fondo el transformador. En realidad el valor que más nos va a interesar va a ser el del valor porcentual de esta tensión referido a la tensión primaria. Este valor se expresa mediante la nomenclatura u_{cc}:

$$u_{cc} = \frac{U_{cc}}{U_1}\ 100$$

u_{cc} = Valor porcentual de la tensión de cortocircuito referido a la tensión primaria.

U_{cc} = Tensión de cortocircuito (V).

U_1 = Tensión nominal primaria.

El valor de u_{cc} es muy importante, y por eso figura en la placa de características de los transformadores comerciales. Para hacernos una idea de cómo es este valor, a continuación se expresa una relación de los valores para transformadores trifásicos: hasta 200 kVA (u_{cc} = 4 %); desde 250 a 3.150 kVA (u_{cc} = 6 %); desde 4 a 5 MVA (u_{cc} = 8 %); más de 6,3 MVA (u_{cc} = 10 %).

© Ediciones Paraninfo

18.1.6. Ensayo del transformador en cortocircuito

Mediante este ensayo es posible determinar las componentes de cortocircuito, es decir:

- Los parámetros R_{cc}, X_{cc} y Z_{cc}
- Tensión de cortocircuito porcentual y sus componentes
- Las pérdidas en el cobre.

Para llevar a cabo este ensayo se cortocircuita el secundario mediante un amperímetro A_2, tal como se muestra en el circuito de la Figura 18.19. El primario se alimenta a través de una fuente de tensión alterna regulable (por ejemplo, con un autotransformador de regulación variable). En el primario se conecta un amperímetro A_1, un voltímetro V_{cc} y un vatímetro W.

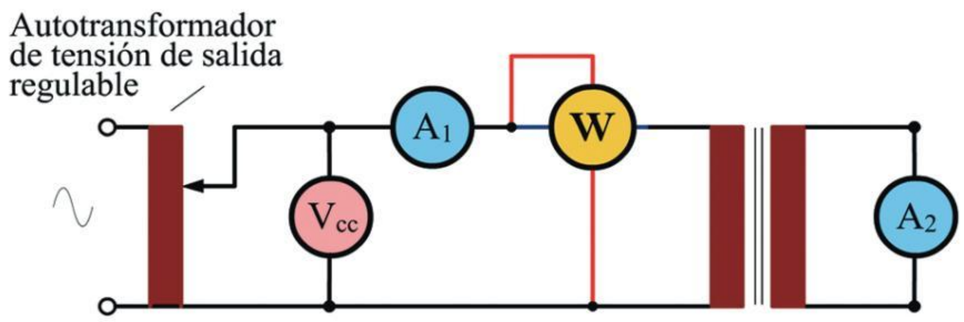


Figura 18.19. Esquema de conexiones para realizar el ensayo en cortocircuito de un transformador monofásico.

Se comienza el ensayo aplicando cero voltios en el primario y se va subiendo poco a poco la tensión hasta conseguir que el amperímetro A_1 indique un valor de corriente igual a la intensidad nominal primaria correspondiente al transformador a ensayar.

Cuando el amperímetro A_1 indique la intensidad nominal primaria I_{1n}, el amperímetro A_2 indicará la intensidad nominal secundaria I_{2n}.

Al circular corriente por el primario y por el secundario, se producirán pérdidas de potencia en las resistencias del primario y del secundario, que se transforman en calor, y que para la intensidad nominal serán igual a:

$$P_{Cu} = R_1 I_{1n}^2 + R_2 I_{2n}^2$$

P_{Cu} (pérdidas en el cobre)

El vatímetro conectado en el ensayo indica con bastante aproximación el valor de esta potencia. Hay que tener en cuenta que tanto en el bobinado primario como en el secundario circula toda la intensidad nominal. Por otro lado, se pueden considerar las pérdidas en el hierro despreciables, ya que al someter al transformador a una tensión muy baja (la tensión de cortocircuito aplicada es del orden del 5 % de la nominal primaria) el flujo con que trabaja el transformador es también muy reducido, por lo que dichas pérdidas son insignificantes con respecto a las del cobre.

P_{Cu} (pérdidas en el cobre) ≅ lectura de vatímetro

Para determinar la impedancia de cortocircuito aplicaremos la ley de Ohm:

$$Z_{cc} = \frac{U_{cc}}{I_{1n}}$$

Para determinar las componentes R_{cc} y X_{cc} nos valemos del triángulo de impedancias (Figura 18.18), que una vez conocido el ángulo φ_{cc}, podrán ser determinadas de la siguiente forma:

$$R_{cc} = Z_{cc} \cos \varphi_{cc}$$
$$X_{cc} = Z_{cc} \operatorname{sen} \varphi_{cc}$$

El ángulo φ_{cc} lo obtenemos de la potencia de cortocircuito. El vatímetro nos indica dicha potencia, que será igual a:

P_{Cu} (pérdidas en el cobre) ≅

≅ P_{cc}(potencia de cortocircuito) = lectura de vatímetro

$$P_{cc} = U_{cc} I_{1n} \cos \varphi_{cc} \quad \Rightarrow \quad \cos \varphi_{cc} = \frac{P_{cc}}{U_{cc} I_{1n}}$$

Al fluir la corriente nominal por la resistencia y reactancia de cortocircuito, aparece en cada una de ellas una caída de tensión, siendo en la primera igual a $R_{cc} I_{1n}$ y en la segunda igual a $X_{cc} I_{1n}$, de tal forma que la tensión de cortocircuito U_{cc} aplicada sea la suma vectorial de estas, tal como se puede apreciar en el diagrama vectorial de la Figura 18.20.

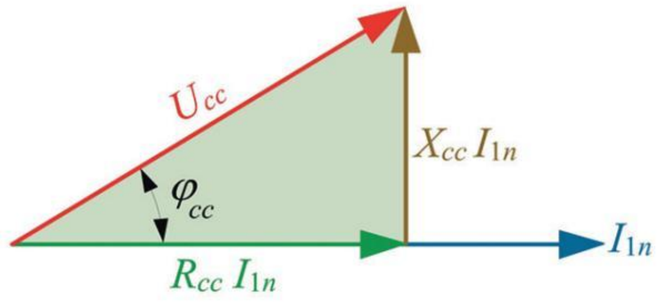


Figura 18.20.

Si expresamos cada una de estas tensiones en valores porcentuales, tendremos que:

$$u_{cc} = \frac{U_{cc}}{U_1} \cdot 100;\ u_{R_{cc}} = \frac{R_{cc} I_{1n}}{U_1} \cdot 100;\ u_{X_{cc}} = \frac{X_{cc} I_{1n}}{U_1} \cdot 100$$

© Ediciones Paraninfo

$u_{R_{cc}}$ = Caída de tensión óhmica de cortocircuito porcentual.

$u_{X_{cc}}$ = Caída de tensión inductiva de cortocircuito porcentual.

Estas tensiones se pueden representar también en un diagrama vectorial (Figura 18.21), con sus correspondientes relaciones.

$$u_{R_{cc}} = u_{cc} \cos \varphi_{cc}$$

$$u_{X_{cc}} = u_{cc} \operatorname{sen} \varphi_{cc}$$

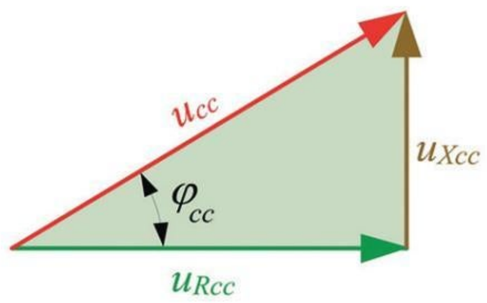


Figura 18.21. Triángulo de tensiones de cortocircuito porcentuales.

Para hacernos una idea del orden de magnitud de algunas de las características de los transformadores, en la Tabla 18.1 se exponen las de una gama de transformadores trifásicos comerciales.

Tabla 18.1. Características de una gama de transformadores trifásicos

S_n (KVA)	Conex.	P_{FE} (W)	P_{Cu} (W)	u_{cc} (%)	I_0 (%)
10	Yz11	105	360	4	7,0
25	Yz11	145	800	4	5,1
50	Yz11	210	1.380	4	4,3
100	DY11	345	2.340	4	3,0
160	DY11	490	3.150	4	2,4
250	DY11	675	4.010	4	2,0
400	DY11	990	5.780	4	1,8
630	DY11	1.350	8.270	4	1,7
800	DY11	1.660	10.200	5	1,6
1.000	DY11	1.950	12.100	5	1,5
A.T. = 24 kV/B.T. = 420 V (vacío)					

Actividad resuelta 18.7

Al realizar un ensayo en cortocircuito a un transformador monofásico de 250 kVA, tensiones 24.000/420 V, es necesario aplicar al lado de alta tensión una tensión de 960 V para que por el primario circule la corriente nominal. Si la potencia absorbida en el ensayo es de 4.010 W, averigua: a) las corrientes nominales del primario y del secundario; b) las pérdidas en el cobre para la potencia nominal; c) la tensión de cortocircuito y sus componentes; d) los parámetros R_{cc}, X_{cc} y Z_{cc}; e) las pérdidas en el cobre cuando el transformador trabaje a la mitad de la carga.

Solución:

a) Mediante la expresión general de potencia aparente determinamos las corrientes nominales de ambos devanados:

$$I_{1n} = \frac{S_n}{U_{1n}} = \frac{250.000}{24.000} = 10{,}4 \text{ A}$$

$$I_{2n} = \frac{S_n}{U_{2n}} = \frac{250.000}{420} = 595 \text{ A}$$

b) Las pérdidas en el cobre a la potencia nominal coinciden con la potencia de cortocircuito medida en el ensayo:

$$P_{Cu} = P_{cc} = 4.010 \text{ W}$$

También podemos determinar el factor de potencia de cortocircuito:

$$\cos \varphi_{cc} = \frac{P_{cc}}{U_{cc} I_{1n}} = \frac{4.010}{960 \cdot 10{,}4} = 0{,}4 \quad \Rightarrow \quad \varphi_{cc} = 66{,}3°$$

c) La tensión porcentual de cortocircuito la determinamos a partir de U_{cc}:

$$u_{cc} = \frac{U_{cc}}{U_{1n}} \cdot 100 = \frac{960}{24.000} \cdot 100 = 4\ \%$$

Las caídas de tensión $u_{R_{cc}}$ y $u_{X_{cc}}$ las determinamos a partir del triángulo de tensiones de cortocircuito:

$$u_{R_{cc}} = u_{cc} \cos \varphi_{cc} = 4 \cdot 0{,}4 = 1{,}6\ \%$$

$$u_{X_{cc}} = u_{cc} \operatorname{sen} \varphi_{cc} = 4 \cdot \operatorname{sen} 66{,}3° = 3{,}7\ \%$$

d) Determinaremos ahora la impedancia de cortocircuito y sus componentes:

$$Z_{cc} = \frac{U_{cc}}{I_{1n}} = \frac{960}{10{,}4} = 92{,}3\ \Omega$$

$$R_{cc} = Z_{cc} \cos \varphi_{cc} = 92{,}3 \cdot 0{,}4 = 36{,}9\ \Omega$$

$$X_{cc} = Z_{cc} \operatorname{sen} \varphi_{cc} = 92{,}3 \cdot \operatorname{sen} 66{,}3 = 84{,}5\ \Omega$$

e) Se puede decir que las pérdidas en el cobre vienen determinadas por la expresión:

$$P_{Cu} = R_{cc} I_1^2$$

Si el transformador trabaja a la mitad de la potencia nominal, la intensidad por el primario, en ese caso, será la mitad que la de plena carga y, por tanto, las pérdidas en el cobre también se verán reducidas:

$$I_1 = \frac{I_{1n}}{2} = \frac{10{,}4}{2} = 5{,}2 \text{ A}, \qquad P_{Cu} = 36{,}9 \cdot 5{,}2^2 = 998 \text{ W}$$

© Ediciones Paraninfo

18.1.7. Corriente de cortocircuito accidental

Cuando el secundario de un transformador se pone en cortocircuito por una avería, al estar el primario conectado a toda la tensión primaria, la corriente tiende a elevarse rápidamente a valores peligrosos para los conductores de ambos devanados (Figura 18.22).

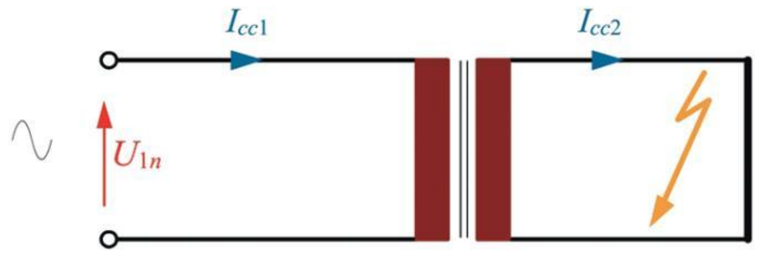


Figura 18.22. Transformador en cortocircuito accidental.

Esta corriente, según el circuito equivalente en cortocircuito, quedará limitada exclusivamente por el valor de la impedancia de cortocircuito (Figura 18.23):

$$I_{cc} = \frac{U_{1n}}{Z_{cc}}$$

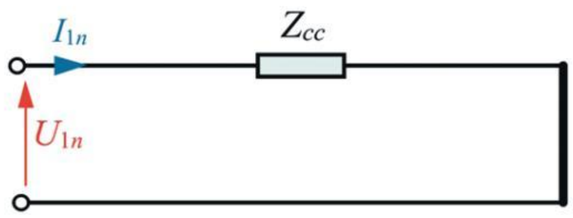


Figura 18.23. Circuito equivalente con el transformador en cortocircuito accidental.

El valor de Z_{cc} no suele ser conocido. Sin embargo, el de u_{cc} suele aparecer en las placas de características, por lo que si determinamos la relación que existe entre ambos parámetros podremos determinar con rapidez la intensidad de cortocircuito de un transformador:

En el ensayo de cortocircuito:

$$Z_{cc} = \frac{U_{cc}}{I_{1n}} \qquad (1)$$

Como

$$u_{cc} = \frac{U_{cc}}{U_{1n}} \cdot 100 \quad \Rightarrow \quad U_{1n} = \frac{U_{cc}}{u_{cc}} \cdot 100 \qquad (2)$$

Si sustituimos las expresiones (1) y (2) en la primera ecuación, tendremos que:

$$I_{cc} = \frac{100 U_{cc}/u_{cc}}{U_{cc}/I_{1n}}$$

y simplificando:

$$I_{cc} = \frac{I_{1n}}{u_{cc}} \cdot 100$$

Actividad resuelta 18.8

Determina la intensidad de cortocircuito accidental del primario y del secundario del transformador de la Actividad resuelta 18.7.

Solución:

Como la u_{cc} = 4 % y la I_{1n} = 10,4 A, la intensidad de cortocircuito en el primario es:

$$I_{cc1} = \frac{I_{1n}}{u_{cc}} \cdot 100 = \frac{10{,}4}{4} \cdot 100 = 260 \text{ A}$$

$$I_{cc2} = \frac{I_{2n}}{u_{cc}} \cdot 100 = \frac{625}{4} \cdot 100 = 15.625 \text{ A}$$

Se habrá podido observar que la corriente de cortocircuito es grande en transformadores con tensión de cortocircuito baja, y pequeña en transformadores con tensión de cortocircuito alta.

Una corriente de cortocircuito elevada puede provocar daños en los conductores si no se corta rápidamente, por lo que siempre es importante prestar atención a los dispositivos de protección elegidos para esta misión. Los daños a que nos referimos son causados por la elevación de temperatura en los bobinados por efecto Joule ($P_{Cu} = R_{cc} I_{cc}^2$) y por los esfuerzos dinámicos que aparecen entre los conductores de una misma bobina, que pueden provocar deformaciones o roturas de las bobinas cuando circulan grandes corrientes (los fuertes campos magnéticos creados por estos conductores desarrollan fuerzas de atracción y de repulsión que originan los esfuerzos dinámicos).

Una forma de reducir la corriente de cortocircuito accidental es aumentar la tensión de cortocircuito a costa de elevar la resistencia y la reactancia de cortocircuito. Esto trae consigo, como estudiaremos en el siguiente apartado, un aumento de la caída de tensión del transformador. Por esta razón, cuando se fabrican transformadores se busca un equilibrio entre estos valores.

18.1.8. Caída de tensión de un transformador

Dado que existen resistencias y reactancias intercaladas en serie con los bobinados del transformador, cuando circule una corriente de carga por los bobinados la tensión del secundario se verá reducida. La caída de tensión será entonces la diferencia algebraica entre la tensión eficaz del secundario en vacío (E_2) y la que aparece cuando el transformador trabaja en carga (U_2):

$$u = E_2 - U_2$$

© Ediciones Paraninfo

Como veremos más adelante, es muy útil expresar esta caída en valores porcentuales referidos a la tensión de vacío, ya que así será posible relacionarla, con la ayuda del circuito equivalente, con los parámetros de cortocircuito y con las tensiones de cortocircuito porcentuales. A este valor porcentual se lo denomina **coeficiente de regulación** (ε).

$$\varepsilon = \frac{E_2 - U_2}{E_2} 100$$

E_2 = Tensión del secundario en vacío.
U_2 = Tensión del secundario en carga.
ε = Coeficiente de regulación.

Para determinar la relación antes mencionada nos valdremos del circuito equivalente con los parámetros de cortocircuito (Figura 18.24).

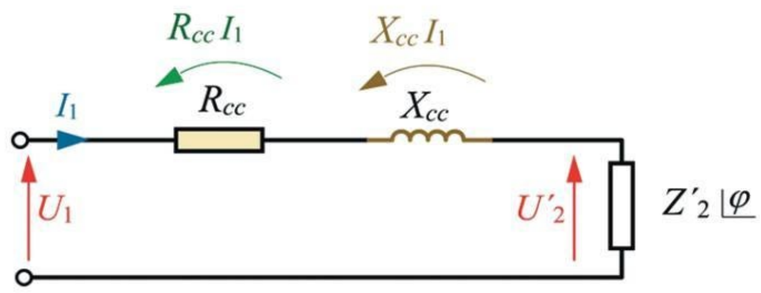


Figura 18.24. Circuito equivalente del transformador con parámetros de cortocircuito.

En este caso se supone que U_1 es la tensión que aparecería en la carga reducida al primario estando el transformador en vacío. La tensión U'_2 sería la tensión que aparece en bornes de la carga cuando se establece la corriente I_1 por el transformador. En este caso la caída de tensión será la diferencia entre estas dos tensiones:

$$u = U_1 - U'_2$$

y que coincide con bastante aproximación con la caída de tensión expresada con anterioridad.

El coeficiente de regulación en este caso se expresará de la forma:

$$\varepsilon = \frac{U_1 - U'_2}{U_1} \cdot 100$$

Para calcular el coeficiente de regulación nos valdremos del diagrama vectorial de la Figura 18.25, donde expresaremos la siguiente ecuación:

$$U_1 = U'_2 + R_{cc}\,I_1 + X_{cc}\,I_1$$

El coeficiente de regulación será:

$$\varepsilon = \frac{U_1 - U'_2}{U_1} \cdot 100 = \frac{\text{OD} - \text{OA}}{U_1} \cdot 100 =$$

$$= \frac{\text{AD}}{U_1} \cdot 100 \cong \frac{\text{AC}}{U_1} \cdot 100 = \frac{\text{AB} + \text{BC}}{U_1} \cdot 100$$

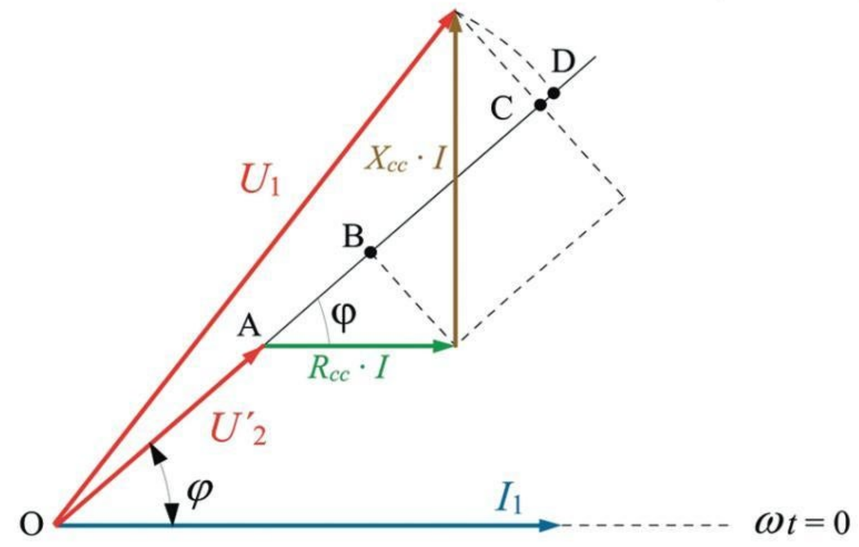


Figura 18.25. Diagrama vectorial para determinar la caída de tensión.

Sustituyendo estos términos por los relacionados con las caídas de tensión óhmica e inductiva en el diagrama vectorial:

$$\varepsilon = \frac{R_{cc}I_1 \cos \varphi + X_{cc}I_1 \operatorname{sen} \varphi}{U_1} \cdot 100$$

Como:

$$u_{R_{cc}} = \frac{R_{cc}I_1}{U_1} \cdot 100 \quad \text{y} \quad u_{X_{cc}} = \frac{X_{cc}I_1}{U_1} \cdot 100$$

tenemos que:

$$\varepsilon = u_{R_{cc}} \cos \varphi + u_{X_{cc}} \operatorname{sen} \varphi$$

ε = Coeficiente de regulación.
$u_{R_{cc}}$ = Caída de tensión óhmica de cortocircuito.
$u_{X_{cc}}$ = Caída de tensión inductiva de cortocircuito.
$\cos \varphi$ = Factor de potencia de la carga.

Actividad resuelta 18.9

Se desea determinar el valor efectivo de la tensión de salida de un transformador monofásico a plena carga con un FP de 0,85. Las características del mismo son: 10 kVA; 1.000/420 V; $u_{R_{cc}} = 3{,}2$ %; $u_{X_{cc}} = 2{,}4$ %. Averigua también el valor efectivo de la tensión en la carga cuando el transformador trabaje a la mitad de su potencia nominal y a un *FP* de 0,85 inductivo de la misma.

Solución:

Con los datos aportados de las caídas de tensión porcentuales y el factor de potencia de la carga calculamos el coeficiente de regulación del transformador.

$$\varepsilon = u_{R_{cc}} \cos \varphi + u_{X_{cc}} \operatorname{sen} \varphi = 3{,}2 \cdot 0{,}85 + 2{,}4 \cdot 0{,}53 = 4\ \%$$

Este dato nos indica que el transformador produce una caída del 4 % de la tensión de salida para la corriente nominal, es decir:

© Ediciones Paraninfo

$$u = \frac{420\ \text{V}}{100} \cdot 4\ \% = 16{,}8\ \text{V}$$

La tensión en bornes del secundario para esta carga será, entonces:

$$U_2 = E_2 - u = 420 - 16{,}8 = 403\ \text{V}$$

Cuando el transformador trabaje a la mitad de la carga, la intensidad por el primario será también la mitad. Se puede comprobar que la caída de tensión que se produce también será la mitad ($U_{cc} = Z_{cc}\, I_{1n}/2$); por tanto, las componentes $u_{R_{cc}}$, $u_{X_{cc}}$ serán también la mitad. En definitiva, el coeficiente de regulación también se ve reducido en la misma manera.

Por tanto, si llamamos (C) al índice de carga, expresado como la relación entre la corriente a cualquier carga y la carga a la potencia nominal: $C = I_1 / I_{1n}$, tendremos que:

$$\varepsilon_C = C\varepsilon$$

En nuestro caso $C = 1/2$, por lo que:

$$\varepsilon = 0{,}5 \cdot 4 = 2\ \%$$

La caída de tensión es ahora:

$$u = \frac{420\ \text{V}}{100} \cdot 2\ \% = 8{,}4\ \text{V}$$

La tensión en bornes del secundario para esta carga es:

$$U_2 = E_2 - u = 398 - 8{,}4 = 390\ \text{V}$$

Actividad resuelta 18.10

Se desea determinar el valor efectivo de la tensión de salida de un transformador monofásico a plena carga con un FP de 0,85. Las características del transformador son 50 kVA y 1.000/242 V. En el ensayo de cortocircuito se han obtenido los siguientes resultados: ha consumido 90 W al aplicar una tensión de 10 V y circula una corriente por el primario de 12,5 A. Averigua también: a) las pérdidas en el cobre a plena carga; b) el valor efectivo de la tensión en la carga cuando el transformador trabaje a la mitad de su potencia nominal y a un *FP* de 0,85 inductivo de la misma.

Solución:

Lo primero que vamos a hacer es comprobar si el ensayo en cortocircuito se ha hecho para la corriente nominal:

$$I_{1n} = \frac{S_n}{U_{1n}} = \frac{50.000}{1.000} = 50\ \text{A}$$

Este resultado nos indica que el ensayo se ha hecho a corriente reducida. Esto se hace con el fin de que la fuente de tensión regulable y los aparatos sean más sencillos. Por otro lado, los valores de la impedancia y el factor de potencia de cortocircuito permanecen fijos para cualquier corriente de ensayo, por lo que:

$$Z_{cc} = \frac{U'_{cc}}{I'_{cc}} = \frac{10}{12{,}5} = 0{,}8\ \Omega$$

$$\cos\varphi_{cc} = \frac{P'_{cc}}{U'_{cc}\, I'_{cc}} = \frac{90}{10 \cdot 12{,}5} = 0{,}72 \quad \Rightarrow \quad \varphi_{cc} = 43{,}94^\circ$$

$$R_{cc} = Z_{cc} \cos\varphi_{cc} = 0{,}8 \cdot 0{,}72 = 0{,}58\ \Omega$$

a) Las pérdidas del cobre a la potencia nominal serán entonces:

$$P_{\text{Cu}} = R_{cc}\, I_{1n}^2 = 0{,}58 \cdot 50^2 = 1.450\ \text{W}$$

La tensión de cortocircuito para la intensidad nominal se calculará aplicando la ley de Ohm a la impedancia de cortocircuito:

$$U_{cc} = Z_{cc}\, I_{1n} = 0{,}8 \cdot 50 = 40\ \text{V}$$

$$u_{cc} = \frac{U_{cc}}{U_{1n}} \cdot 100 = \frac{40}{1.000} \cdot 100 = 4\ \%$$

$$u_{R_{cc}} = u_{cc} \cos\varphi_{cc} = 4 \cdot 0{,}72 = 2{,}88\ \%$$

$$u_{X_{cc}} = u_{cc}\ \text{sen}\ \varphi_{cc} = 4 \cdot \text{sen}\ 43{,}94^\circ = 2{,}77\ \%$$

Ahora ya podemos determinar el coeficiente de regulación:

$$\varepsilon = u_{R_{cc}} \cos\varphi + u_{X_{cc}}\ \text{sen}\ \varphi =$$

$$= 2{,}88 \cdot 0{,}85 + 2{,}77 \cdot 0{,}53 = 3{,}9\ \%$$

La tensión en bornes U_2 de la carga la obtenemos a partir de este coeficiente y de la tensión de vacío E_2:

$$U_2 = E_2 - \frac{E_2\varepsilon}{100} = 242 - \frac{242 \cdot 3{,}9}{100} = 232{,}6\ \text{V}$$

b) Cuando el transformador trabaja a la mitad de la carga, la intensidad por el primario es también la mitad. Se puede comprobar que la caída de tensión que se produce también es la mitad ($U_{cc} = Z_{cc}\, I_{1n}/2$); por tanto, las componentes $u_{R_{cc}}$, $u_{X_{cc}}$ serán también la mitad. En definitiva, el coeficiente de regulación también se ve reducido de la misma manera.

Por tanto, si llamamos (C) al índice de carga, expresado como la relación entre la corriente a cualquier carga y la carga a la potencia nominal: $C = I_1 / I_{1n}$, tendremos que:

$$\varepsilon_C = C\varepsilon$$

En nuestro caso $C = 1/2$, por lo que:

$$\varepsilon = 0{,}5 \cdot 3{,}9 = 1{,}95\ \%$$

La tensión en bornes de la carga será entonces:

$$U_2 = \ldots = 237{,}2\ \text{V}$$

¿Qué ocurre cuando se conecta una carga capacitiva a un transformador? Al invertirse el ángulo φ de la carga,

© Ediciones Paraninfo

para ciertos valores se puede comprobar que la caída se puede convertir en nula e incluso hacerse negativa. Es decir, con cargas capacitivas puede aparecer una tensión más alta en bornes de la carga que en vacío.

Actividad resuelta 18.11

Determina la tensión en bornes de la carga del transformador de la Actividad resuelta 18.10, trabajando a plena carga y con un factor de potencia capacitivo de 0,1.

Solución:

Para un cos φ = 0,1 capacitivo le corresponde un ángulo igual a:

φ = arc cos 0,1 = –84,3° (es negativo porque la tensión queda retrasada respecto a la intensidad)

$$\text{sen } \varphi = \text{sen } (-84{,}3°) = -0{,}99$$

$$\varepsilon = u_{R_{cc}} \cos \varphi + u_{X_{cc}} \text{ sen } \varphi =$$

$$= 2{,}88 \cdot 0{,}1 + 2{,}77 \cdot (-0{,}99) = -2{,}45\ \%$$

$$U_2 = E_2 - \frac{E_2 \varepsilon}{100} = 242 - \frac{242 \cdot (-2{,}45)}{100} = 247{,}9\ \text{V}$$

En este caso la tensión del secundario en carga es mayor que la de vacío.

Mediante el diagrama vectorial de la Figura 18.25 se puede hacer un estudio de cómo se comporta el transformador para una corriente de salida fija y un factor de potencia variable (cargas óhmicas, cargas inductivas y cargas capacitivas). A este tipo de gráficos se los conoce por el nombre de diagrama de Kapp, en el que se puede determinar la caída de tensión para cualquier tipo de carga.

Por todo esto se puede concluir que la tensión que aparece en bornes de un transformador depende de la potencia que suministre por el secundario a la carga, así como del factor de potencia de esta.

Para transformadores que posean una potencia nominal inferior a 16 kVA se indica en su placa de características el valor de la tensión de salida a plena carga, suponiendo un factor de potencia igual a la unidad.

En los transformadores con potencias superiores a 16 kVA se indica en la placa de características la tensión de cortocircuito en valores porcentuales. Además, se suele añadir un conmutador de tensiones, cuya misión es compensar las caídas de tensión producidas en el transformador o en la propia línea de distribución. Este conmutador posee varias posiciones y es capaz de seleccionar, de una forma automática, más o menos espiras de uno de los bobinados, de modo que consigue seleccionar la tensión de salida al valor deseado.

En la Figura 18.26 se muestran diferentes curvas características de un transformador para la tensión en bornes de la carga en función de la corriente de esta. Se han trazado varias curvas para poder apreciar la diferencia en ellas para diferentes tipos de carga.

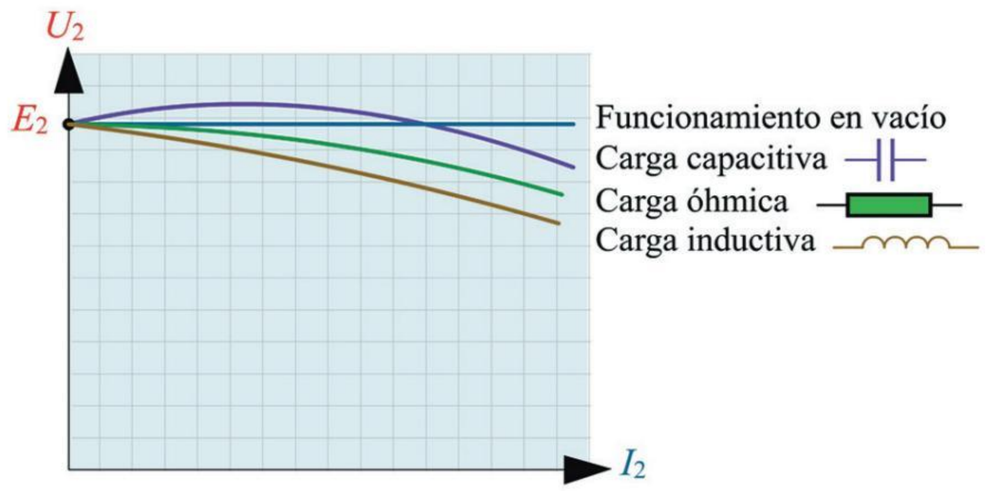


Figura 18.26. Curvas características de un transformador. $U_2 = f(I_2)$.

18.1.9. Rendimiento de un transformador

Un transformador ideal no produce ningún tipo de pérdidas y, por eso, la potencia que absorbe por el primario de la red la entrega íntegramente por el secundario a la carga. En un transformador real esto no ocurre exactamente así, ya que la potencia absorbida por el primario queda aumentada por efecto de las pérdidas en el hierro y en el cobre. Aun así, el transformador es una máquina eléctrica que posee un alto rendimiento (por encima del 90 %).

Se puede decir que el rendimiento de un transformador es la relación entre la potencia suministrada a la carga por el secundario (P_2) y la potencia absorbida de la red por el primario (P_1), expresada en tantos por ciento. De esta forma, el rendimiento vendrá dado por la siguiente expresión:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} 100$$

La potencia que el transformador toma de la red de entrada es la suma de la potencia proporcionada a la carga más las pérdidas que se producen en los circuitos magnéticos y en los devanados de cobre: $P_1 = P_2 + P_{Fe} + P_{Cu}$.

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{Fe} + P_{Cu}} 100$$

η = Rendimiento del transformador en %.

P_2 = Potencia activa cedida a la carga.

P_{Fe} = Pérdidas en el hierro.

P_{Cu} = Pérdidas en el cobre.

© Ediciones Paraninfo

El rendimiento del transformador dependerá del índice de carga al que trabaje. Se demuestra matemáticamente que se alcanza el rendimiento máximo para un índice de carga tal que las pérdidas en el cobre sean igual que las del hierro.

Actividad resuelta 18.12

Un transformador monofásico posee las siguientes características: 10 kVA, 7.200/242 V, potencia de ensayo en vacío = = 125 W, potencia de ensayo en cortocircuito = 360 W. Determina: a) el rendimiento a plena carga y cos $\varphi = 0{,}8$; b) el rendimiento cuando el transformador trabaje a la mitad de su potencia nominal y cos $\varphi = 0{,}8$; c) la potencia a que debe trabajar el transformador para que lo haga con el rendimiento máximo.

Solución:

a) Para calcular el rendimiento a plena carga habrá que determinar previamente la potencia activa con el factor de potencia indicado ($P_2 = S \cos \varphi$):

$$\eta = \frac{S \cos \varphi}{S \cos \varphi + P_{Fe} + P_{Cu}} 100 =$$

$$= \frac{10.000 \cdot 0{,}8}{10.000 \cdot 0{,}8 + 125 + 360} \cdot 100 = 94{,}28\ \%$$

b) Cuando el transformador trabaje a la mitad de la carga se reducirán también las pérdidas en el cobre, manteniéndose constantes las del hierro.

Las pérdidas en el cobre para cualquier carga I_1 son:

$$P_{Cu} = R_{cc}\, I_1^2$$

como el índice de carga es:

$$C = \frac{I_1}{I_{1n}} \quad \Rightarrow \quad I_1 = C I_{1n}$$

sustituyendo en la primera ecuación:

$$P_{Cu} = R_{cc}\, I_{1n}^2 C^2$$

Como el término $R_{cc}\, I_{1n}^2$ coincide con las pérdidas del ensayo en cortocircuito a intensidad nominal:

$$P_{Cu} = P_{cc} C^2$$

$$P_{Cu}\,(C = 1/2) = 360 \cdot (1/2)^2 = 90\ \text{W}$$

el rendimiento será entonces:

$$\eta_C = \frac{C S_n \cos \varphi}{C S_n \cos \varphi + P_{Fe} + C^2 P_{cc}} 100 \quad \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \quad \eta_{(C = 1/2)} = \frac{1/2 \cdot 10.000 \cdot 0{,}8}{1/2 \cdot 10.000 \cdot 0{,}8 + 125 + 90} \cdot 100 =$$

$$= 94{,}9\%$$

c) El rendimiento máximo se consigue cuando se cumple: $P_{Fe} = P_{Cu}$

$$P_{Fe} = P_{cc} C^2 \quad \Rightarrow \quad C = \sqrt{\frac{P_{Fe}}{P_{cc}}} = \sqrt{\frac{125}{360}} = 0{,}59$$

Lo que nos indica que el transformador consigue su rendimiento máximo cuando trabaja a un 59 % de su potencia nominal. Para un factor de potencia de la carga igual a 0,8, este rendimiento será:

$$\eta_{máx} = \frac{0{,}59 \cdot 10.000 \cdot 0{,}8}{0{,}59 \cdot 10.000 \cdot 0{,}8 + 125 + 125} \cdot 100 = 94{,}97\ \%$$

Actividad propuesta 18.1

En la Tabla 18.2 se expresan las características de cuatro transformadores monofásicos y los resultados obtenidos al someterles a los ensayos de vacío y cortocircuito según las Figuras 18.14 y 18.19. Con estos datos, averigua: m, I_{1n}, I_{2n}, R_{cc}, X_{cc}, Z_{cc}, u_{cc}, u_{Rcc}, u_{Xcc}, I_{cc1}, I_{cc2}, ε, P_{Fe}, P_{Cu}, tensión a plena carga en el secundario y rendimiento a plena carga para el FP indicado.

Tabla 18.2.

Ejercicio	1.º	2.º	3.º
S_n (VA)	4.000	10.000	25.000
V_1 (V)	420	398	10.000
V_2 (V)	242	230	242
V_{cc} (V)	20	15	40
P_0 (W)	50	100	130
P_{cc} (W)	150	300	800
Cos φ	0,9 induc.	0,8 induc.	0,8 capc.

La solución a esta Actividad propuesta la puedes encontrar dentro del MATERIAL WEB elaborado para este texto.

18.1.10. Características nominales de un transformador

La potencia nominal de un transformador monofásico es el producto de su tensión nominal primaria por la corriente nominal primaria. Es decir, su potencia aparente:

$$S_n = U_n\, I_n$$

Se entiende por tensiones y corrientes nominales a los valores para los cuales ha sido proyectado el transformador. Así, por ejemplo, un transformador que posea las siguientes características nominales:

© Ediciones Paraninfo

- Tensión nominal del primario: 10.000 V.
- Corriente nominal del primario: 50 A.

le corresponderá una potencia nominal de:

$$S_n = U_n\, I_n = 10.000 \cdot 50 = 500.000 \text{ VA} = 500 \text{ kVA}$$

Los aislantes del bobinado primario de este transformador deberán soportar una tensión superior a 10.000 V, y los conductores del mismo deberán poseer una sección suficiente para soportar el paso de una corriente de 50 A.

En resumen, se puede decir que la potencia nominal de un transformador es un valor puramente convencional de referencia y que está fijado, básicamente, desde un punto de vista térmico. Hay que pensar que el transformador que trabaja a plena carga se calienta por causa de las pérdidas en el cobre ocasionadas por el efecto Joule en los conductores del primario y del secundario, así como por las pérdidas que aparecen en el núcleo de hierro por histéresis y corrientes parásitas.

Un transformador que trabaje a sus características nominales evacuará el calor que produce sin dificultad, manteniendo una temperatura de trabajo no peligrosa.

¿Cómo podemos aumentar la potencia nominal de un transformador?

Cuando nosotros exigimos a un transformador que trabaje a una potencia superior a la nominal, este se calienta excesivamente. Si nosotros refrigeramos el transformador, por ejemplo con un ventilador o sumergiendo los bobinados en aceite mineral, habremos conseguido el objetivo propuesto.

18.2. Autotransformadores

Estos dispositivos se construyen con el mismo núcleo que los transformadores pero con un solo devanado y una conexión intermedia (Figura 18.27). Al conjunto de las espiras se lo somete a la tensión mayor (U_1), pudiendo ser considerado este como el primario. Al estar la toma intermedia conectada a menos espiras, aparece en ella una tensión menor (U_2), que corresponde a la del secundario. La relación de transformación vendrá dada en este caso por:

$$m = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

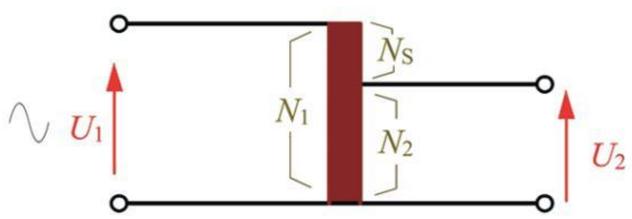


Figura 18.27. Autotransformador.

En los autotransformadores, el devanado primario está eléctricamente unido con el de salida; esto propicia que parte de la energía del primario se transfiera directamente hacia el secundario a través de los propios conductores de los devanados; el resto de la energía se transmite por inducción magnética como en un transformador normal.

Si I_1 es la intensidad del primario e I_2 la del secundario, la intensidad que circulará por el devanado común (N_s) en un transformador reductor será igual a la diferencia de las mismas ($I_c = I_1 - I_2$) (Figura 18.28). Esto hace que se pueda reducir la sección de los conductores, con el consiguiente ahorro de cobre. Además el núcleo podrá ser más pequeño, por lo que las pérdidas en el cobre y en el hierro serán más reducidas.

Una vez entendido esto, comprenderemos que las principales ventajas que presentan los autotransformadores son: abaratamiento, reducción de peso y volumen, y mejor rendimiento. Sin embargo, su uso se ve limitado por no aislar eléctricamente el bobinado de alta tensión con el de baja, lo que puede provocar en caso de avería (por ejemplo, si se corta el devanado común) que la tensión del primario aparezca íntegramente en secundario, con el consiguiente peligro que ello conlleva. Por eso solo podrá aplicarse en aquellos casos en que la tensión superior no exceda el 25 % de la inferior.

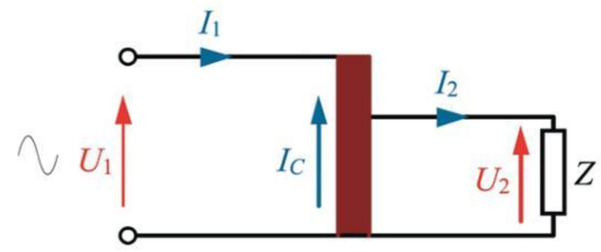


Figura 18.28. Autotransformador en carga.

18.2.1. Autotransformadores de regulación

Estos dispositivos son como los que hemos empleado para realizar los ensayos de cortocircuito de los transformadores.

Los autotransformadores son ideales para obtener una tensión variable mediante un sistema que sea capaz de ir poniendo en conexión las diferentes espiras del bobinado principal. Se construyen con contactos deslizantes o con contactos fijos seleccionados mediante un conmutador múltiple rotativo (Figura 18.29).





Figura 18.29. Autotransformador de regulación.

© Ediciones Paraninfo

18.3. Transformadores trifásicos

El transformador trifásico es el de más extensa aplicación en los sistemas de transporte y distribución de energía eléctrica. Dado que los niveles de energía que se manejan en estos casos son elevados, este tipo de transformadores se construyen para potencias nominales también elevadas.

Se puede decir que un transformador trifásico está constituido por tres transformadores monofásicos montados en un núcleo magnético común. Los principios teóricos que se han expuesto para los sistemas monofásicos son totalmente aplicables a los trifásicos, teniendo en cuenta que ahora se aplicarán a cada una de las fases de estos.

Para su construcción se emplea un núcleo de chapas magnéticas de grano orientado con tres columnas alineadas, tal como se muestra en la Figura 18.30. En cada una de estas columnas se arrollan los respectivos bobinados primarios y secundarios de cada una de las fases.

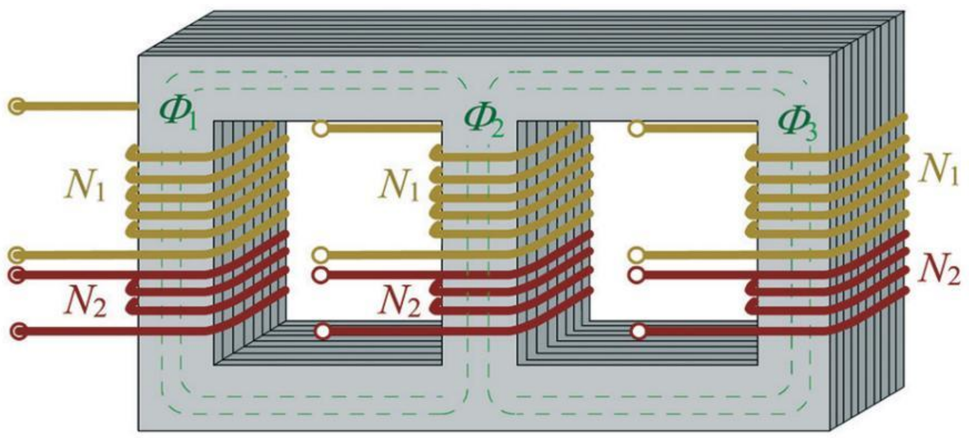


Figura 18.30. Circuitos magnéticos y eléctricos de un transformador trifásico.

Dado que el circuito magnético no es del todo simétrico, la corriente de vacío de la columna central es un poco más pequeña que la de las otras dos. Esto no afecta significativamente al funcionamiento del transformador.

Al igual que se hacía con los transformadores monofásicos, para evitar en lo posible los flujos de dispersión, se colocan en cada columna los bobinados de baja y alta tensión de cada una de las fases, bobinando primero, y sobre el núcleo el bobinado de baja tensión y encima de este el de alta tensión. En la Figura 18.31 se muestra el aspecto de un transformador trifásico.

También es posible la elaboración de un transformador trifásico a partir de tres monofásicos, constituyendo lo que se conoce por el nombre de **banco de tres transformadores monofásicos.**

Se constituye a partir de tres transformadores monofásicos de las mismas características eléctricas. Con las tres bobinas primarias conectadas en estrella o en triángulo, se forma el primario trifásico y con las tres secundarias monofásicas, conectadas también en estrella o triángulo, el secundario trifásico (Figura 18.32).

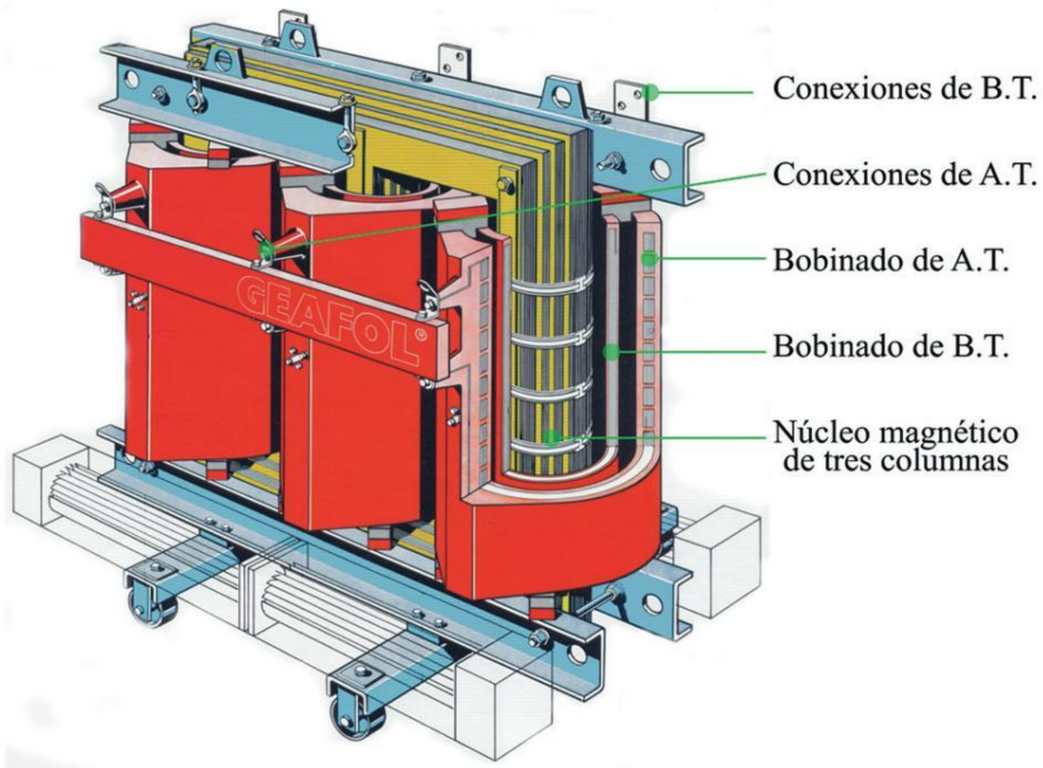


Figura 18.31. Transformador trifásico (GEAFOL).

El banco de transformadores monofásicos presenta alguna ventaja frente a los trifásicos, pero su mayor precio y peor rendimiento hace que sean utilizados en aplicaciones muy especiales. Las ventajas que poseen frente a los trifásicos son las siguientes: a) para potencias muy elevadas es más fácil su transporte por carretera; b) en caso de avería siempre hay que disponer de un transformador trifásico de reserva; en un banco es suficiente disponer de un monofásico de reserva, lo que abarata su coste y facilita la reparación de la fase estropeada.

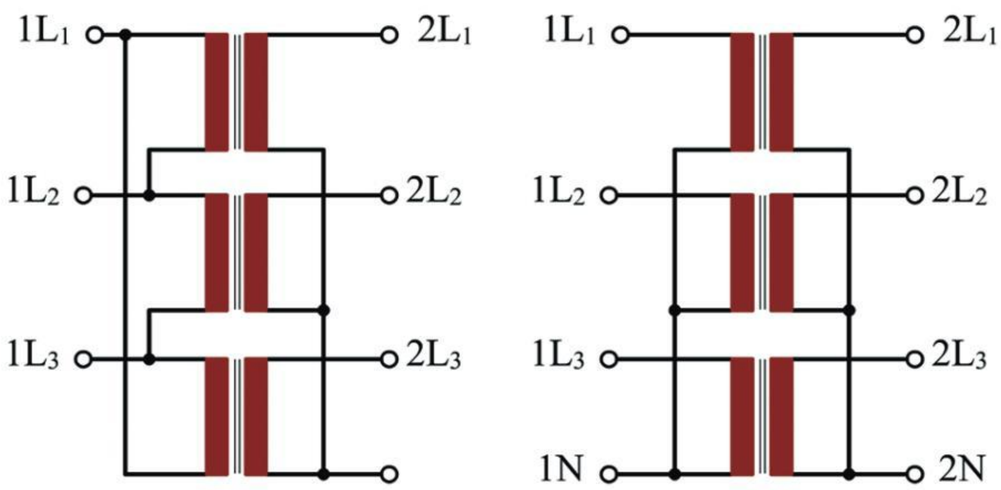


Figura 18.32. Banco de tres transformadores monofásicos: (a) conexión triángulo-estrella; (b) conexión estrella-estrella.

18.3.1. Conexiones de los transformadores trifásicos

Los bobinados de alta tensión de un transformador trifásico se pueden conectar en estrella (Y) o en triángulo (D).

Por otro lado, los bobinados de baja tensión se pueden conectar también en estrella (y) o en triángulo (d).

En la Figura 18.33 se muestra la denominación habitual de los terminales de los diferentes devanados de un transformador trifásico. Las letras mayúsculas U, V, W representan

© Ediciones Paraninfo

los principios de los devanados de alta tensión y X, Y, Z los finales de estos. Según la recomendación UNESA 5201-D sobre el marcado de bornes, los bornes de baja tensión se designan, de izquierda a derecha, por los símbolos 2U-2V-2W, mientras que los de alta tensión se designan con 1U-1V-1W

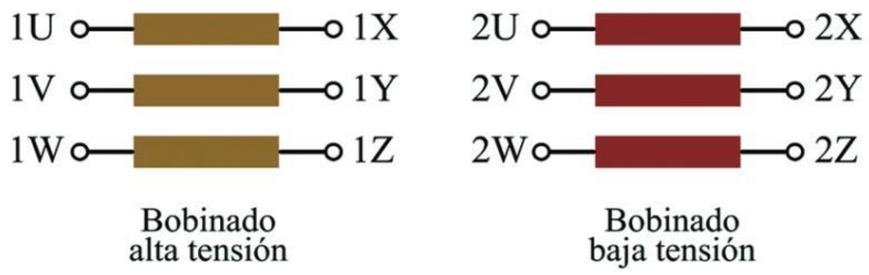


Figura 18.33. Denominación de terminales en un transformador trifásico.

En estrella se consigue que la tensión a la que queda sometida cada fase del transformador sea $\sqrt{3}$ veces menor que la tensión de línea, por lo que se consigue reducir el número de espiras en relación con la conexión en triángulo para una misma relación de transformación de las tensiones de línea. Por otro lado, la conexión en estrella hace circular una corriente por cada fase del transformador $\sqrt{3}$ veces mayor que en la conexión en triángulo, por lo que la sección de los conductores de las espiras aumenta en relación con la conexión en triángulo. Conectando el secundario en estrella se consigue disponer de neutro, lo que permite obtener dos tensiones de distribución y la posibilidad de conectar el neutro a tierra para garantizar la seguridad de las instalaciones.

En la Figura 18.34 se muestran los esquemas típicos de conexión de los transformadores trifásicos.

Cuando se conectan el primario y el secundario en estrella (Yy), por ejemplo, un transformador de distribución a dos tensiones que posea alta tensión en el primario, y se conectan cargas en el secundario fuertemente desequilibradas, aparece un fuerte desequilibrio de corrientes en el primario que, a su vez, provoca una asimetría de los flujos que hace que la tensión de salida aumente en las fases no cargadas y disminuya en las cargadas. Este fenómeno se reduce considerablemente si conectamos el primario en triángulo (Dy), pero eliminamos la posibilidad de conectar el neutro en el lado de alta tensión.

Una forma de evitar este fenómeno manteniendo el neutro consiste en conectar el secundario en zigzag (Yz), para lo cual se divide el bobinado de cada fase en dos partes iguales y se arrollan en sentido contrario y cada parte se conecta en serie con la columna consecutiva, tal como se muestra en la Figura 18.35. La conexión en zigzag resulta un poco más costosa por requerir un número de espiras mayor en el secundario respecto a una conexión en estrella.

En la práctica se emplea la conexión Dy para grandes transformadores y la conexión Yz se utiliza para pequeños transformadores en la red de baja tensión.

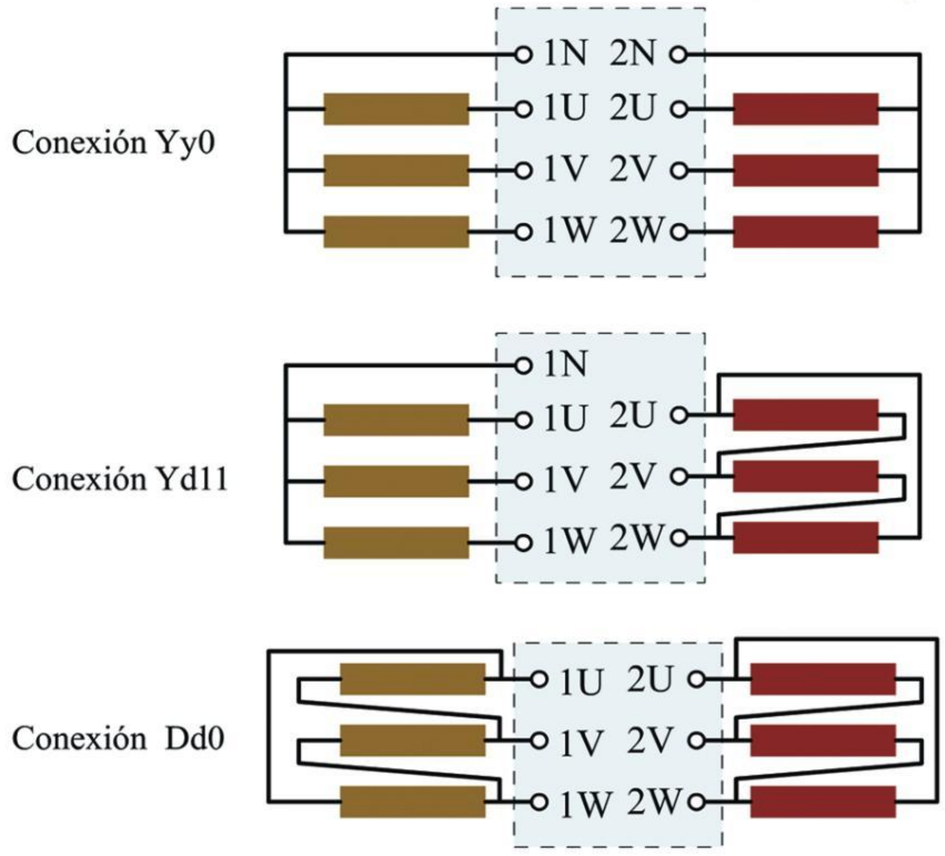


Figura 18.34. Conexiones del transformador trifásico.

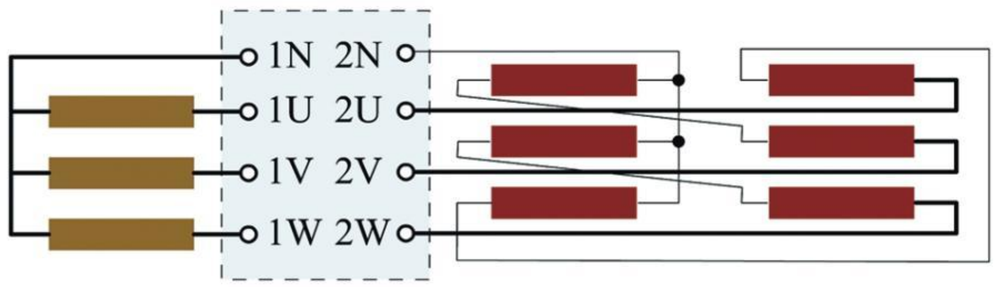


Figura 18.35. Transformador con el secundario en zigzag (Yz11).

18.3.2. Desfase entre el primario y el secundario de transformadores trifásicos

Cuando se conectan el primario y el secundario de la misma forma, por ejemplo, Yy o Dd, el ángulo de desfase entre el lado de alta tensión y el de baja puede ser 0º (en fase) o 180º (oposición de fase) según la posición de salida de los terminales. En el caso de que el primario y el secundario se conecten de diferente forma, por ejemplo, Dy, Yd, Yz, el desfase entre ambos bobinados podrá ser 150º o 180º.

Normalmente, se expresan estos resultados en forma horaria, de tal manera que la tensión primaria represente los minutos (siempre en las 12) y la secundaria las horas. Dado que la esfera de un reloj está dividida en 12 horas, cada hora equivale a 360º/12 = 30º. De esta forma, si un transformador presenta un desfase de 150º, el desfase representado en forma horaria será 150º/30º = 5 horas (Figura 18.36). Así, por ejemplo, un transformador con el lado de alta tensión conectado en estrella y el de baja tensión en triángulo para

© Ediciones Paraninfo

un desfase de 150º obtendríamos un grupo de conexión Yd5 y para un desfase de 330º un grupo de conexión Yd11.

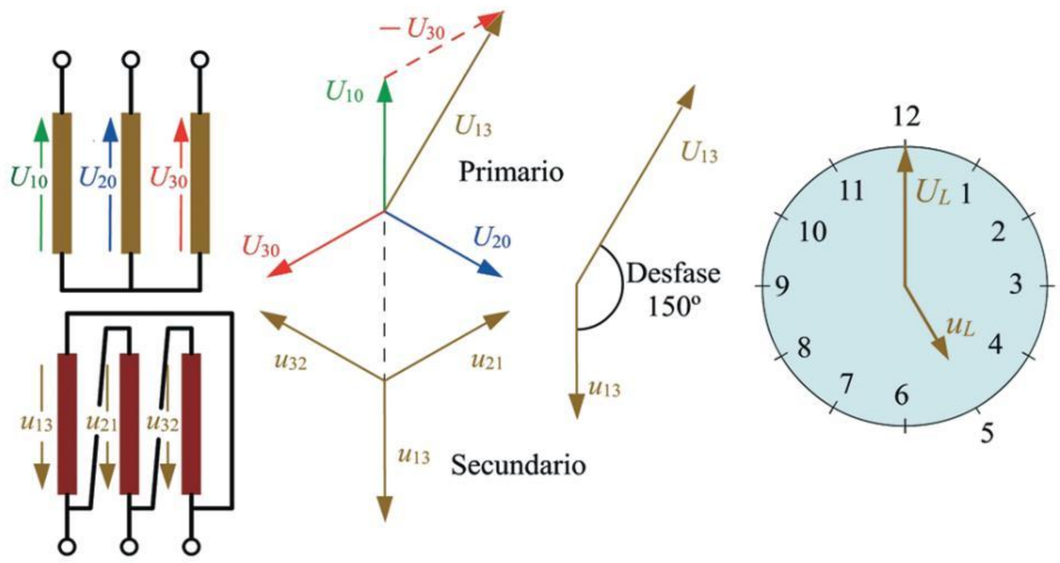


Figura 18.36. Representación horaria del desfase de un transformador en conexión Yd.

Seguidamente se indican los grupos de conexión más comunes:

Dd0, Yy0, Dz0, Dd6, Yy6, Dz6, Dy5, Yd5, Yz5, Dy11, Yd11, Yz11.

Los grupos de conexiones se indican en la placa de características de los transformadores.

18.3.3. Ensayo en vacío de un transformador trifásico

Este ensayo se lleva a cabo de la misma forma que para transformadores monofásicos. En la Figura 18.37 se muestra el esquema eléctrico del ensayo de un transformador conectado en estrella-estrella con los aparatos de medida utilizados. Para la medida de potencia se han empleado tres vatímetros con el fin de captar la diferencia que pudiera haber en cada fase. La suma de las lecturas de los tres vatímetros nos dará las pérdidas en el hierro del transformador.

$$P_{Fe} = W_1 + W_2 + W_3$$

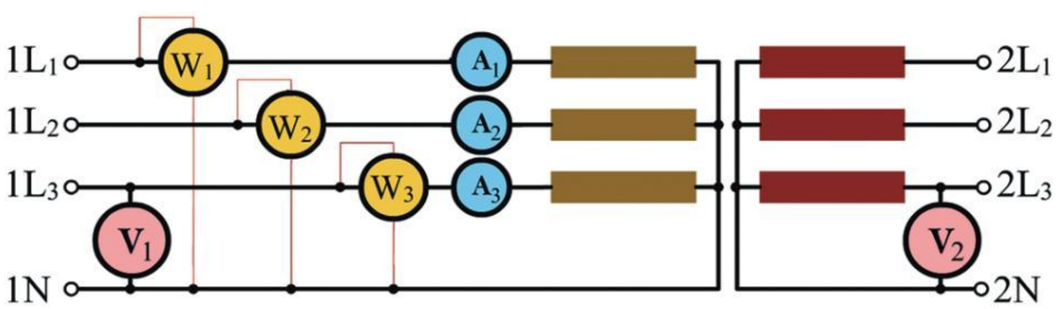


Figura 18.37. Esquema de conexiones para realizar el ensayo en vacío de un transformador trifásico.

Para calcular la relación de transformación del transformador aplicaremos la relación:

$$m_f = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_{1f}}{U_{2f}}$$

que es la relación de transformación de fase.

Si conectamos los voltímetros entre las fases del primario y del secundario obtendríamos la relación de transformación de línea $m_L = U_{L1}/U_{L2}$. Cuando ambos devanados se conectan de la misma forma, la relación de transformación de fase se hace igual a la línea. Pero cuando las conexiones son diferentes estas no coinciden. Por otro lado, a efectos prácticos, el dato que más nos interesa conocer de un transformador es su relación de transformación de línea.

Actividad resuelta 18.13

Al someter a un ensayo en vacío a un transformador trifásico de 250 kVA, 12.000/420 V, conectado en estrella-estrella y según el esquema de la Figura 18.37, se han obtenido los siguientes resultados: I_0 = 0,5 A; P_0 = 1.000 W; U_{1f} = 6.928 V; U_{2f} = 242 V. Determina: a) las pérdidas en el hierro; b) la corriente de vacío; c) la relación de transformación de fase.

Solución:

a) Las pérdidas en el hierro coinciden con las obtenidas por los tres vatímetros en el ensayo: P_{Fe} = 1.000 W.

b) La corriente de vacío es la indicada por los amperímetros en el ensayo: I_0 = 0,5 A.

c) La relación de transformación de fase la obtenemos con las lecturas de los voltímetros conectados entre la fase y neutro:

$$m_f = \frac{U_{1f}}{U_{2f}} = \frac{6.928}{242} = 26$$

18.3.4. Ensayo en cortocircuito de un transformador trifásico

Al igual que se hacía para los monofásicos, se cortocircuita el secundario y, mediante una fuente de C.A. alterna regulable, se hace que circule por el primario la intensidad nominal. En el esquema de la Figura 18.38 el voltímetro nos indica la tensión de cortocircuito, siempre y cuando esté conectado a una de las fases del transformador (para la conexión en estrella el voltímetro se conecta entre fase y neutro, mientras que para la conexión en triángulo se conecta entre fases).

© Ediciones Paraninfo

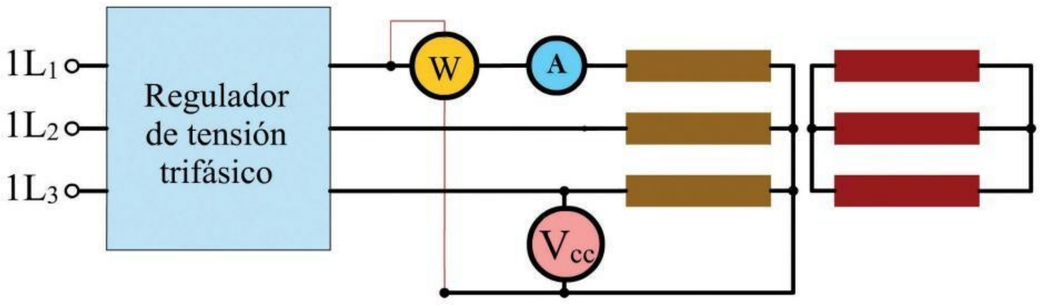


Figura 18.38. Esquema de conexiones para realizar el ensayo en cortocircuito de un transformador.

Como el sistema es equilibrado, podremos utilizar cualquiera de los métodos conocidos para medir la potencia trifásica en cortocircuito, que coincidirá con las pérdidas en el cobre. En el ensayo de la Figura 18.38 se ha utilizado el método de un vatímetro para medir dicha potencia (P_{Cu} = 3 W) en un transformador trifásico en conexión estrella-estrella.

Actividad resuelta 18.14

Al someter a un ensayo en cortocircuito a un transformador trifásico de 250 kVA, 12.000/420 V, conectado en triángulo-estrella, se ha medido una tensión de cortocircuito entre fases de 600 V y una potencia total de 4.000 W cuando fluía la intensidad nominal por el primario. Averigua: **a)** las pérdidas en el cobre y el factor de potencia de cortocircuito; **b)** la tensión porcentual de cortocircuito y sus componentes; **c)** la tensión compuesta en la carga cuando el transformador trabaje a plena carga y con un factor de potencia inductivo de 0,85; **d)** el rendimiento del transformador en estas condiciones si las pérdidas en el hierro son de 675 W; **e)** la intensidad de cortocircuito accidental por las fases del primario, así como por la línea de este. Calcula también la intensidad de cortocircuito del secundario.

Solución:

a) Como el ensayo se ha hecho para la corriente nominal, las pérdidas en el cobre coincidirán con la potencia de cortocircuito medida en el ensayo:

$$P_{Cu} = P_{cc} = 4.000 \text{ W}$$

El factor de potencia lo determinamos a partir de las lecturas de los diferentes aparatos de medida. Primero calcularemos la intensidad de línea nominal primaria:

$$I_{1L} = \frac{S_n}{\sqrt{3}\, U_{1L}} = \frac{250.000}{\sqrt{3} \cdot 12.000} = 12 \text{ A}$$

$$\cos \varphi_{cc} = \frac{P_{cc}}{\sqrt{3}\, U_{cc}\, I_{1L}} = \frac{4.000}{\sqrt{3} \cdot 600 \cdot 12} = 0{,}32 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \varphi_{cc} = 71{,}34°$$

b) La tensión de cortocircuito porcentual de cada una de las fases se determina a través de la tensión de cortocircuito medida en una de las fases; al estar en triángulo, la tensión entre fases medida coincide con dicha tensión.

$$u_{cc} = \frac{U_{cc}}{U_{1L}} \cdot 100 = \frac{600}{12.000} \cdot 100 = 5\ \%$$

$$u_{R_{cc}} = u_{cc} \cos \varphi_{cc} = 5 \cdot 0{,}32 = 1{,}6\ \%$$

$$u_{X_{cc}} = u_{cc} \text{ sen } \varphi_{cc} = 5 \cdot \text{sen } 71{,}34° = 4{,}73\ \%$$

c) Para determinar la tensión en la carga habrá que determinar previamente el coeficiente de regulación correspondiente:

$$\varepsilon = u_{R_{cc}} \cos \varphi + u_{X_{cc}} \text{ sen } \varphi =$$
$$= 1{,}6 \cdot 0{,}85 + 4{,}73 \cdot 0{,}53 = 3{,}87\ \%$$

Por lo que la caída de tensión que se producirá será de:

$$u = \frac{E_2}{100} \cdot \varepsilon = \frac{420}{100} \cdot 3{,}87\ \% = 16{,}3 \text{ V}$$

La tensión que se presenta en la carga es:

$$U_2 = E_2 - u = 420 - 16{,}3 = 403{,}7 \text{ V}$$

d) El rendimiento lo calculamos mediante la expresión:

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{Fe} + P_{Cu}} \cdot 100 = \frac{S \cos \varphi}{S \cos \varphi + P_{Fe} + P_{Cu}} \cdot 100$$

$$\eta = \frac{250.000 \cdot 0{,}85}{250.000 \cdot 0{,}85 + 675 + 4.000} \cdot 100 = 97{,}8\ \%$$

e) La intensidad de cortocircuito accidental por fase del primario la determinamos con la expresión ya conocida:

$$I_{cc(f)} = \frac{100}{u_{cc}}\, I_{1n(f)}$$

Para lo cual determinamos primero la intensidad por la fase del primario del transformador conectado en triángulo:

$$I_{1n(f)} = I_{1L} / \sqrt{3} = 12 / \sqrt{3} = 6{,}93 \text{ A}$$

$$I_{cc1(f)} = \frac{100}{5} \cdot 6{,}93 = 138{,}6 \text{ A}$$

En la línea aparecerá una intensidad de cortocircuito igual a:

$$I_{cc1(L)} = \sqrt{3}\, I_{cc(f)} = \sqrt{3} \cdot 138{,}6 = 240 \text{ A}$$

Para calcular la corriente de cortocircuito del secundario primero calculamos la intensidad nominal por el mismo. En el secundario aparecerá una corriente de cortocircuito igual a:

$$I_{2L} = \frac{S_n}{\sqrt{3}\, U_{2C}} = \frac{250.000}{\sqrt{3} \cdot 420} = 344 \text{ A}$$

$$I_{cc2(f)} = \frac{100}{5} \cdot 344 = 6.880 \text{ A}$$

© Ediciones Paraninfo

Actividad propuesta 18.2

En la Tabla 18.3 se expresan las características de cuatro transformadores monofásicos y los resultados obtenidos al someterles los ensayos de vacío y cortocircuito según las Figuras 18.37 y 18.38. Con estos datos averigua: m, I_{1n}, I_{2n}, u_{cc}, $u_{R_{cc}}$, $u_{X_{cc}}$, I_{cc1}, I_{cc2}, ε, P_{Fe}, P_{Cu}, tensión a plena carga en el secundario y rendimiento a plena carga para el *FP* indicado.

Tabla 18.3.

Ejercicio	1.º	2.º	3.º	4.º
Conex.	Yy	Yd	Dy	Dd
S_n (VA)	4.000	10.000	25.000	50.000
V_1 (V)	420	398	10.000	24.000
V_2 (V)	242	230	242	420
V_{cc} (V)	20	15	60	100
P_0 (W)	50	100	130	200
P_{cc} (W)	150	300	800	1.300
Cos φ	0,9 induc.	0,8 induc.	0,8 capc.	0,7 induc.

Nota: Tanto la tensión de cortocircuito como las tensiones de vacío se han medido siempre con un voltímetro entre las fases del transformador.

La solución a esta Actividad propuesta la puedes encontrar dentro del MATERIAL WEB elaborado para este texto.

18.3.5. Conexión en paralelo de transformadores

En ciertas ocasiones es necesario acoplar transformadores en paralelo para conseguir así aumentar la potencia de salida. Para hacerlo, se deberán cumplir las siguientes condiciones:

a) Los valores instantáneos de las tensiones de salida deben ser iguales, por lo que siempre habrá que conectar los transformadores con el mismo orden de fases en la salida. Además, el desfase correspondiente al grupo de conexión de ambos transformadores debe ser el mismo.

Una forma de comprobar este último extremo consiste en verificar con un voltímetro si existe diferencia de potencial entre cada uno de los terminales de salida a conectar, tal como se muestra en la Figura 18.39.

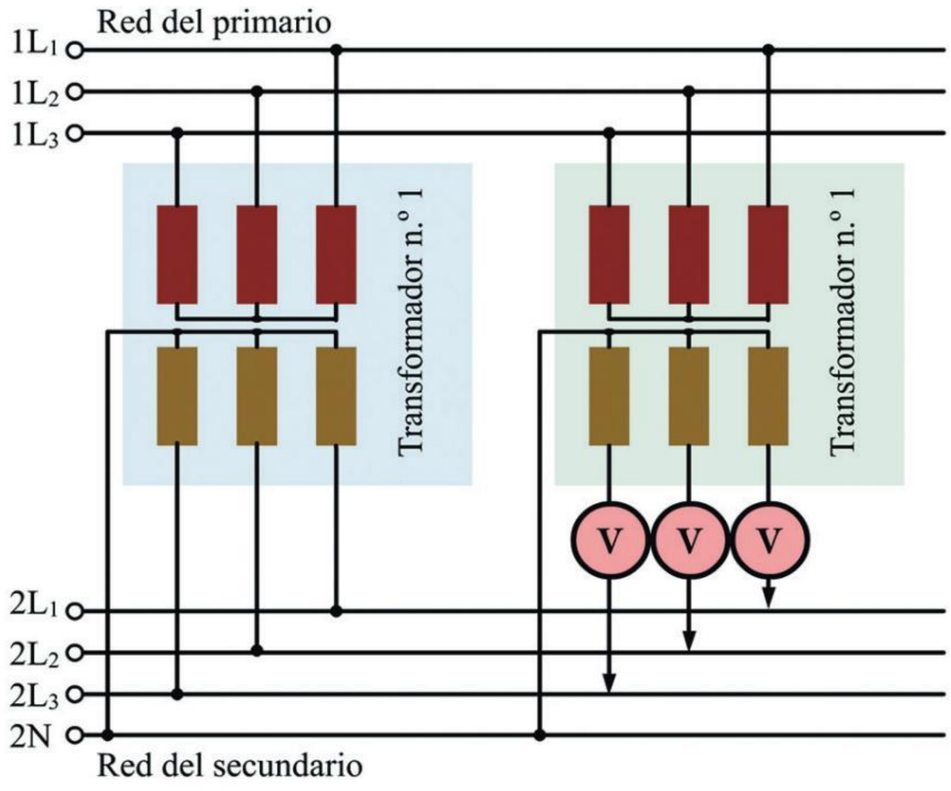


Figura 18.39. Verificación de terminales antes de conectar dos transformadores en paralelo.

b) El reparto de potencia de cada uno de los transformadores dependerá de la impedancia de cortocircuito que posea cada uno de ellos, de tal forma que suministrará más potencia el que tenga menor impedancia. Normalmente se conoce la tensión de cortocircuito u_{cc}, que es proporcional a dicha impedancia, por lo que hay que procurar conectar transformadores que posean la misma potencia nominal y la misma tensión de cortocircuito. En el caso de que las potencias nominales de los transformadores sean diferentes, estas no deben diferenciarse en más del triple, y la tensión de cortocircuito del más pequeño debe ser superior a la del más grande, de tal forma que el reparto de cargas entre ambos transformadores sea equitativo respecto a sus potencias nominales.

18.3.6. Refrigeración de los transformadores

Si el calor que se produce en los transformadores por efecto de las pérdidas no se evacua convenientemente se puede producir la destrucción de los materiales aislantes de los devanados. Para evacuar este calor se emplean diferentes métodos de refrigeración en función de la potencia nominal del transformador y la ubicación de este, como por ejemplo:

Para transformadores de pequeña potencia (hasta 50 kVA) la refrigeración se realiza aprovechando el aire que los envuelve. Para ello se construye la cubierta con unas aberturas, con el fin de que el aire pueda circular de una forma natural por los transformadores (ventilación por convección). En el caso de que esta ventilación no fuese suficiente, se añaden ventiladores que fuerzan la refrigeración del transformador.

© Ediciones Paraninfo

Para transformadores de distribución de media potencia (menos de 200 kVA) se sumergen en aceite mineral o silicona. El aceite transmite el calor del transformador al exterior por convección natural. Además, con el aceite se consigue mejorar el aislamiento de los devanados de alta tensión (Figura 18.40).

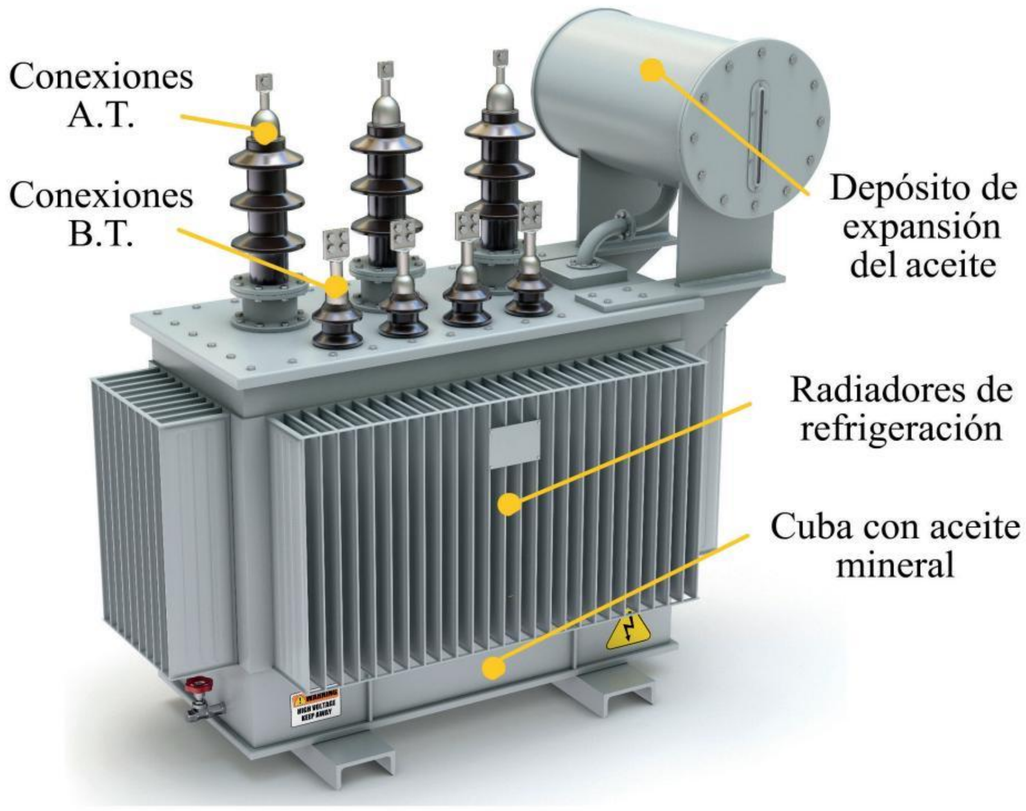


Figura 18.40. Transformador trifásico con refrigeración por aceite.

Para transformadores de distribución de gran potencia se añaden aletas de refrigeración en la cubierta exterior del transformador. Además se hace circular el aceite caliente desde el interior del transformador hacia dichas aletas con el fin de acelerar el proceso de refrigeración. Para transformadores de más potencia se pueden añadir ventiladores que fuerzan la evacuación de los radiadores externos (Figura 18.41).



Figura 18.41. Transformador trifásico de gran potencia con refrigeración forzada.

En los transformadores con aceite, este tiende a dilatarse con los aumentos de temperatura, por lo que para evitar sobrepresiones se coloca sobre la cuba de aceite un **depósito de expansión** de forma cilíndrica a medio llenar y en contacto con el exterior mediante un orificio. Para evitar la entrada de humedad del exterior al depósito, que podría alterar las cualidades del aceite, se coloca una especie de filtro que absorbe la humedad que pudiera entrar del exterior. Este dispositivo se conoce por el nombre de **desecador** y suele ir dotado de sales absorbentes de la humedad, como por ejemplo el silicagel. Cuando el desecador, con el tiempo, se satura de humedad cambia de color, lo que nos indica que hay que renovar las sustancias de absorción.

Con el fin de dotar al sistema de refrigeración por aceite de un sistema de protección adecuado ante una sobrepresión en el circuito, se instala en el mismo el **relé Buchholz.** Este dispositivo se intercala en el circuito de refrigeración entre la cuba y el depósito de expansión. En caso de sobrepresiones en el circuito de refrigeración, bien ocasionadas por un cortocircuito o por una falta de aislamiento, el relé Buchholz puede desconectar el transformador o provocar una señal de alarma, dependiendo de la gravedad del incidente. También actúa en caso de un descenso rápido del nivel de aceite provocado por una fuga de este.

Para conocer en todo momento la temperatura del refrigerante se colocan termómetros, que nos indican en todo momento el grado de sobrecarga del transformador.

18.3.7. Características de un transformador

Es importante conocer los datos característicos que es necesario aportar para realizar la adquisición de un transformador comercial para una determinada aplicación. Seguidamente indicamos los más relevantes:

- Potencia nominal asignada en kVA.
- Tensión primaria y secundaria.
- Regulación de tensión en la salida ± %.
- Grupo de conexión.
- Frecuencia.
- Normas de aplicación.
- Temperatura máxima ambiente (si es > 40º).
- Altitud de la instalación sobre el nivel del mar (si es > 1.000 m).
- Accesorios opcionales.
- Instalación en interior o bien a la intemperie.

Para determinar la potencia nominal se calcula el consumo máximo de potencia aparente previsible. Además se le añade una reserva de potencia por los posibles incrementos

© Ediciones Paraninfo

de potencia que se pudieran dar por ampliación de las instalaciones.

Para transformadores de distribución se opta por una tensión de cortocircuito porcentual u_{cc} del 4 %, con lo que se consigue reducir la caída de tensión del transformador a niveles reducidos. Por otro lado, para transformadores de gran potencia que operan en redes industriales se prefiere la utilización de una tensión de cortocircuito del 6 %, con lo que se evitan intensidades de cortocircuito elevadas.

Para alturas superiores a los 1.000 m sobre el nivel del mar disminuyen las propiedades de los refrigerantes utilizados, así como la resistencia del aire. A esto se debe que para la instalación de transformadores en zonas que se superen los 1.000 m sea necesario indicárselo al fabricante.

En el caso de instalaciones en las que la temperatura del recinto donde se va a emplazar el transformador sea superior a los 40º también es necesario indicarlo al fabricante, ya que esto puede afectar a la potencia nominal del transformador o al reforzamiento de los equipos de refrigeración.

Consulta en el REBT la Instrucción Técnica ITC-BT 48 sobre la instalación de transformadores.

18.4. Ensayos para transformadores monofásicos y trifásicos

Una vez acabada la construcción de los transformadores es necesario realizar una serie de ensayos con el fin de comprobar sus características. Para realizar estas pruebas será necesario seguir fielmente las normas reglamentarias que se indiquen en cada país, como, por ejemplo, las normas UNE (Una Norma Española), CENELEC (Comité Electrotécnico para la Normalización Electrotécnica, CEI (Comité Electrotécnico Internacional), etcétera.

Los ensayos que se pueden realizar son muy variados; entre ellos cabe destacar los siguientes:

- Medida de la resistencia de los arrollamientos.
- Medida de la relación de transformación y grupo de conexión.
- Ensayo en vacío.
- Ensayo en cortocircuito.
- Obtención de la característica exterior.
- Medida del rendimiento.
- Ensayos de calentamiento.
- Ensayos de aislamiento.

Para la medida de la resistencia de los arrollamientos del primario y del secundario la mejor opción consiste en utilizar puentes de medida que aseguren una gran precisión en su resultado. Téngase en cuenta que la resistencia que se va a medir es bastante baja. En el caso de transformadores trifásicos habrá que tener en cuenta la conexión del arrollamiento, de tal forma que si, por ejemplo, están conectados en estrella, al aplicar el óhmetro entre dos terminales se tome la medida de la resistencia de dos bobinas conectadas en serie.

Para la medida de la relación de transformación se pueden utilizar dos voltímetros de similares características, conectados uno en el primario y otro en el secundario y con el transformador funcionando en vacío, procediéndose como se indicó en el ensayo en vacío.

En el caso de tener que acoplar dos transformadores en paralelo es necesario que ambos sean del mismo grupo de conexión. Una forma de comprobarlo es medir la tensión entre cada uno de los terminales a conectar en el secundario de ambos transformadores, tal como ya indicamos en el Apartado 18.13.

Para obtener la característica exterior del transformador (tensión en bornes de la carga para diferentes corrientes de carga y factores de potencia) se pueden utilizar dos procedimientos: método directo e indirecto. El método directo consiste en tomar lectura de tensión, corriente y factor de potencia cuando se somete al transformador a diferentes regímenes de carga (óhmico, inductivo, capacitivo). Este método solo se utiliza para pequeños transformadores y de tensiones no muy elevadas. Para transformadores de gran potencia se pueden utilizar métodos indirectos, como el de *Kapp*, que consiste en realizar un estudio gráfico del diagrama de caída de tensión de un transformador, haciéndolo extensivo para diferentes corrientes de carga y factor de potencia.

La medida del rendimiento se realiza de forma indirecta, tomando los resultados de las pérdidas en el hierro y el cobre obtenidas de los ensayos en vacío y cortocircuito.

Para cualquier tipo de transformador es importante conocer su temperatura normal de trabajo. Además, siempre habrá que procurar que la temperatura no supere los límites indicados en las normas. Las temperaturas que más interesa conocer son las de los devanados y las del refrigerante (aceite mineral, silicona, piraleno, etc.). Para la medida de la temperatura de las diferentes partes del transformador se pueden utilizar termómetros o termopares. La medida de la temperatura de los devanados también se puede determinar teniendo en cuenta el aumento de resistencia, experimentado por los mismos al conectar la carga en el transformador. Para ello se emplearán las expresiones ya estudiadas en la Unidad 2 de esta obra.

El estado de los aislamientos en un transformador es muy importante para alargar su vida y reducir las averías. Para comprobar los aislamientos de un transformador se pueden realizar distintas pruebas mediante un megóhmetro o megger, como: medida de resistencia entre conductores y masa, medida de resistencia entre conductores, medida de rigidez dieléctrica del aceite.

© Ediciones Paraninfo

Comprobación práctica en el laboratorio

18.1. Ensayo en vacío de un transformador monofásico. Consigue un transformador monofásico, anota sus características nominales y realiza el ensayo en vacío del mismo (Figura 18.42). Una vez tomadas las lecturas de los aparatos de medida, determina:

- La relación de transformación (m).
- La corriente de vacío (I_0).
- Las pérdidas en el hierro (P_{Fe}).

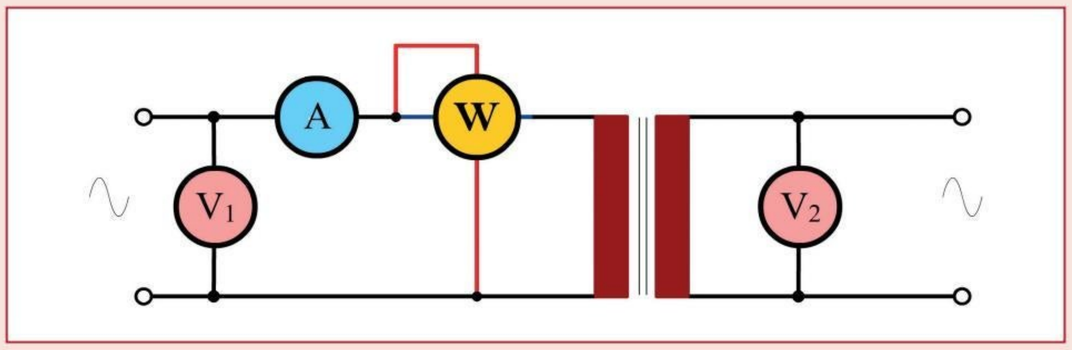


Figura 18.42. Ensayo en vacío de un transformador monofásico.

18.2. Ensayo en cortocircuito de un transformador monofásico. Con el mismo transformador utilizado en la actividad anterior, realiza los ensayos en cortocircuito (Figura 18.43). Una vez tomadas las lecturas de los aparatos de medida, determina:

- Los parámetros R_{cc}, X_{cc} y Z_{cc}.
- Tensión de cortocircuito porcentual y sus componentes.
- Las pérdidas en el cobre.
- Intensidad de cortocircuito accidental.
- Rendimiento a plena carga y *FP* de 0,8.
- Tensión en el secundario a plena carga y *FP* de 0,8.

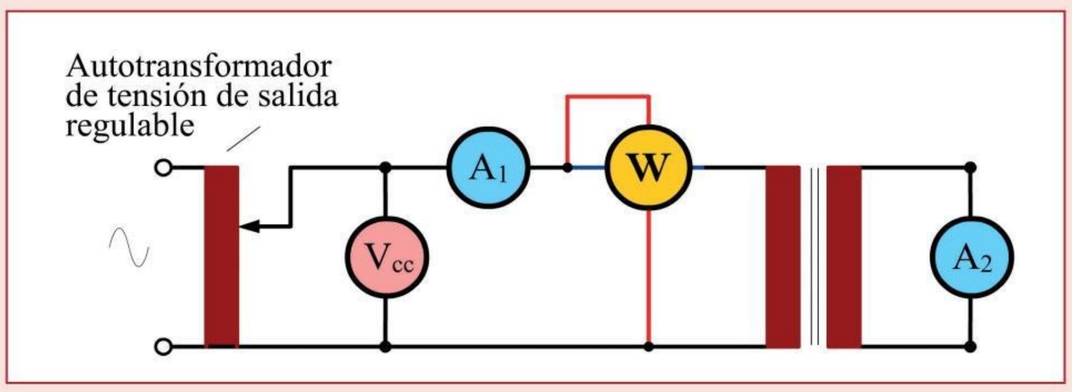


Figura 18.43. Ensayo en cortocircuito de un transformador monofásico.

18.3. Ensayo en vacío de un transformador trifásico. Consigue un transformador trifásico, anota sus características nominales y realiza el ensayo en vacío del mismo (Figura 18.44). Una vez tomadas las lecturas de los aparatos de medida, determina:

- La relación de transformación (m).
- La corriente de vacío (I_0).
- Las pérdidas en el hierro (P_{Fe}).

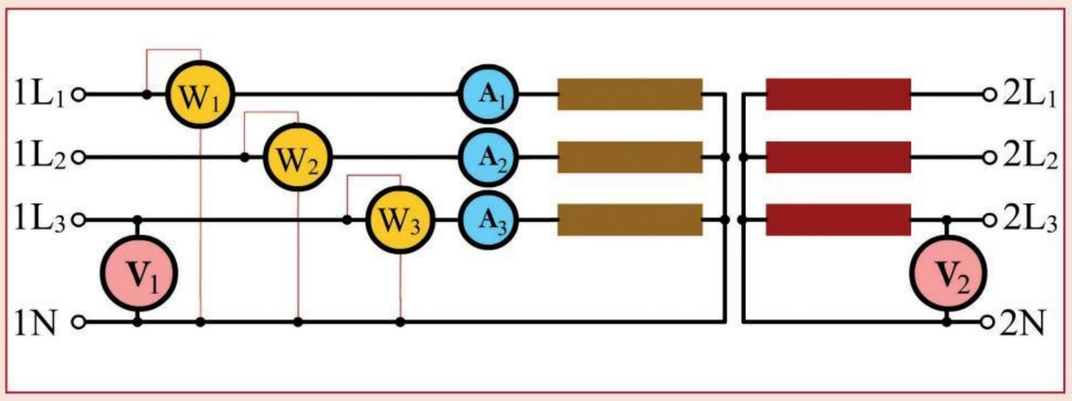


Figura 18.44. Ensayo en vacío de un transformador trifásico.

18.4. Ensayo en cortocircuito de un transformador trifásico. Con el mismo transformador utilizado en la actividad anterior, realiza los ensayos en cortocircuito (Figura 18.45). Una vez tomadas las lecturas de los aparatos de medida, determina:

- Los parámetros R_{cc}, X_{cc} y Z_{cc}.
- Tensión de cortocircuito porcentual y sus componentes.
- Las pérdidas en el cobre.
- Intensidad de cortocircuito accidental.
- Rendimiento a plena carga y *FP* de 0,8.
- Tensión en el secundario a plena carga y *FP* de 0,8.

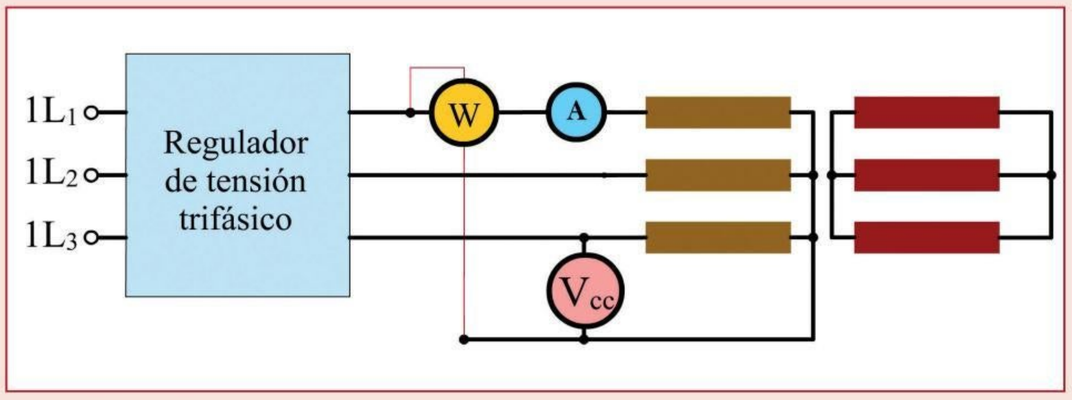


Figura 18.45. Ensayo en cortocircuito de un transformador trifásico.

18.5. Caída de tensión de un transformador. Vamos a analizar cómo varía la tensión de salida de un transformador monofásico. Para ello conecta a su salida un voltímetro y un amperímetro, para después ir conectando diferentes cargas de carácter variable (resistencias, inductancia, condensadores). Anota los resultados y comprueba la dependencia de la caída de tensión de un transformador con el factor de potencia y la corriente de la carga.

© Ediciones Paraninfo

Actividades de comprobación

18.1. Los transformadores se utilizan para:

a) Cambiar la tensión y corriente en líneas de C.A.

b) Cambiar la tensión y corriente en líneas de C.C.

c) Cambiar la potencia en líneas de C.A.

18.2. ¿Cómo se consigue transferir la energía eléctrica del primario al secundario de un transformador?

a) Gracias a los fenómenos de histéresis y Foucault.

b) A través del núcleo de hierro común, que hace de contacto eléctrico entre ambos devanados.

c) A través del núcleo de hierro común y mediante un campo magnético variable.

18.3. ¿Cómo es posible aumentar la potencia nominal de un transformador comercial?

a) Elevando la tensión del primario.

b) Refrigerándolo.

c) Elevando el factor de potencia de la carga.

18.4. ¿De qué depende fundamentalmente la fuerza electromotriz inducida en el secundario de un transformador?

a) Del número de espiras del secundario.

b) De la corriente por el secundario.

c) De la potencia nominal del transformador.

18.5. ¿Qué ocurre si se aplica a un transformador una tensión superior a la nominal?

a) Que la tensión por el secundario aumenta en la misma proporción sin apreciarse cambios considerables en el comportamiento del transformador.

b) La corriente de vacío tiende a elevarse a valores peligrosos para el transformador.

c) Aumenta la potencia nominal del transformador.

18.6. ¿De qué dependen las pérdidas en el cobre de un transformador?

a) De la corriente suministrada por el transformador y de la resistencia de los devanados.

b) De la calidad del cobre utilizado.

c) De la relación de transformación.

18.7. Las pérdidas en el hierro de un transformador:

a) Son producidas por los efectos combinados de la histéresis y corrientes parásitas.

b) Se determinan con el ensayo en cortocircuito.

c) No cambian apreciablemente porque el transformador trabaje en vacío o en carga.

18.8. Averigua la relación de transformación y la tensión en el secundario de un transformador ideal con 5.000 espiras en el primario y 500 en el secundario. ¿Qué tensión aparece en el secundario si se conecta el primario a una red de C.A. de 230 V, 50 Hz?

18.9. Un transformador monofásico posee 350 espiras en el primario y 1.750 en el secundario. El flujo máximo que aparece en el núcleo magnético es de 4 mWb.

Determina las tensiones en el primario y en el secundario para una frecuencia de 60 Hz, así como la relación de transformación (considera el transformador como ideal).

18.10. Un transformador monofásico reductor de 400/110 V proporciona energía a un equipo frigorífico de 1.500 W, 110 V, cos φ = 0,6. Suponiendo la corriente de vacío y las pérdidas despreciables, determina la intensidad por el primario y por el secundario, así como la relación de transformación del mismo.

18.11. Al someter a un ensayo de vacío a un transformador monofásico de 5 kVA, 10.000/398 V, 50 Hz, se obtienen los siguientes resultados: V_1 = 10.000 V, V_2 = 398 V, A = 0,15 A y W = 20 W. Determina la relación de transformación, las pérdidas en el hierro y la corriente de vacío.

18.12. Al realizar un ensayo en cortocircuito a un transformador monofásico de 100 kVA, tensiones 6.000/230 V, es necesario aplicar al lado de alta tensión una tensión de 250 V para que por el primario circule la corriente nominal. Si la potencia absorbida en el ensayo es de 1.571 W, averigua:

a) Las corrientes nominales del primario y del secundario.

b) Las pérdidas en el cobre para la potencia nominal.

c) La tensión de cortocircuito y sus componentes.

d) Los parámetros R_{cc}, X_{cc} y Z_{cc}.

e) Las pérdidas en el cobre cuando el transformador trabaje a 3/4 partes de su potencia nominal.

18.13. Se desea determinar el valor efectivo de la tensión de salida de un transformador monofásico a plena carga con un *FP* de 0,8. Las características del transformador son: 100 kVA; 2.000/230 V; $u_{R_{cc}}$ = 3,7 %; $u_{X_{cc}}$ = 2,3 %. Averigua también el valor efectivo de la corriente de cortocircuito en ambos devanados y la tensión en la carga cuando el transformador suministre una potencia de 25 kVA con un factor de potencia de 0,8.

© Ediciones Paraninfo

18.14. Las características de un transformador monofásico son las siguientes: 50 kVA, 400/230 V, potencia de ensayo en vacío = 100 W, potencia de ensayo en cortocircuito = 300 W. Determina el rendimiento a plena carga y cos $\varphi = 0{,}87$.

18.15. Se desea determinar el valor efectivo de la tensión de salida y el rendimiento de un transformador monofásico a plena carga con un *FP* inductivo de 0,85. Las características del transformador son: 10 kVA, 398/230 V. En el ensayo de cortocircuito se han obtenido los siguientes resultados: ha consumido 360 W al aplicar una tensión de 16 V cuando circulaba una corriente por el primario de 25 A. En el ensayo en vacío se ha medido una potencia de 90 W. Averigua también la corriente de cortocircuito en ambos devanados.

18.16. ¿Qué ventajas presentan los bancos de transformadores monofásicos para sistemas trifásicos?

a) Son más económicos.

b) Fácil transporte por carretera de transformadores de gran potencia.

c) Poseen un mayor rendimiento.

18.17. Un transformador trifásico con un grupo de conexión Dz6 indica que:

a) Devanado de alta tensión conectado en triángulo, el de baja en zigzag y un desfase de 0°.

b) Devanado de baja tensión conectado en triángulo, el de alta en zigzag y un desfase de 180°.

c) Devanado de alta tensión conectado en triángulo, el de baja en zigzag y un desfase de 180°.

18.18. ¿Qué consideraciones hay que tener en cuenta para poder acoplar dos transformadores en paralelo?

a) El grupo de conexión ha de ser el mismo.

b) Su potencia nominal debe ser exactamente igual.

c) Para potencias nominales iguales en ambos transformadores sus caídas de tensión de cortocircuito pueden ser diferentes.

18.19. Los datos obtenidos al someter a un transformador trifásico de 100 kVA, 12.000/398 V con un grupo de conexión Dy5, a un ensayo en vacío son: potencia trifásica absorbida = 400 W; corriente medida en la línea del lado de alta tensión = 0,2 A. Determina:

a) La relación de tensiones de fase y de línea.

b) La corriente de vacío.

c) Las pérdidas en el hierro.

18.20. Los datos obtenidos al someter a un transformador trifásico de 250 kVA, 17,5 kV/398 V con un grupo de conexión Dy11, a un ensayo en cortocircuito son: potencia trifásica absorbida = 4.010 W; corriente medida en la línea del lado de alta tensión = 8,25 A; tensión medida entre fases del primario = 700 V. En el ensayo en vacío se han medido 675 W. Determina:

a) Las pérdidas en el cobre y el factor de potencia de cortocircuito.

b) La tensión porcentual de cortocircuito y sus componentes.

c) Tensión compuesta en la carga cuando el transformador trabaje a plena carga y con un factor de potencia inductivo de 0,85.

d) Rendimiento del transformador en estas condiciones.

e) La intensidad de cortocircuito accidental por las fases del primario.

Actividades de evaluación resueltas

A continuación se dan los enunciados de una serie de actividades de evaluación. Estas actividades las podrás encontrar resueltas accediendo al MATERIAL WEB creado para este texto.

18.1. Un transformador monofásico de relación de transformación 400 V/9 V se utiliza para alimentar una carga de 2,25 Ω de impedancia y factor de potencia 0,8 inductivo, conectada en el lado de menor tensión. El transformador se supone ideal. Se aplica al primario del transformador una tensión de 400 V. Halla:

a) Intensidad en los devanados primario y secundario.

b) Potencias activa, reactiva y aparente consumidas por la carga.

c) Calcula de nuevo las intensidades en los devanados, pero, en esta ocasión, suponiendo que se conecta el secundario a la carga con un cable que tiene una resistencia de 0,1 Ω (se admite que la inductancia del cable es nula).

18.2. Un transformador monofásico de 10 MVA, 66.000 V/15.000 V y 50 Hz se ha sometido a ensayos en los que se han obtenido los resultados siguientes: (1) Ensayo de vacío (lado de menos tensión) (U_0 = 15.000 V; I_0 = 62 A; P_0 = 340 kW); (2) Ensayo en cortocircuito

© Ediciones Paraninfo

(lado de mayor tensión) (U_{cc} = 8.640 V; I = 151,52 A; P_{cc} = 795 kW).

a) Calcula las componentes activa y reactiva de la corriente de vacío.

b) Determina la relación de transformación.

c) Halla los valores de los elementos del circuito equivalente del transformador, referidos al lado en el que se haya hecho el ensayo (resistencia de cortocircuito y reactancia de cortocircuito).

18.3. Ensayando un transformador monofásico de 50 kVA, absorbe en vacío 500 W y en cortocircuito, a la corriente nominal, 1.400 W.

a) Calcula el rendimiento a plena carga con factor de potencia 0,8.

b) Calcula el rendimiento máximo para el mismo factor de potencia 0,8.

18.4. Los arrollamientos primario y secundario de un transformador monofásico ideal poseen 500 y 125 espiras, respectivamente. Su potencia nominal es de 5 kVA. Aplicamos al primario una tensión alterna de 400 V de valor eficaz. Calcula:

a) La relación de transformación de la máquina.

b) La tensión resultante en el secundario.

c) Los valores de intensidad nominal que circulan por el primario y el secundario.

d) Los valores de intensidad de corriente que circularán por el primario y el secundario, si conectamos en el secundario una carga de P = 3 kW con factor de potencia 0,8.

18.5. Un transformador monofásico de 230 V/110 V, trabaja en condiciones normales suministrando una potencia de 200 W a una carga con factor de potencia 0,85. Calcula:

a) La relación de transformación.

b) La intensidad de corriente en el secundario del transformador.

c) La intensidad de corriente en el primario del transformador.

18.6. El primario de un transformador ideal tiene 440 espiras y su secundario 50 espiras. Se alimenta el transformador por su devanado primario a una tensión de 220 V (valor eficaz) y se conecta al secundario una impedancia compleja de valor 6 + j8 Ω. Calcula:

a) Valor eficaz de la tensión del secundario.

b) Valor eficaz de la intensidad en el devanado secundario (I_2).

c) Potencias activa y reactiva absorbidas por la impedancia.

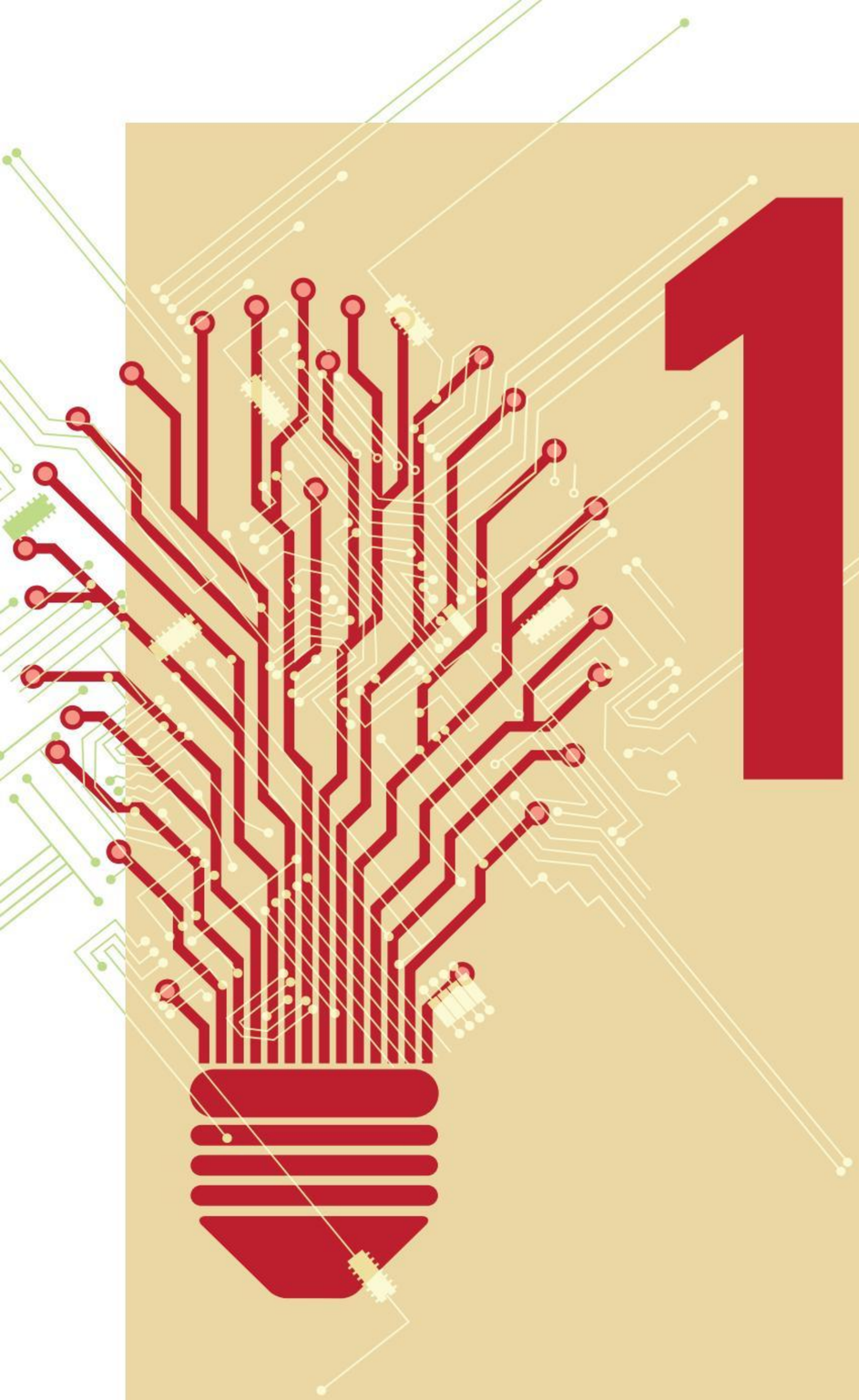
d) Potencias activa y reactiva cedidas por la alimentación.

18.7. Un transformador monofásico reductor, supuesto sin pérdidas y alimentado a una tensión de 380 V, absorbe una corriente de 3 A. Siendo la relación nominal de transformación m = 1,73; calcula la corriente y la potencia aparente del secundario.

Actividades de ampliación

Con el fin de conseguir una mayor profundización en la materia, se han incluido los enunciados de una serie de ***«actividades de evaluación propuestas de ampliación (18)»*** para esta unidad que podrás encontrar dentro del MATERIAL WEB elaborado para este texto. Selecciona alguna de estas actividades y encuentra su solución.

© Ediciones Paraninfo



19 Máquinas eléctricas de corriente continua

Contenidos

- **19.1.** Clasificación de las máquinas eléctricas
- **19.2.** Principio de funcionamiento de los generadores de C.C.
- **19.3.** Constitución de una máquina de C.C.
- **19.4.** Fuerza electromotriz generada por una dinamo
- **19.5.** Tipos de excitación de las dinamos
- **19.6.** Ensayos en una dinamo
- **19.7.** Principio de funcionamiento del motor de C.C.
- **19.8.** Características de los motores de C.C.
- **19.9.** Conexión de los motores de C.C.
- **19.10.** Inversión del sentido de giro de los motores de C.C.
- **19.11.** Regulación y control de los motores de C.C.
- **19.12.** Ensayos de los motores de C.C.

Una dinamo es una máquina que produce energía eléctrica en forma de C.C.

En la actualidad, la generación de C.C. se realiza mediante pilas y acumuladores o se obtiene de la conversión de C.A. a C.C. con las fuentes de alimentación. El uso de la dinamo para la producción de energía eléctrica se estuvo utilizando hasta la llegada de los alternadores.

Los motores eléctricos de C.C. presentan la misma construcción compleja que las dinamos, por lo que necesitan de colectores de delgas y escobillas para su funcionamiento, que aumentan considerablemente los trabajos de mantenimiento.

Objetivos

- Describir el funcionamiento de la dinamo y el motor de C.C.
- Seleccionar las características de una dinamo y de un motor de C.C. para una determinada aplicación práctica.
- Analizar el funcionamiento de una dinamo y de un motor en función de su tipo de excitación.
- Describir los tipos de ensayos fundamentales y normalizados que se deben realizar con las máquinas de C.C., identificando las magnitudes que se deben medir y explicando las curvas características que relacionan dichas magnitudes.

19.1. Clasificación de las máquinas eléctricas

Existen dos tipos de máquinas claramente diferenciadas: las estáticas y las dinámicas. Las primeras se refieren a los transformadores que ya estudiamos en la Unidad 18 y las segundas se refieren a los generadores y motores en C.C. y C.A. (Tabla 19.1).

Un generador convierte la energía mecánica aplicada a su eje de giro en eléctrica, mientras que el motor realiza la operación inversa (Figura 19.1).

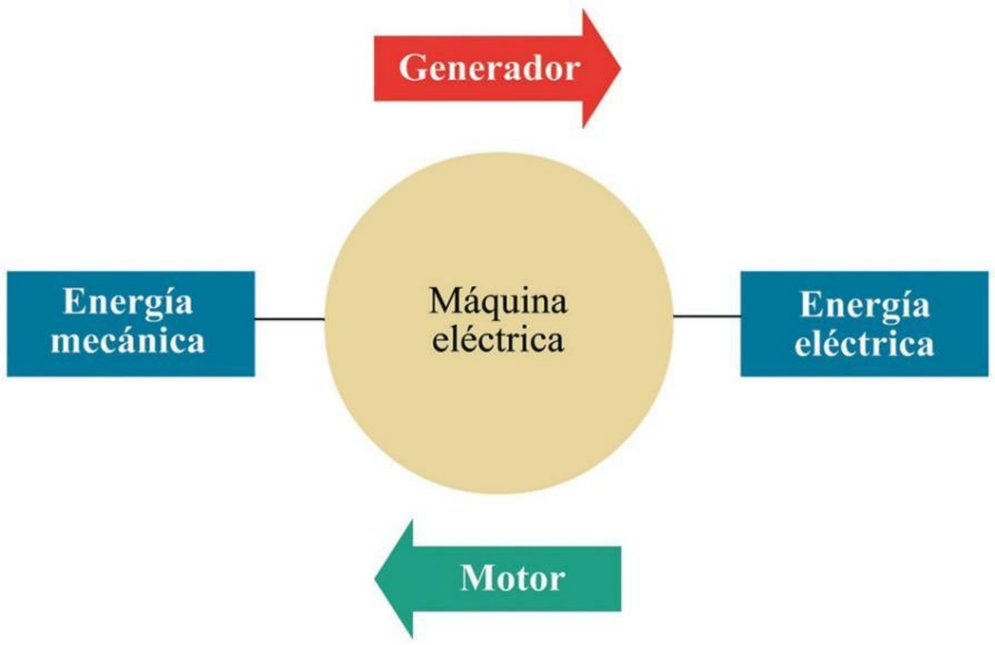


Figura 19.1. Máquina eléctrica trabajando como generador o como motor.

19.2. Principio de funcionamiento de los generadores de C.C.

Se puede decir que una dinamo es una máquina eléctrica rotativa que produce energía eléctrica en forma de corriente continua aprovechando el fenómeno de inducción electromagnética. Esta máquina consta fundamentalmente de un electroimán encargado de crear un campo magnético fijo conocido por el nombre de inductor, y un cilindro donde se enrollan bobinas de cobre, que se hacen girar a una cierta velocidad cortando el flujo inductor, que se conoce como inducido.

Cuando hacemos girar una espira rectangular una vuelta completa entre las masas polares de un electroimán inductor (Figura 19.2), los conductores *a* y *b* del inducido cortan en su movimiento el campo magnético fijo y en ellos se induce una f. e. m. inducida cuyo valor y sentido varían en cada instante con la posición.

Cada uno de los terminales de la espira se conecta a un anillo metálico conductor, donde dos escobillas de grafito recogen la corriente inducida y la suministran al circuito exterior.

Para determinar el sentido de la corriente inducida, en cada posición de los conductores, de la espira se aplica la re-

Tabla 19.1. Clasificación de las máquinas eléctricas rotativas

<table>
<tr><td rowspan="10">Generadores</td><td rowspan="2">Dinamo excitación</td><td rowspan="2">• Independiente
• Serie
• Derivación (shunt)
• Compound</td><td rowspan="2">Alternador</td><td rowspan="2">• Monofásico
• Trifásico
• Polos lisos
• Polos salientes</td></tr>
<tr></tr>
<tr><td rowspan="8">Motores</td><td rowspan="8">Motor excitación</td><td rowspan="8">• Independiente
• Serie
• Derivación (shunt)
• Compound</td><td rowspan="5">Monofásico</td><td rowspan="3">Inducción</td><td>Jaula</td><td>• Fase partida
• Condensador
• Espira de sombra</td></tr>
<tr><td>Rotor devanado</td><td>• Repulsión
• Repulsión en el arranque
• Repulsión-inducción</td></tr>
<tr><td>Síncrono</td><td colspan="2">• Histéresis
• Reluctancia
• Imán permanente</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Polifásico</td><td>Inducción</td><td colspan="2">• Jaula de ardilla
• Rotor devanado</td></tr>
<tr><td colspan="3">Síncrono</td></tr>
<tr><td colspan="4">Universales</td></tr>
</table>

© Ediciones Paraninfo

gla de los tres dedos de la mano derecha, y se puede comprobar cómo se obtiene a la salida una tensión alterna senoidal.

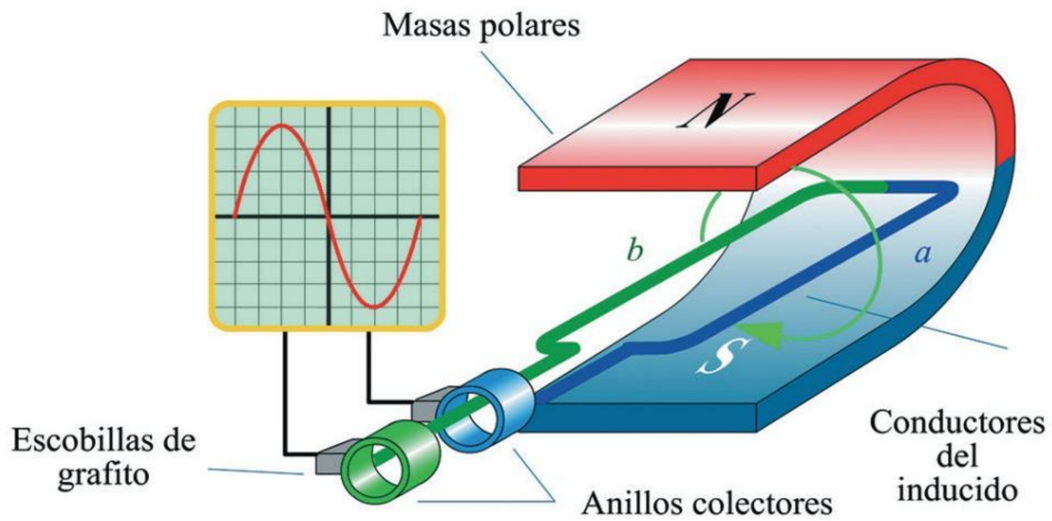


Figura 19.2. Alternador elemental.

Dado que lo que deseamos es obtener corriente continua en la salida del generador, necesitamos incorporar un dispositivo que convierta la C.A. generada en C.C. Esto se consigue mediante el **colector de delgas.**

En la Figura 19.3 se han sustituido los dos anillos colectores por un colector de delgas formado por un anillo colector cortado por la mitad. Las dos mitades del anillo se aíslan eléctricamente y se conectan a la espira y a las escobillas. Con esta disposición se consigue que, al hacer girar la espira, se obtenga a la salida una corriente continua.

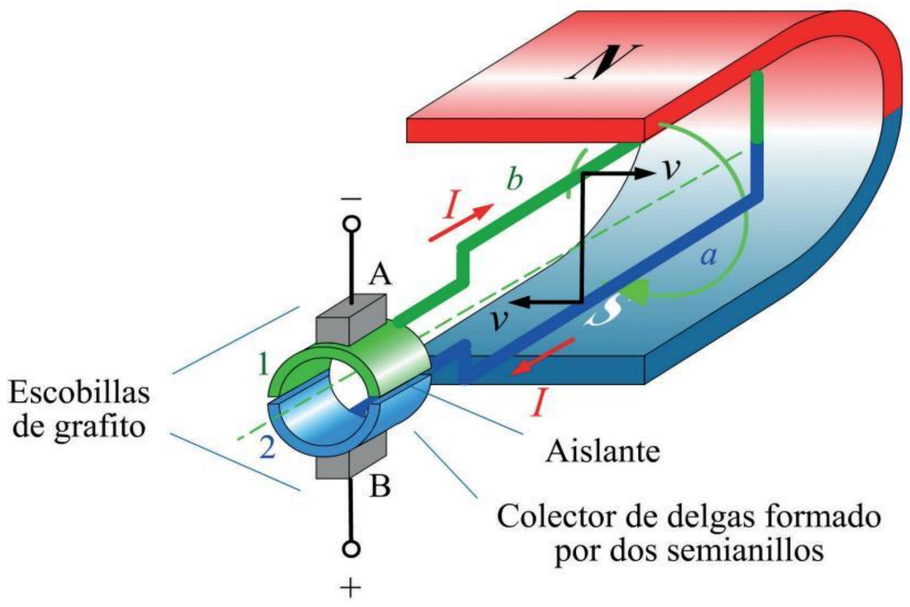


Figura 19.3. Dinamo elemental.

Cuando la espira gira, la corriente inducida cambia de sentido en una determinada posición. Si observamos atentamente en la Figura 19.4 las dos posiciones de la espira, esta es solidaria a los dos semianillos 1 y 2 que giran con ella. Sin embargo, las escobillas A y B son fijas.

En la posición de la Figura 19.4(a), la corriente inducida en los conductores *a* y *b* posee el sentido que se indica con las flechas. El semianillo 1 está en contacto con la escobilla A, y el semianillo 2 con la escobilla B.

Al girar la espira hasta la posición de la Figura 19.4(b), la corriente inducida en los conductores *a* y *b* ha cambiado de sentido, tal como se indica con las flechas, pero como el semianillo 1 está ahora en contacto con la escobilla B y el semianillo 2 queda en contacto con la escobilla A, el sentido de la corriente no cambia en los conductores A y B que suministran energía a la carga.

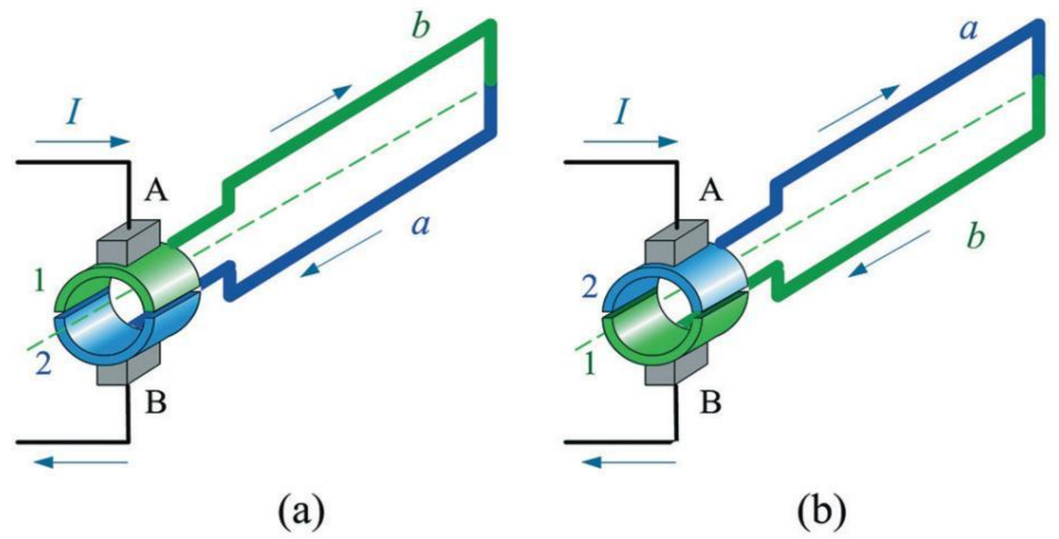


Figura 19.4. El sentido de la corriente permanece constante en la salida de la espira gracias al colector de delgas.

En resumen, la corriente que fluye por la espira es alterna, pero el colector formado por los semianillos aislados consigue rectificar la corriente y convertirla en continua.

Con una sola espira y dos anillos colectores conseguimos una tensión continua similar a la obtenida en un puente rectificador de onda completa, tal como se muestra en la Figura 19.5.

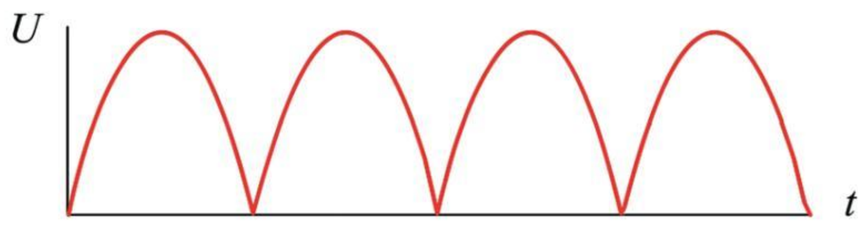


Figura 19.5. Aspecto de la tensión continua que se presenta a la salida del colector con dos delgas.

Esta tensión continua presenta muchas variaciones, o lo que es lo mismo, un rizado excesivo e indeseable. Si incluyésemos en el inducido una segunda espira situada a 90º de la primera y conectada a otros dos nuevos semianillos o **delgas,** obtendríamos una tensión en la salida de la dinamo como la representada en la Figura 19.6, que como se puede comprobar posee un rizado menor que en el caso de una sola espira (la corriente ya no llega a descender a cero). En este caso el colector constaría de cuatro **delgas.**

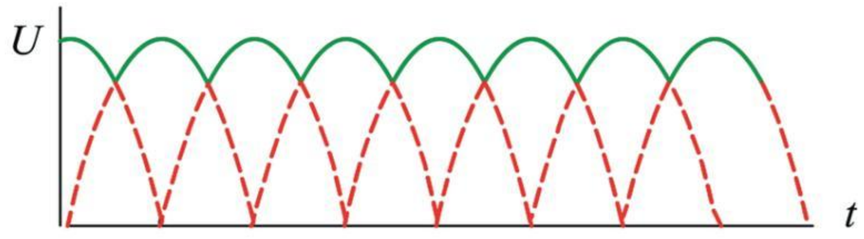


Figura 19.6. Tensión de salida de una dinamo con cuatro delgas.

© Ediciones Paraninfo

Si incluimos en el inducido cuatro espiras con ocho delgas obtenemos una tensión de salida todavía mucho más lineal, como la representada en la Figura 19.7. En la práctica, cuando se desea obtener una tensión continua lo más rectilínea posible, se construyen dinamos con un número considerable de espiras y delgas.

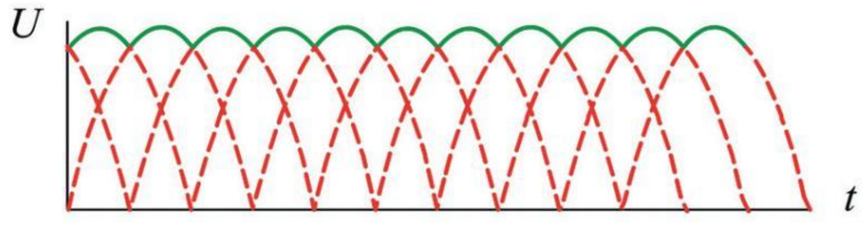


Figura 19.7. Corriente de salida de una dinamo con ocho delgas.

19.3. Constitución de una máquina de C.C.

Las partes fundamentales de una dinamo y de un motor de C.C. son el *inductor*, el *inducido* y el *colector*.

Inductor. El inductor es fijo y se sitúa en el estator (parte estática o sin movimiento de la máquina). Está formado por un electroimán de dos polos magnéticos en las máquinas bipolares (Figura 19.8), o de varios pares de polos en las multipolares.

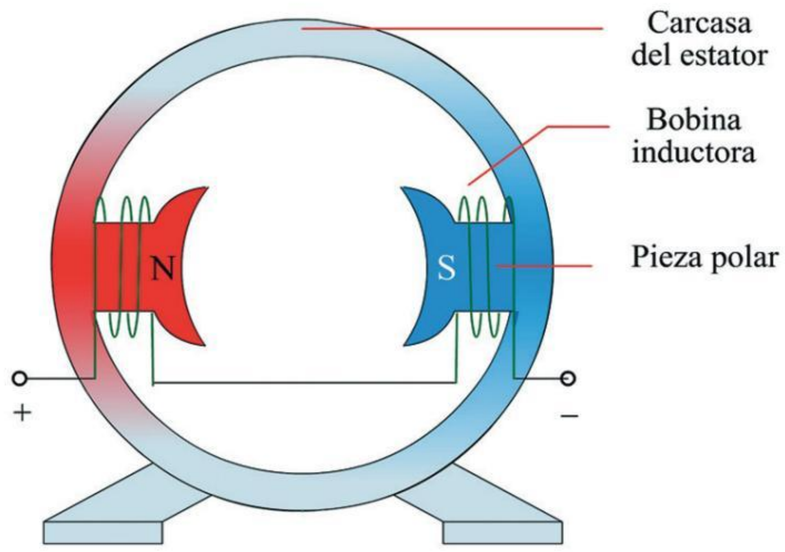


Figura 19.8. Inductor de una dinamo bipolar.

El bobinado y las piezas polares de hierro dulce del electroimán están rodeados por una carcasa o culata de fundición o de acero moldeado que sirve de soporte a la máquina y permite el cierre del circuito magnético (Figura 19.8).

El inducido. El inducido es móvil y se sitúa en el rotor (parte que se mueve en sentido giratorio de la máquina). Está compuesto de un núcleo magnético en forma de cilindro y constituido por chapas magnéticas apiladas, con el fin de evitar las pérdida por histéresis y corrientes parásitas, donde se bobinan las espiras con conductores de cobre esmaltados, tal como se muestra en la Figura 19.9. El núcleo de chapas dispone de una serie de ranuras donde se alojan los bobinados del inducido.

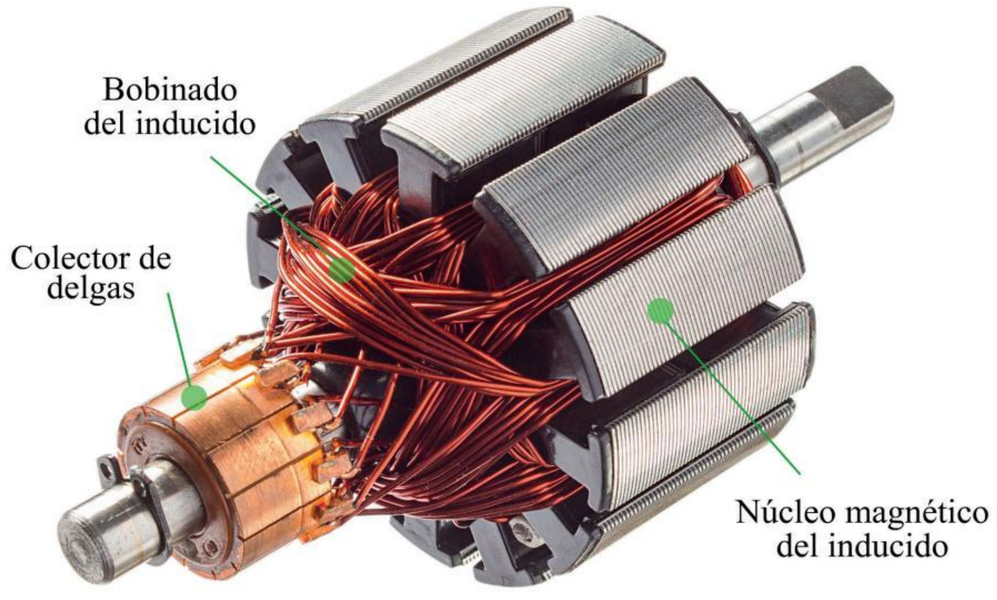


Figura 19.9. Inducido de una máquina de C.C.

El núcleo queda fijado a un eje, cuyos extremos se deslizan apoyados en cojinetes fijos a la carcasa. De esta forma el inducido se sustenta entre las piezas polares del inductor y puede ser impulsado en un movimiento de rotación rápido.

La función de las diferentes bobinas que se insertan en el núcleo magnético del rotor es la de aumentar y conseguir una f. e. m. del conjunto de la máquina más uniforme y continua. Además, las bobinas deben estar repartidas por igual para conseguir un equilibrio en las masas del rotor que impidan desgastes en los cojinetes.

Existen dos tipos básicos de bobinados para el inducido: el imbricado y el ondulado.

En el bobinado imbricado se conecta el principio de cada bobina a una delga del colector y el final a la delga siguiente, tal como se muestra en las Figuras 19.10 y 19.11. El número de escobillas necesarias será igual al número de polos formados en el bobinado.

En el bobinado ondulado o serie el principio de cada bobina se conecta con una delga que corresponda a un polo magnético y el final con una delga que corresponda al polo magnético siguiente (Figura 19.12). Para este tipo de bobinado sería suficiente con un par de escobillas, aunque en la práctica, al igual que para los bobinados imbricados, se utiliza el mismo número de escobillas que de polos.

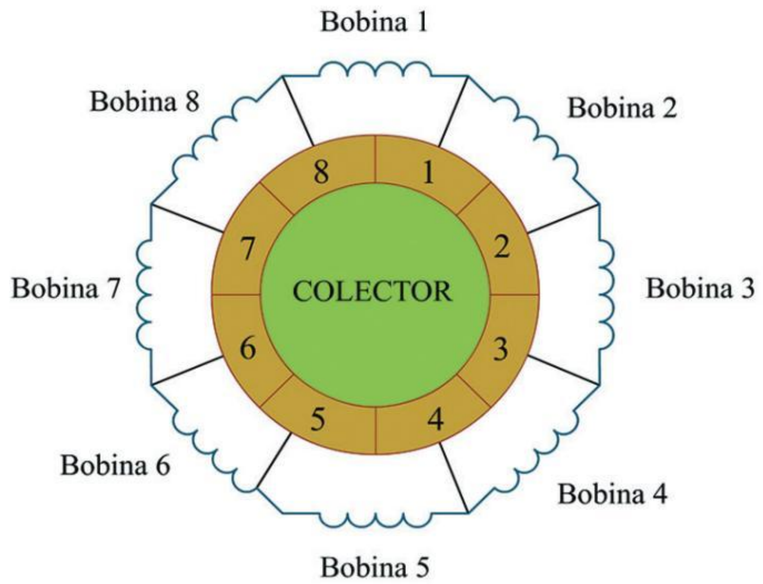


Figura 19.10. Esquema circular del bobinado imbricado del inducido.

© Ediciones Paraninfo

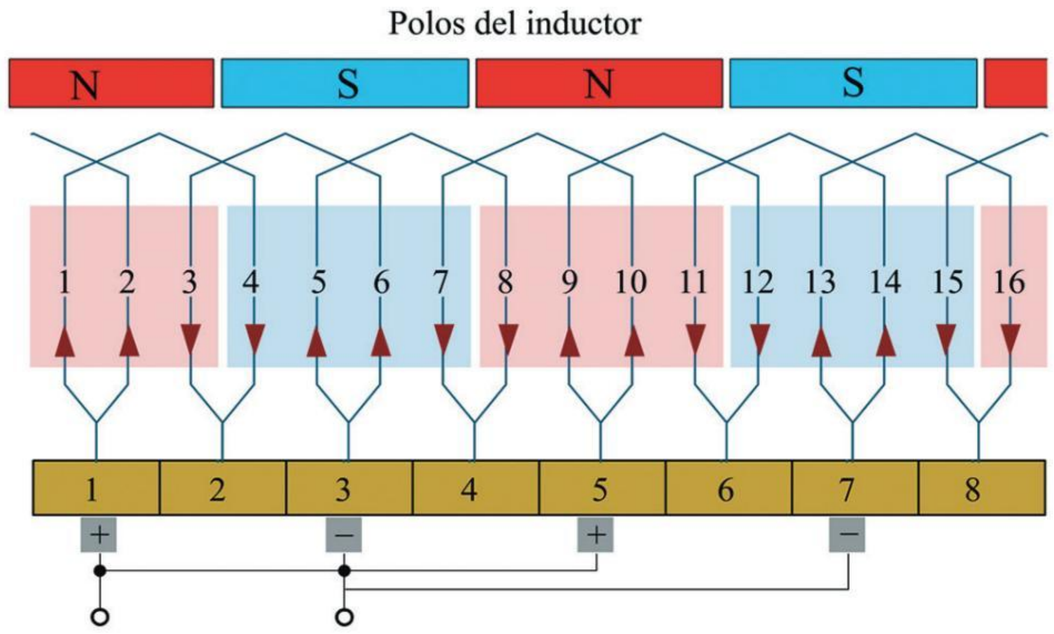


Figura 19.11. Esquema lineal o rectangular del bobinado imbricado del inducido para una máquina con dos pares de polos.

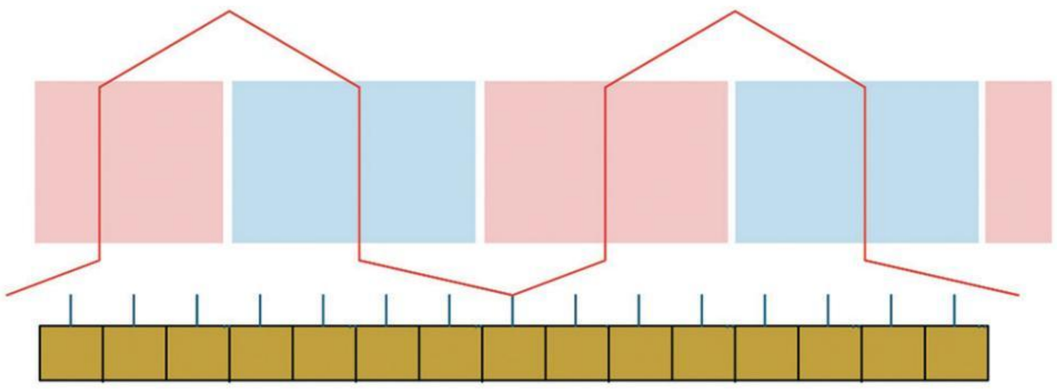


Figura 19.12. Representación simplificada de un bobinado ondulado.

El colector. En el eje del inducido se fija el colector de delgas formado por láminas de cobre electrolítico con el fin de poder conectarle los diferentes circuitos del inducido. Las delgas se aíslan del eje y entre sí por hojas de mica (Figura 19.13).

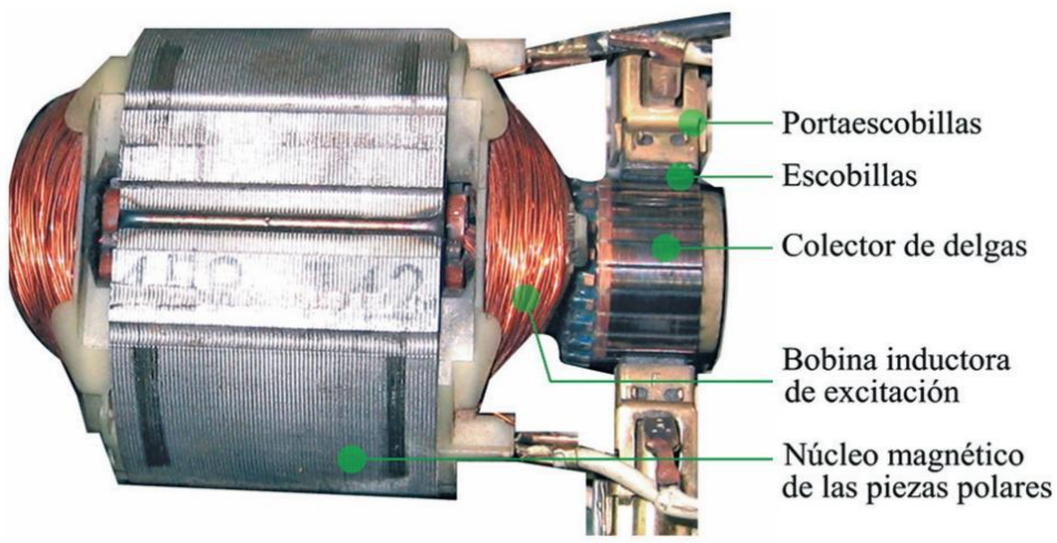


Figura 19.13. Vista de conjunto de una máquina de C.C.

La corriente se recoge en el colector con la ayuda de dos o varios contactos deslizantes de grafito o de carbón puro, llamados escobillas (Figura 19.14).

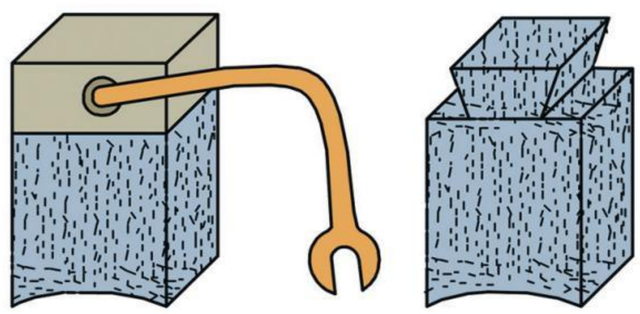


Figura 19.14. Escobillas.

Cada escobilla se monta en un portaescobillas, que asegura la presión de la misma contra el colector mediante muelles (Figura 19.15). De las escobillas parten los conductores que se conectan a la placa de bornas de la máquina eléctrica, de donde se conectarán al circuito exterior. Dada la fricción a la que se somete a las escobillas, se produce un desgaste progresivo de estas que limita su vida útil, por lo que hay que reponerlas cada cierto periodo de tiempo.

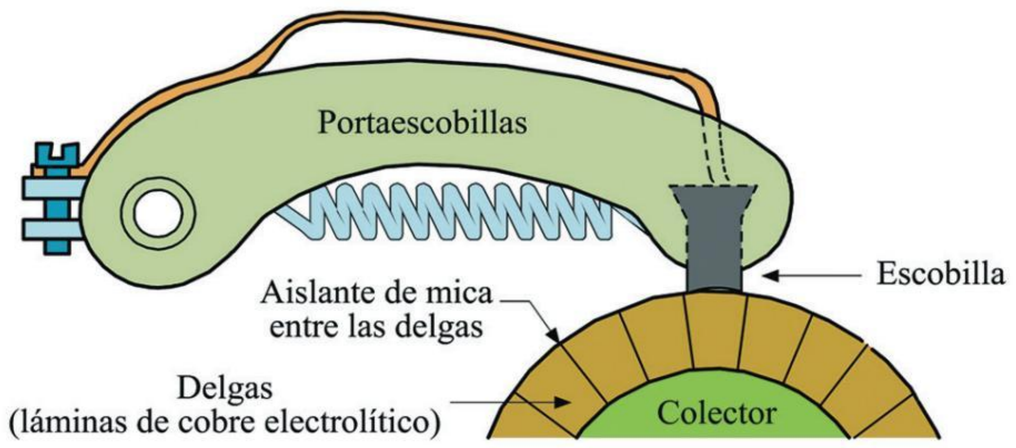


Figura 19.15. Portaescobillas.

19.3.1. Circuito magnético de una máquina de C.C.

En la Figura 19.16 se ha representado el circuito recorrido por las líneas de fuerza del campo magnético inductor.

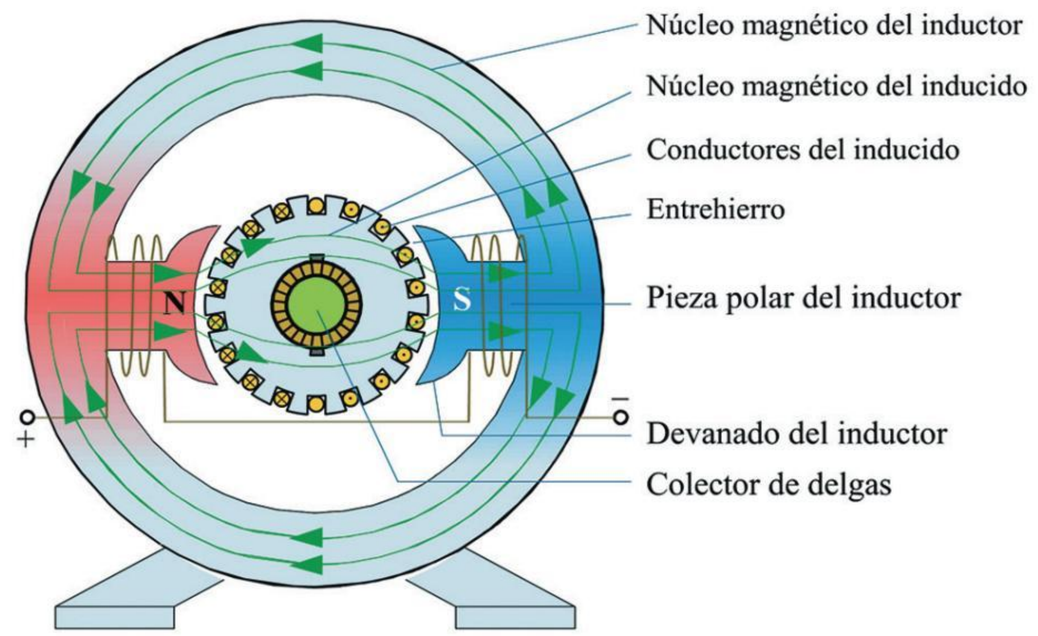


Figura 19.16. Circuito magnético de una dinamo.

Estas se cierran a través de las piezas polares del electroimán, el inducido y la carcasa o culata de la dinamo.

Es importante hacer notar que las líneas de fuerza deben transcurrir por un pequeño espacio no ferromagnético existente entre las piezas polares y el **entrehierro.** Nos referimos al entrehierro formado por aire. Dado que las líneas de fuerza se establecen muy mal por el entrehierro, se intenta reducir al máximo su tamaño, procurando que esto no impida que el rotor pueda girar libremente y sin fricciones.

© Ediciones Paraninfo

19.3.2. Reacción del inducido

Cuando los conductores del inducido son recorridos por una corriente eléctrica producen un campo magnético cuya dirección y sentido se obtiene aplicando la regla del sacacorchos. La dirección de este campo transversal de reacción adquiere la misma dirección que el eje de las escobillas, con lo que resulta ser perpendicular al campo principal producido por los polos inductores (Figura 19.17).

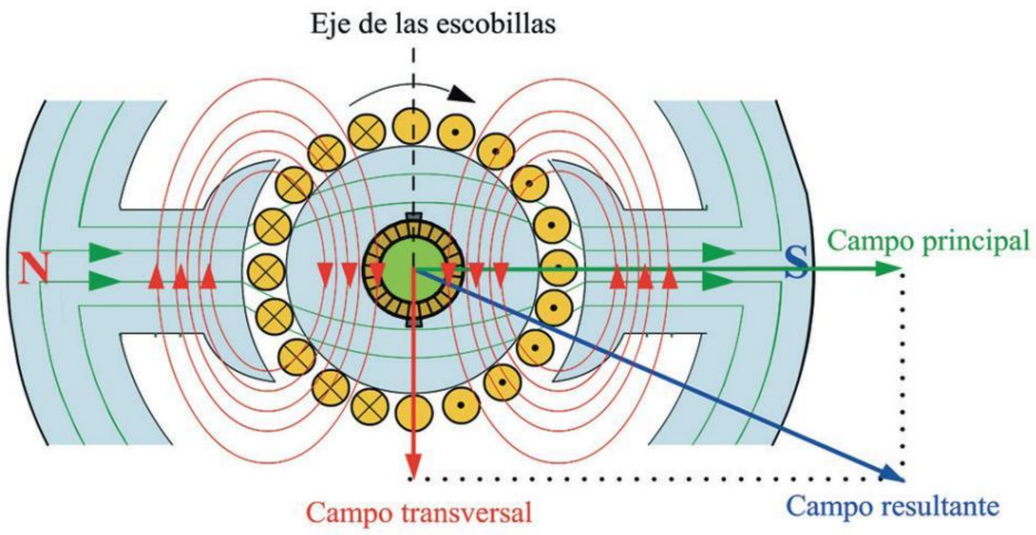


Figura 19.17. Flujo transversal generado por los conductores del inducido.

El campo transversal debido a la reacción del inducido se suma vectorialmente al principal, dando como fruto un campo magnético resultante que queda desviado de la posición original (Figura 19.18). Esta desviación del campo inductor produce una serie de problemas cuando las escobillas conmutan de una delga a otra en el colector, dando como resultado chispas que perjudican notablemente el funcionamiento de la máquina.

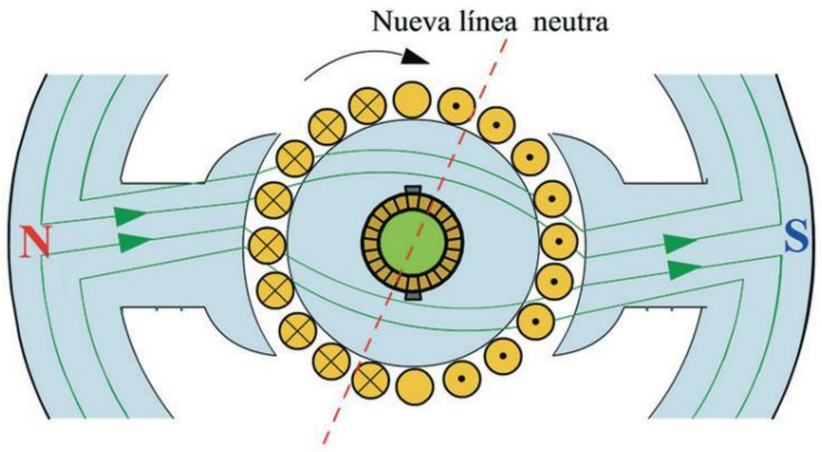


Figura 19.18. Desviación del campo magnético inductor provocada por la reacción del inducido.

Existen dos posibilidades para evitar los efectos perjudiciales de la reacción del inducido: desviar las escobillas o disponer de polos auxiliares de conmutación.

La **desviación de las escobillas** debe hacerse en el mismo sentido de giro de la dinamo hasta que su eje coincida con la perpendicular al campo resultante (Figura 19.19). El inconveniente que conlleva este sistema es que, al ser el valor del campo transversal de reacción del inducido dependiente de la corriente que absorba el inducido, la desviación de las escobillas será la adecuada para una corriente determinada. Para una corriente mayor o menor, la desviación de las escobillas también tendría que ser diferente.

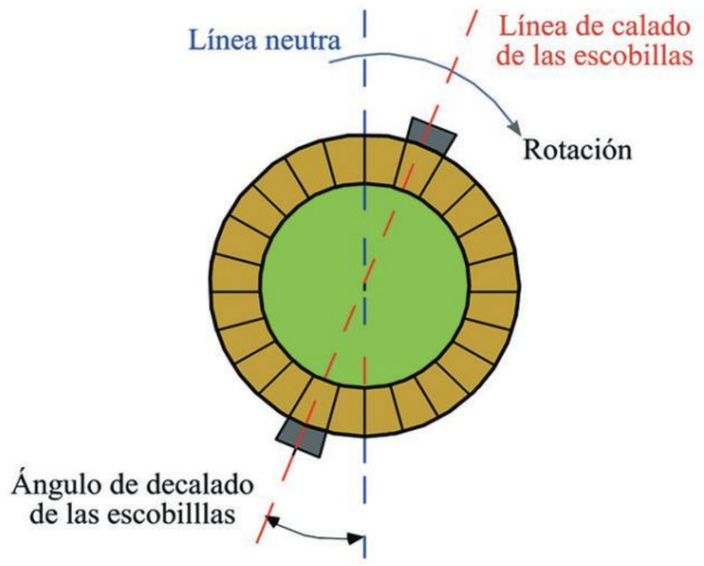


Figura 19.19. Desviación de las escobillas para reducir el efecto de la reacción del inducido.

Los **polos de conmutación** se disponen en la culata del generador de tal forma que produzcan un campo magnético transversal del mismo valor y de sentido contrario al flujo transversal de reacción del inducido (Figura 19.20).

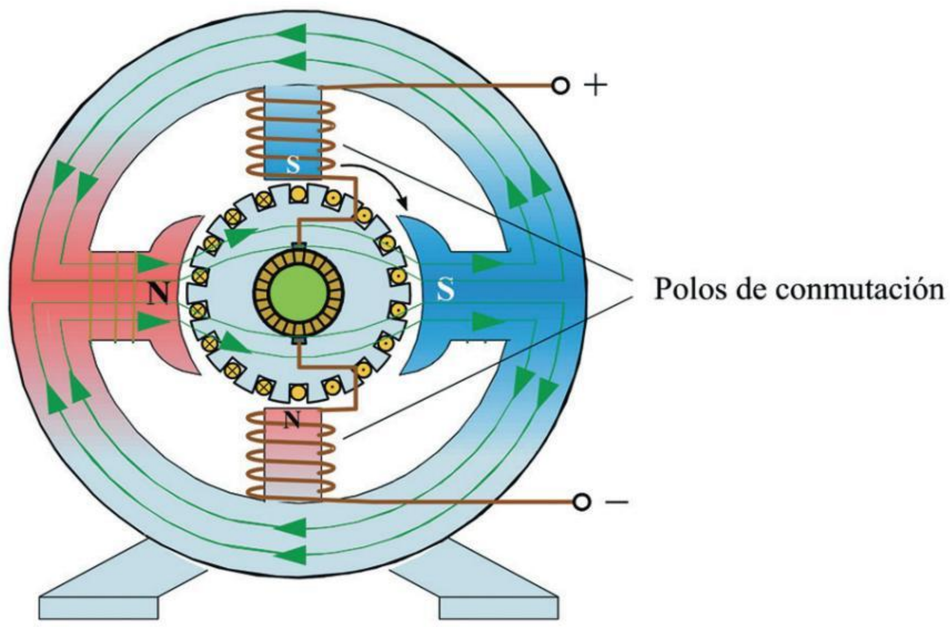


Figura 19.20. Polos de conmutación para eliminar el campo transversal del inducido.

Para que esto sea así, los polos de conmutación se conectan en serie con el inducido para que la corriente que pasa por ellos sea igual que la del inducido.

De esta forma, cuando crece el campo transversal de reacción del inducido por un aumento de corriente, también lo hace el flujo de compensación producido por los polos de conmutación. En este caso siempre se consigue eliminar con efectividad el campo magnético de reacción del inducido.

19.3.3. Devanado de compensación

En las máquinas de gran potencia, aparte de los polos de conmutación, se coloca en las ranuras de los polos principales un devanado compensador, cuya misión es eliminar

© Ediciones Paraninfo

las distorsiones del campo magnético principal originadas por el flujo transversal. Este devanado se conecta en serie con el de conmutación y el inducido (Figura 19.21).

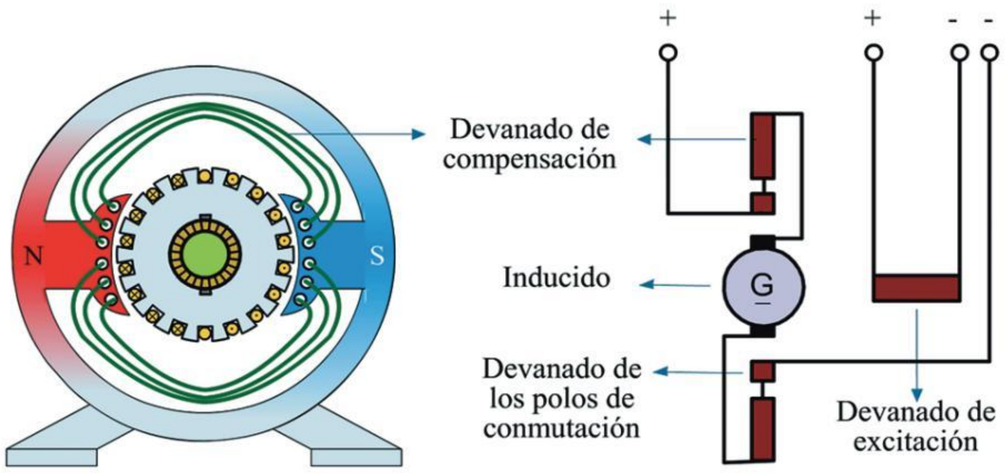


Figura 19.21. Devanado de compensación.

En la Figura 19.22 se muestra una vista de conjunto de una máquina de corriente continua.

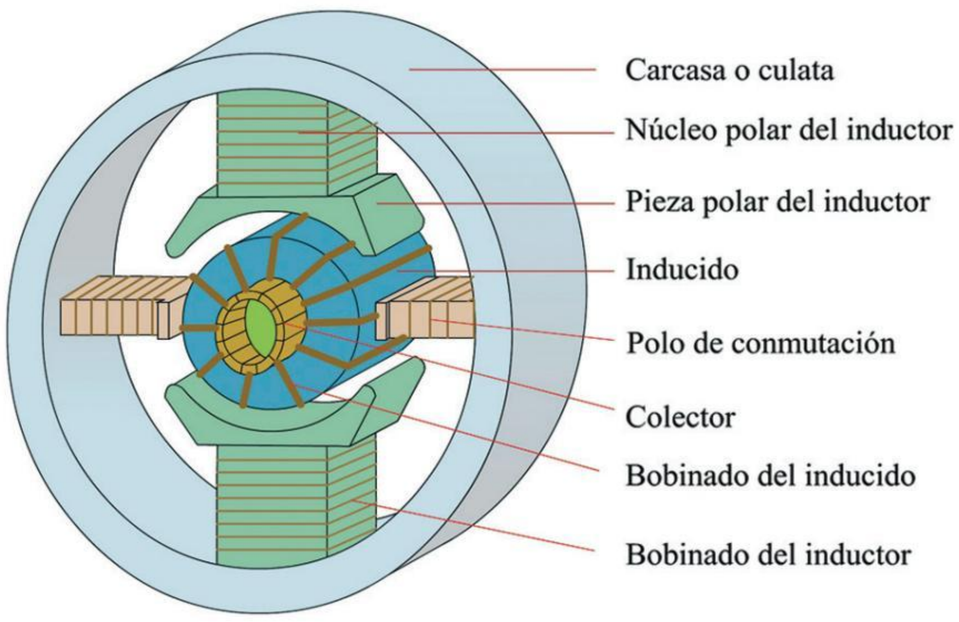


Figura 19.22. Vista de conjunto de una máquina de corriente continua.

19.4. Fuerza electromotriz generada por una dinamo

El valor de la fuerza electromotriz se obtiene aplicando el principio de inducción electromagnética, por lo que dependerá del flujo magnético que corten los conductores, así como de lo rápido que lo hagan y del número de ellos. La expresión que relaciona la fuerza electromotriz de una dinamo con estas variables es:

$$E = \Phi n N \frac{p}{a} \frac{1}{60}$$

E = Fuerza electromotriz (V).
Φ = Flujo por polo (Wb).
N = Número de conductores del inducido.
n = Velocidad de giro del inducido (r. p. m.).
a = Pares de circuitos del inducido.
p = Pares de polos.

Como los términos N, p y a son constantes para una máquina de C.C., tenemos que:

$$E = Kn\Phi$$

La fuerza electromotriz es directamente proporcional al flujo inductor y al número de revoluciones de la dinamo.

19.5. Tipos de excitación de las dinamos

El campo magnético necesario para que una dinamo pueda funcionar se puede producir de dos formas claramente diferenciadas: mediante un imán permanente o mediante electroimanes alimentados por corriente continua.

Dado que los imanes permanentes producen un campo magnético no muy intenso y constante (sin posibilidad de regulación), su uso se hace interesante para pequeñas dinamos como, por ejemplo, dinamos taquimétricas, magnetos, etcétera.

Cuando se desea la obtención de un campo magnético de excitación elevado y con posibilidad de regulación, se recurre a bobinas inductoras que rodean las piezas polares y que son alimentados por una corriente continua.

Dependiendo de cómo se obtenga la energía eléctrica necesaria para alimentar el circuito inductor de una dinamo y de cómo se conecten surgen diferentes tipos de excitación:

- Dinamos de excitación independiente.
- Dinamos autoexcitadas.

19.5.1. Dinamos de excitación independiente

La corriente de excitación con la que se alimenta a las bobinas inductoras se proporciona mediante una fuente de energía exterior de C.C., como por ejemplo una batería de acumuladores o una fuente de alimentación (Figura 19.23).

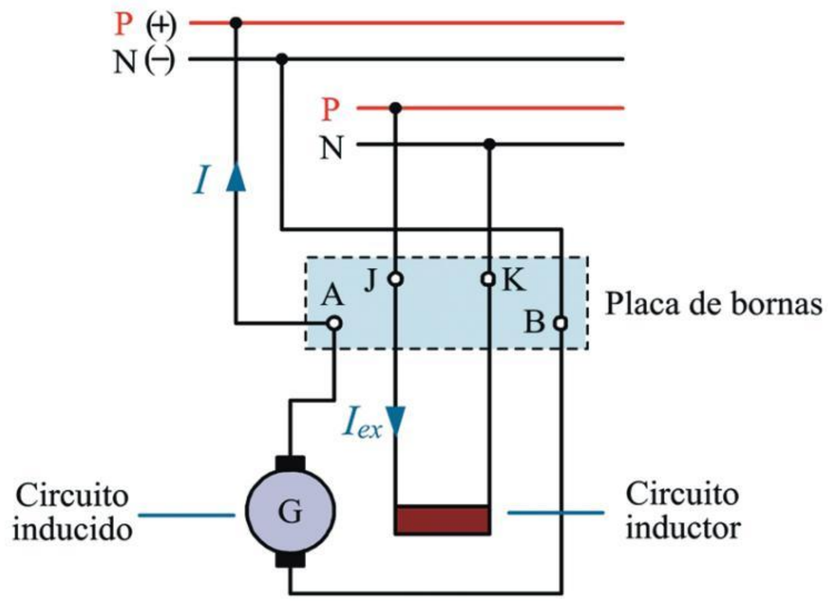


Figura 19.23. Esquema de conexiones de dinamo con excitación independiente.

© Ediciones Paraninfo

Los terminales A y B se corresponden con los del circuito del inducido y los terminales J y K con los del devanado del inductor.

En la Figura 19.24 se muestra la característica en carga de una dinamo con excitación independiente para una velocidad determinada y constante. Aquí se puede comprobar que la tensión que proporciona la dinamo a la carga disminuye al aumentar la intensidad de carga. Esto se debe fundamentalmente a que la caída de tensión que se produce en la resistencia interna del inducido aumenta proporcionalmente a la intensidad. En la característica de la Figura 19.24 se han incluido dos curvas; se puede comprobar que al disminuir la corriente de excitación del inductor se consigue reducir también la tensión de salida de la dinamo.

La dinamo de excitación independiente posee el inconveniente de que necesita de una fuente de alimentación de C.C. para la alimentación del inductor; sin embargo, la independencia entre la corriente de excitación y la tensión en bornes del inducido la hacen interesante para ciertas aplicaciones.

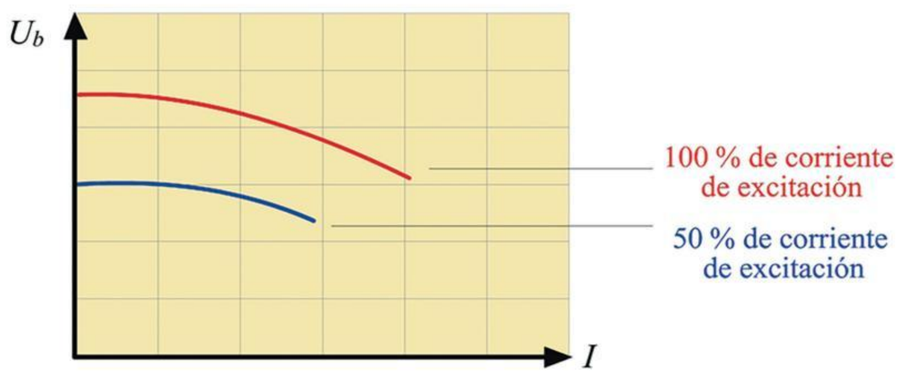


Figura 19.24. Características en carga de una dinamo con excitación independiente.

19.5.2. Dinamos autoexcitadas

En la práctica resulta más interesante conseguir que el propio generador produzca la energía necesaria para la alimentación del circuito inductor. Esto presenta un problema, que es cómo conseguimos que la dinamo comience a producir f. e. m. si inicialmente no existe campo magnético en el inductor. Este problema se solventa fácilmente gracias al pequeño **magnetismo remanente** que poseen los núcleos magnéticos de las piezas polares.

Efectivamente, cuando un material magnético es sometido a una imantación, aunque retiremos la causa imanadora, dicho material siempre queda algo magnetizado, dependiendo de la intensidad del magnetismo remanente del material utilizado. De esta forma, si conectamos el circuito del inducido con el del inductor, por ejemplo, en paralelo con el inductor, al girar el inducido a su velocidad nominal, los conductores del mismo cortan el débil campo magnético debido al magnetismo remanente, produciéndose una pequeña f. e. m., pero suficiente para alimentar con una pequeña corriente al circuito inductor. Esto, a su vez, produce un aumento del flujo magnético inductor, que hace que aumente la f. e. m. en el inducido, produciéndose un ciclo repetido de aumentos de la f. e. m. y de flujo inductor hasta que se alcanza la f. e. m. nominal (Figura 19.25).

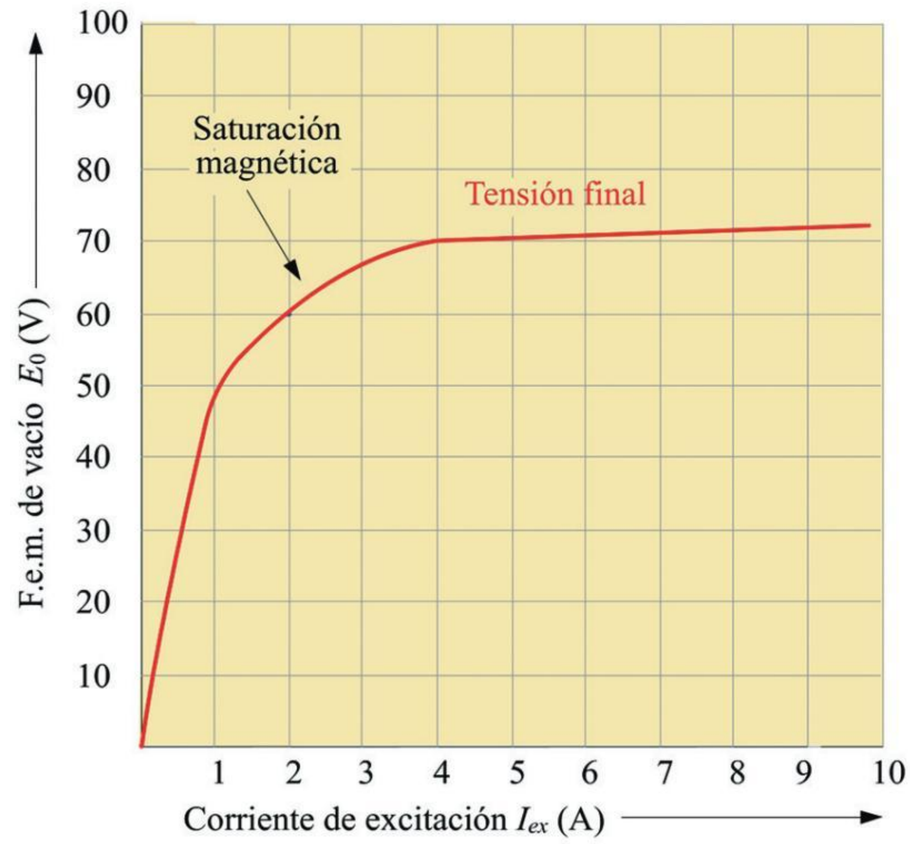


Figura 19.25. Curva de vacío de una dinamo autoexcitada.

Según cómo se conecte el devanado inductor respecto al inducido, surgen tres tipos de dinamos autoexcitadas: *dinamo con excitación en derivación*, *dinamo con excitación en serie* y *dinamo con excitación compound*.

19.5.3. Dinamo con excitación en derivación (*shunt*)

Aquí se conecta el devanado inductor en paralelo con el inducido. Para producir el flujo magnético necesario se montan bobinas inductoras con un gran número de espiras, ya que la corriente de excitación que se alcanza con este montaje es pequeña y la sección de los conductores es reducida.

En el esquema eléctrico de la Figura 19.26 se ha incluido un reostato de regulación de campo conectado en serie con el devanado inductor. Al modificar la resistencia de este reostato conseguimos variar la corriente de excitación y con ella el flujo magnético inductor, de manera que logramos tener un control efectivo sobre la tensión de salida del generador.

En la Figura 19.27 se muestra la curva característica de una dinamo en derivación o *shunt* en carga. Aquí se puede observar que la tensión que proporciona el generador a la carga se reduce más drásticamente con los aumentos de la corriente de carga que en la dinamo con excitación independiente. Esto es debido a que, al aumentar la caída de tensión en el inducido con la carga, se produce una disminución de la tensión en bornes, que provoca, a su vez, una reducción de la corriente de excitación. Esto hace que la f. e. m.

© Ediciones Paraninfo

inducida se vea reducida, de modo que se puede llegar a perder la excitación total de la dinamo para corrientes de carga muy elevadas.

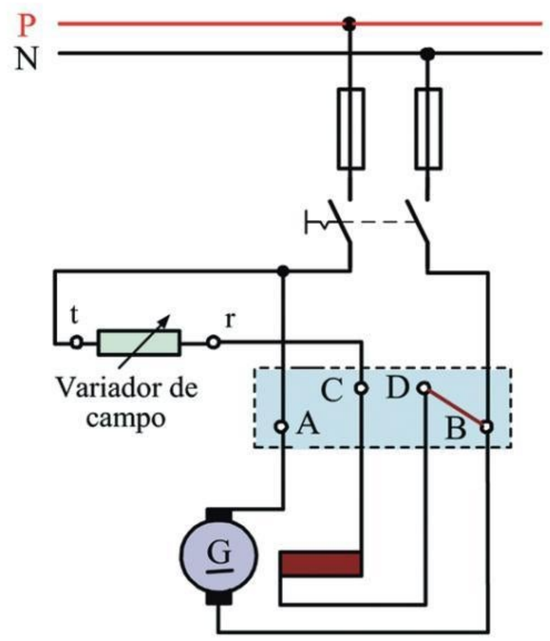


Figura 19.26. Esquema de conexiones de una dinamo con excitación en derivación.

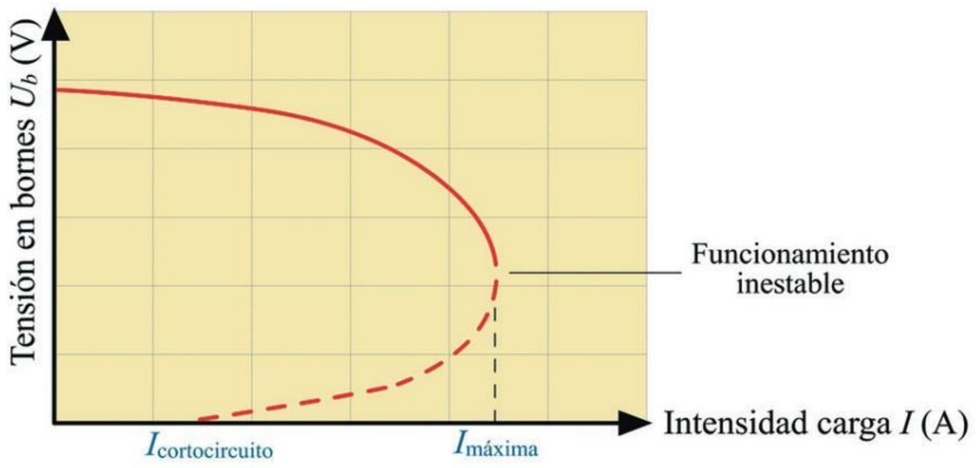


Figura 19.27. Curva característica en carga de una dinamo derivación.

19.5.4. Dinamo con excitación en serie

En este caso se conecta el devanado inductor en serie con el inducido, de tal forma que toda la corriente que el generador suministra a la carga fluye por igual por ambos devanados (Figura 19.28). Dado que la corriente que atraviesa al devanado inductor es elevada, es necesario construirlos con pocas espiras y una gran sección en los conductores.

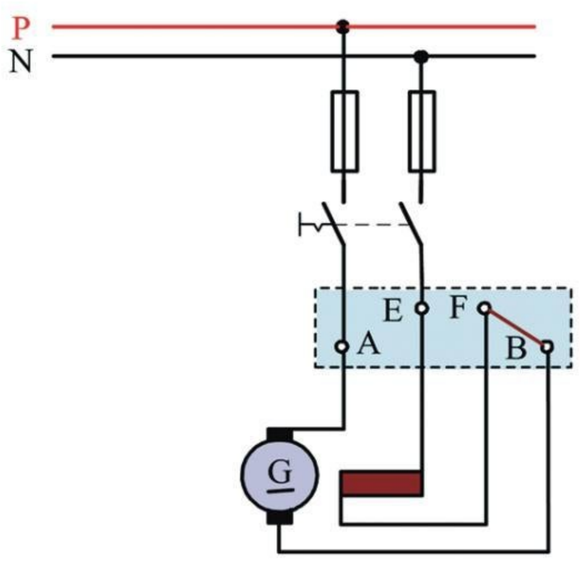


Figura 19.28. Esquema de conexiones de una dinamo con excitación en serie.

El inconveniente fundamental de este tipo de generador es que cuando trabaja en vacío (sin conectar ningún receptor exterior), al ser la corriente nula, no se excita. Además, cuando aumenta mucho la corriente de carga, también lo hace el flujo inductor, por lo que la tensión en bornes de la dinamo también se eleva, tal como se muestra en la curva característica de carga de la Figura 19.29. Una vez alcanzada la saturación magnética del núcleo, las caídas de tensión producidas por los devanados del inducido y del inductor reducen la tensión drásticamente, lo que hace que este generador sea muy inestable en su funcionamiento y, por tanto, poco útil para la generación de energía eléctrica.

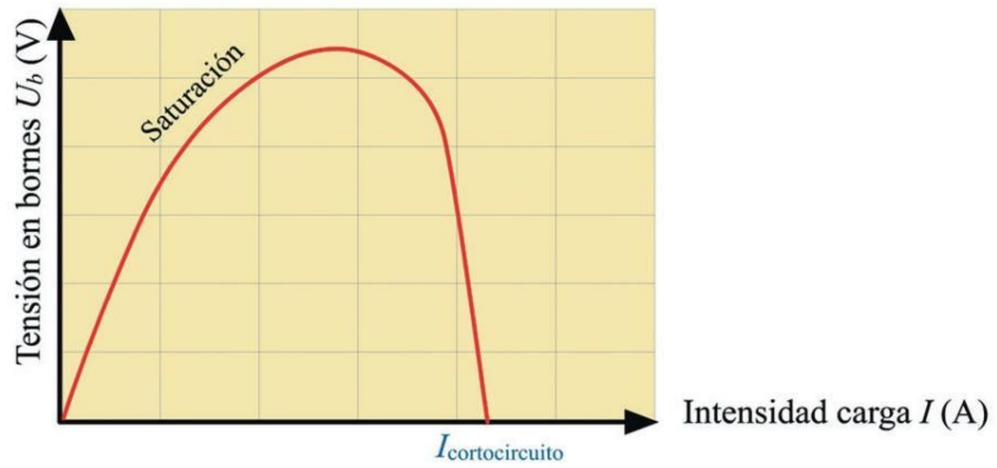


Figura 19.29. Curva característica en carga de una dinamo serie.

19.5.5. Dinamo con excitación *compound*

En la excitación mixta o *compound* se divide un circuito inductor en dos partes independientes, conectando una en serie con el inducido y otra en derivación, tal como se muestra en el esquema de la Figura 19.30.

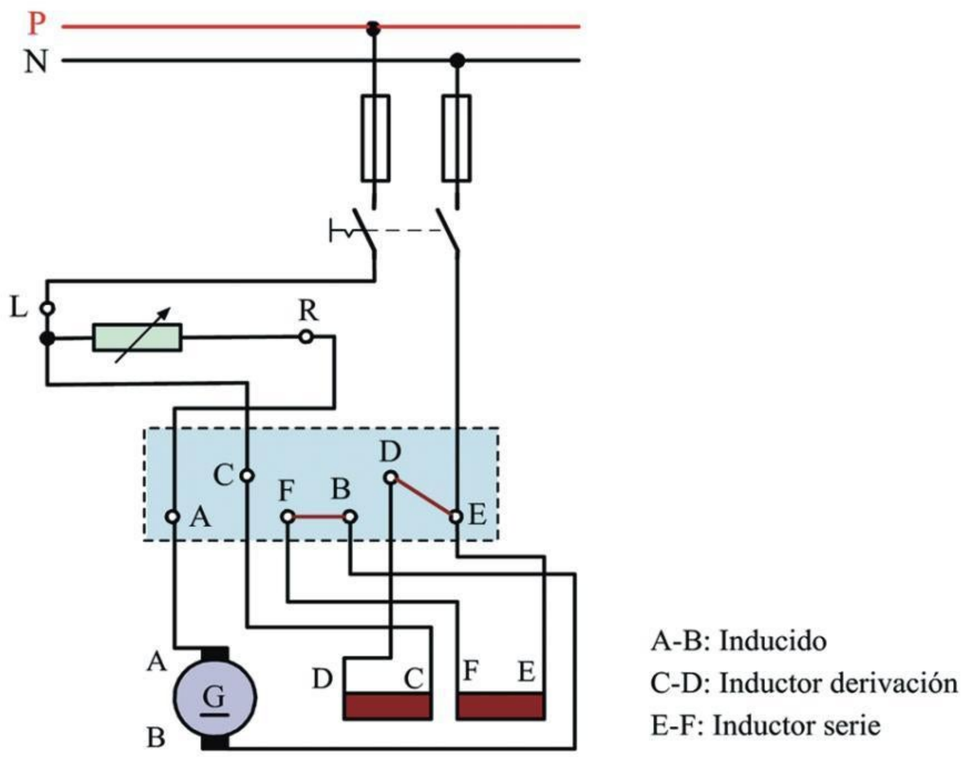


Figura 19.30. Esquema de conexiones de una dinamo con excitación *compound.*

Gracias a la combinación de los efectos serie y derivación en la excitación de la dinamo se consigue que la tensión que suministra el generador a la carga sea mucho más estable para cualquier régimen de carga, tal como se muestra en la curva característica en carga de la Figura 19.31.

© Ediciones Paraninfo

La gran estabilidad conseguida en la tensión por las dinamos con excitación *compound* hace que esta sea en la práctica la que más se ha utilizado para la generación de energía.



Figura 19.31. Curva característica en carga de una dinamo *compound*.

19.6. Ensayos en una dinamo

Al igual que se hace con los transformadores, las dinamos también pueden ser sometidas a una serie de ensayos con el fin de determinar sus características y analizar su comportamiento en diferentes situaciones de funcionamiento. De esta forma, se pueden realizar ensayos para determinar el rendimiento, para evaluar el calentamiento de la máquina para diferentes regímenes de funcionamiento, medir la resistencia de aislamiento, la rigidez dieléctrica, etc. Además, a través de los ensayos se pueden determinar las curvas características de la dinamo, como pueden ser:

- *Característica de vacío:* $U_b = f(I_{ex})$. Para una velocidad de rotación fija (n = cte.) y estando la dinamo trabajando en vacío ($I_i = 0$), la curva representa el valor de la tensión en bornes (U_b) en función de la corriente de excitación (I_{ex}).
- *Característica en carga:* $U_b = f(I_{ex})$. Para una velocidad de rotación fija (n = cte.) y estando la dinamo trabajando en carga a una intensidad constante (I_i = cte.), la curva representa el valor de la tensión en bornes (U_b) en función de la corriente de excitación (I_{ex}).
- *Característica de excitación o regulación:* $I_{ex} = f(I_i)$. Para una velocidad de rotación y una tensión en bornes constantes (n = cte., U_b = cte.), la curva representa la corriente de excitación (I_{ex}) en función de la corriente suministrada por el inducido (I_i).
- *Característica de cortocircuito:* $I_{ex} = f(I_i)$. Para una velocidad constante (n = cte.) y una tensión en bornes igual a cero ($U_b = 0$), la curva representa la corriente de excitación (I_{ex}) en función de la corriente suministrada por el inducido (I_i).
- *Característica exterior:* $U_b = f(I)$. Para una corriente de excitación y velocidad constantes (I_{ex} = cte., n = cte.), la curva representa la tensión en la carga (U_b) en función de la corriente suministrada por la dinamo (I).
- *Característica interior:* $E = f(I_i)$. Para una corriente de excitación y velocidad constantes (I_{ex} = cte., n = cte.), la curva representa la f. e. m. inducida por la dinamo (E) en función de la corriente suministrada por el inducido (I_i).

Para llevar a cabo estos ensayos son necesarios los siguientes equipos:

- Motor de arrastre con posibilidad de regulación y control de velocidad. En la Figura 19.26 se ha utilizado un motor de corriente continua en derivación en el que, modificando su corriente de excitación (variando el reostato R_r) y tensión del inducido (variando la tensión en la fuente de alimentación F.A. regulable), se puede conseguir un amplio margen de velocidad.
- Fuente de alimentación de C.C. regulable para alimentación del motor de arrastre.
- Fuente de alimentación de C.C. regulable para alimentación de la excitación de la dinamo.
- Aparatos de medida de alcance adecuado para medir tensión y corriente en los diferentes circuitos.
- Un tacómetro para medir la velocidad de la dinamo (la mayor parte de los ensayos se hacen a velocidad constante, que deberá corresponderse con la nominal de la dinamo). Para conseguir mantener esta velocidad constante en el circuito de la Figura 19.27 habrá que ajustar la tensión de alimentación y la corriente de excitación del motor de arrastre.
- Reostatos para regular la corriente del inducido o de la excitación (R, R_r).

En la Figura 19.32 se muestra, como ejemplo, el circuito para obtener las curvas en vacío y carga de una dinamo de excitación independiente. Para realizar las curvas de una dinamo con la excitación en derivación o serie no sería necesario utilizar la fuente de alimentación para la alimentación de excitación, ya que la dinamo con estas conexiones se autoexcita.

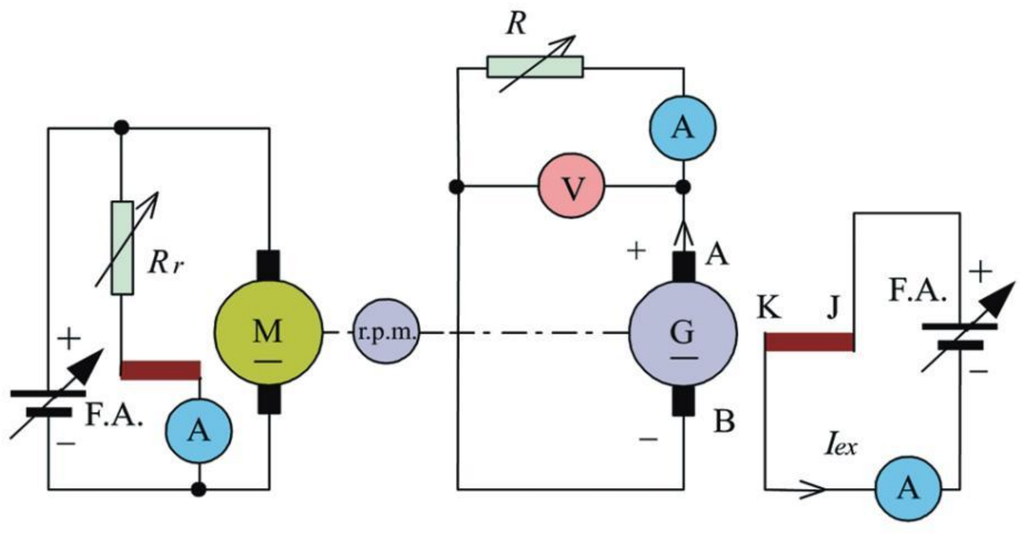


Figura 19.32. Esquema de conexiones para la obtención de las curvas características de una dinamo de excitación independiente.

© Ediciones Paraninfo

19.7. Principio de funcionamiento del motor de C.C.

Como todos los motores eléctricos, su funcionamiento se basa en las fuerzas que aparecen en los conductores cuando son recorridos por corrientes eléctricas y, a su vez, están sometidos a la acción de un campo magnético.

En la Figura 19.33 se ha representado el aspecto de un motor de corriente continua elemental. Los polos magnéticos del imán, situados siempre en el estator, son los encargados de producir el campo magnético inductor. La espira, que se ha situado en el rotor, es recorrida por una corriente continua que se suministra a través de un anillo de cobre cortado por la mitad (colector de delgas). Las dos mitades se aíslan eléctricamente y se sitúan sobre ellas unos contactos deslizantes de carbón (escobillas), de tal forma que la corriente aplicada por la fuente de alimentación pueda llegar a los conductores del rotor.

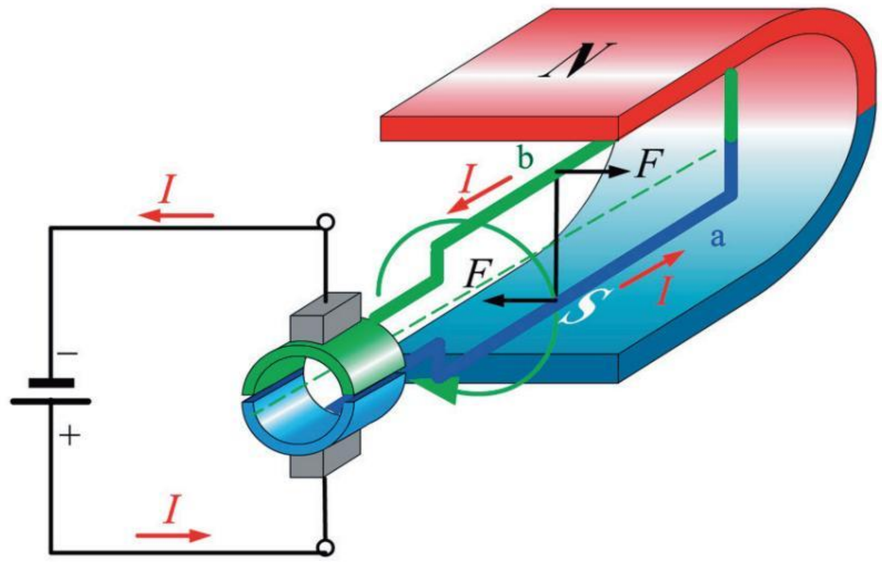


Figura 19.33. Motor de C.C. elemental.

Como las corrientes que circulan por ambos lados de la espira son contrarias, al aplicar la regla de la mano izquierda, podemos comprobar que aparecen fuerzas también contrarias en cada lado activo de la espira, lo que determina un par de giro. Para que el sentido de giro sea siempre el mismo, el par de fuerzas siempre deberá actuar en el mismo sentido. En el caso de que los conductores de la espira girasen hasta enfrentarse con el polo contrario, con el mismo sentido de corriente que en la anterior posición, la fuerza se invertiría de sentido y la espira no establecería nunca una revolución. Con el colector de delgas se resuelve este problema, haciendo que la corriente siempre circule en el mismo sentido respecto al campo magnético (obsérvese cómo el colector consigue ir conmutando los circuitos de ambos lados activos de la espira cada media vuelta) (Figura 19.34).

Para conseguir que el motor gire en uno u en otro sentido hay que lograr invertir el sentido del par de fuerzas. Esto se consigue invirtiendo el sentido de la corriente del rotor y manteniendo fijo el campo magnético inductor.

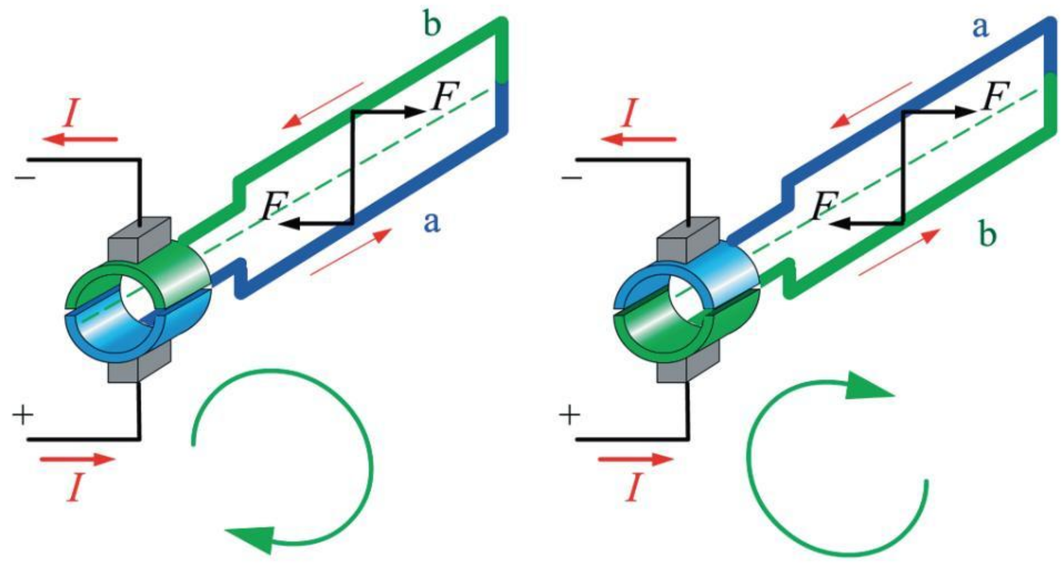


Figura 19.34. Gracias al colector de delgas se consigue que la corriente y la fuerza que aparecen en los conductores del rotor sean siempre del mismo sentido.

La constitución de motor de C.C. es exactamente igual que la de un generador de corriente C.C. (dinamo). Esta máquina es reversible y, por tanto, puede funcionar indistintamente como motor o como generador.

Como hemos podido comprobar en el motor elemental, se necesitan tres partes fundamentales para su funcionamiento: un circuito que produzca el campo magnético (circuito inductor), un circuito que al ser recorrido por la corriente eléctrica desarrolle pares de fuerza que pongan en movimiento el rotor (circuito inducido) y un colector de delgas con escobillas.

Al igual que ocurría con el generador de C.C., al pasar la corriente por el inducido del motor se desarrolla un campo magnético transversal que desvía de su posición original al campo principal inductor, produciéndose el fenómeno conocido de chispas en el colector. Para reducir el efecto perjudicial de la reacción del inducido también se utilizan polos de conmutación conectados en serie con el inducido. En el caso de querer invertir el sentido de giro del motor, se invierte tanto la polaridad de la corriente por el inducido como la de los polos de conmutación.

En el caso de optar por la desviación de las escobillas, habrá que hacerlo en sentido contrario al giro del motor.

19.8. Características de los motores de C.C.

Cuando la corriente recorre los conductores del inducido de un motor de corriente continua, se produce un par de giro en el rotor, lo que da lugar a que el motor, en un proceso de arranque, empiece a acelerarse hasta alcanzar sus revoluciones nominales. La corriente que aparece en el inducido dependerá, sobre todo, de la fuerza contraelectromotriz que se desarrolle en el inducido del motor. Seguidamente estudiaremos la relación que existe entre todas estas variables.

© Ediciones Paraninfo

19.8.1. Fuerza contraelectromotriz

Cuando el motor gira, impulsado gracias al par de giro desarrollado por los conductores del inducido cuando son recorridos por una corriente, dichos conductores cortan en su movimiento a las líneas de campo magnético del inductor, lo que hace que se induzca en ellos una fuerza electromotriz (es como si el motor se comportase como un generador de C.C. cuando gira). El sentido de dicha fuerza electromotriz es tal que, según la ley de Lenz, tiende a oponerse a la causa que la produjo. Es decir, a la corriente del inducido y a la tensión aplicada al motor.

Esta f.e.m., llamada fuerza contraelectromotriz (f.c.e.m.), produce un efecto de limitación de la corriente del inducido.

El valor de la fuerza contraelectromotriz se calcula exactamente igual que la f.e.m. de una dinamo:

$$E = K_1 n \Phi$$

La fuerza contraelectromotriz es proporcional al flujo inductor y al número de revoluciones del motor.

19.8.2. Corriente del inducido

Cuando el motor trabaja en vacío, el par motor originado por los conductores del inducido provoca un aumento de la velocidad del rotor debido a la poca resistencia que encuentra. Este aumento de velocidad produce, a su vez, una mayor f.c.e.m. que limita la corriente del rotor a valores de corriente de vacío. Cuando el motor arrastra una carga mecánica, la velocidad tiende a decrecer, con lo cual disminuye la f.c.e.m. y la corriente aumenta, elevándose con ella el par de fuerzas.

La corriente que el motor absorbe depende del trabajo mecánico que tenga que realizar.

Para determinar el valor de esta corriente aplicamos la ley de Ohm y la segunda ley de Kirchhoff:

$$I_i = \frac{U_L - E - 2U_e}{r_i}$$

I_i = Corriente del inducido (A).

U_L = Tensión de línea aplicada al inducido (V).

E = f.c.e.m. (V).

$2U_e$ = Caída de tensión de las escobillas (V).

r_i = Resistencia del inducido (Ω).

19.8.3. Corriente absorbida en el arranque

En el primer momento de arranque de un motor, el rotor está parado y, por tanto, la f.c.e.m. es nula. La corriente solo queda limitada por la pequeña caída de tensión de las escobillas, que suele ser del orden de 2 V, y por la pequeña resistencia del inducido (menor que 1 Ω).

$$I_{i(\text{arranque})} = \frac{U_L - 2U_e}{r_i}$$

La corriente absorbida por el motor en el arranque es muy elevada.

Cuando se conecta el motor directamente a la red, este absorbe una intensidad muy fuerte de la línea en el momento del arranque, lo que puede afectar no solo a la duración de los aparatos de conexión, sino a las líneas que suministran energía eléctrica. Estas fuertes corrientes sobrecargan las líneas de distribución, por lo que pueden producir caídas de tensión y calentamiento en los conductores de dichas líneas. Por esta razón, el REBT establece normas para reducir dichas corrientes de arranque a valores que sean aceptables. Así, tenemos que en la instrucción técnica **ITC-BT 47** se indica que:

Los motores de potencia superior a 0,75 kW deben estar provistos de reostatos de arranque o dispositivos equivalentes que no permitan que la relación de corriente entre el periodo de arranque y el de marcha normal que corresponda a su plena carga, según las características del motor que debe indicar en su placa, sea superior a la señalada en la Tabla 19.2.

Tabla 19.2. Relación máxima entre la corriente de arranque y la de plena carga en función de la potencia nominal para motores de C.C.

Potencia nominal del motor	Relación máxima entre la corriente de arranque y la de plena carga
De 0,75 W a 1,5 kW	2,5
De 1,5 kW a 5,0 kW	2,0
De más de 5,0 kW	1,5

Consulta en el REBT la Instrucción Técnica ITC-BT 47 sobre instalaciones de motores.

En un motor de corriente continua es muy simple limitar la corriente hasta valores aceptables, intercalando

© Ediciones Paraninfo

resistencias adicionales en serie con el inducido, tal como se muestra en la Figura 19.35.

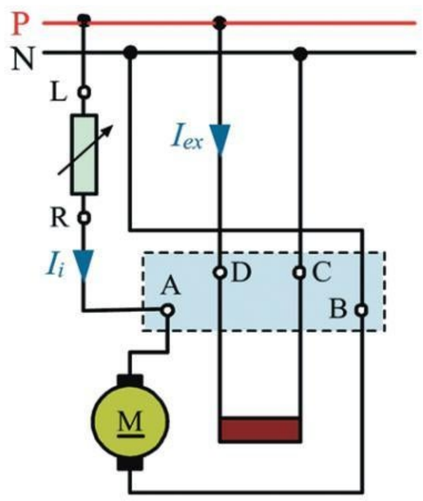


Figura 19.35. Esquema de conexiones del reostato de arranque de un motor de C.C.

El procedimiento de arranque se realiza de tal forma que según el motor aumenta su velocidad, se va disminuyendo el valor de las resistencias adicionales de arranque.

Actividad resuelta 19.1

Un motor de C.C. posee una resistencia interna en el inducido de 0,15 Ω, siendo la caída de tensión de las escobillas de unos 2 V. Determina la corriente absorbida por el motor en el arranque si se lo conecta a una tensión de 100 V. ¿Cuál será la corriente de arranque de este motor si se conecta en serie con el inducido una resistencia adicional de 3 Ω?

Solución:

La intensidad absorbida antes de que el motor comience a moverse, es:

$$I_{i(a)} = \frac{U_L - 2U_e}{r_i} = \frac{100 - 2}{0{,}15} = 653 \text{ A}$$

Al conectar en serie con el inducido la resistencia adicional, se aumenta artificialmente la resistencia del inducido y la corriente queda limitada:

$$I_{i(a)} = \frac{100 - 2}{0{,}15 + 3} = 31 \text{ A}$$

Actividad resuelta 19.2

Se dispone de un motor de C.C. con excitación independiente de las siguientes características: 8 kW; 220 V; resistencia del inducido = 0,23 Ω; caída de tensión de las escobillas = 2 V. Determina la corriente de arranque directo del motor. ¿Qué valor deberá poseer la resistencia adicional a conectar en serie con el inducido si se desea limitar la corriente de arranque a 1,5 veces la intensidad nominal?

Solución:

La intensidad en el arranque sin resistencias adicionales es:

$$I_{i(a)} = \frac{U_L - 2U_e}{r_i} = \frac{220 - 2}{0{,}23} = 948 \text{ A}$$

La corriente nominal del motor:

$$I = \frac{P}{U_L} = \frac{8.000}{220} = 36 \text{ A}$$

La corriente de arranque deberá limitarse hasta:

$$36 \text{ A} \cdot 1{,}5 = 54 \text{ A}$$

El valor de la resistencia adicional r_a lo obtenemos a partir de la expresión correspondiente a la intensidad de arranque:

$$I_{i(a)} = \frac{U_L - 2U_e}{r_i + r_a} \quad \Rightarrow \quad r_a = \frac{U_L - 2U_e - I_{i(a)} r_i}{I_{i(a)}} =$$

$$= \frac{220 - 2 - 54 \cdot 0{,}23}{54} = 3{,}8 \ \Omega$$

19.8.4. Rendimiento de un motor eléctrico

En muchas ocasiones no se conoce la potencia eléctrica que el motor toma de la red eléctrica para su funcionamiento. Sin embargo, sí conocemos la potencia útil que el motor puede entregar por su eje y el rendimiento con el que lo hace, por ejemplo, 3,5 kW con un rendimiento del 85 % ($\eta = 85\ \%$); ¿cuál es la potencia eléctrica que el motor tiene que absorber de la red en este caso?

Llamaremos P a la potencia eléctrica activa que el motor toma de la red eléctrica y P_u a la potencia útil o mecánica que el motor va a desarrollar en su eje. De la diferencia de estas potencias obtendremos la potencia perdida en el motor P_p:

$$P_p = P - P_u$$

La potencia se pierde, por un lado, por efecto Joule al pasar la corriente por los conductores de los bobinados (RI^2), por otro, por rozamientos en los rodamientos y en la ventilación y, por otro, en los circuitos magnéticos: histéresis y corrientes parásitas.

El rendimiento de un motor indica la relación porcentual que existe entre la potencia útil del motor y la potencia total o eléctrica, es decir:

$$\eta = \frac{Pu}{P} \cdot 100$$

© Ediciones Paraninfo

En nuestro ejemplo, la potencia eléctrica que el motor absorbe de la red, es:

$$P = \frac{Pu}{\eta} \cdot 100 = \frac{3.500}{85} \cdot 100 = 4.118 \text{ W}$$

¿Cuál es la potencia perdida en este caso?

Actividad resuelta 19.3

Un motor de C.C. posee una potencia útil de 7 kW, η = = 87 %, 400 V. Determina la potencia eléctrica tomada de la alimentación, así como la corriente que absorbe.

Solución:

$$P = \frac{7.000}{87} \cdot 100 = 8.046 \text{ W}$$

$$P = U_L I_L \quad \Rightarrow \quad I_L = \frac{P}{U_L} = \frac{8.046}{400} = 20 \text{ A}$$

19.8.5. Par motor

En los conductores del rotor de un motor aparecen una serie de fuerzas de origen electromagnético que producen un par de fuerzas M. Este par interno se encarga de hacer girar el rotor con la carga mecánica a mover.

El par de rotación se obtiene del producto de la fuerza por el radio (Figura 19.36).

$$M = F \cdot r$$

M = Par en newtons · metro (Nm).

F = Fuerza en newtons (N).

r = Radio en metros (m).

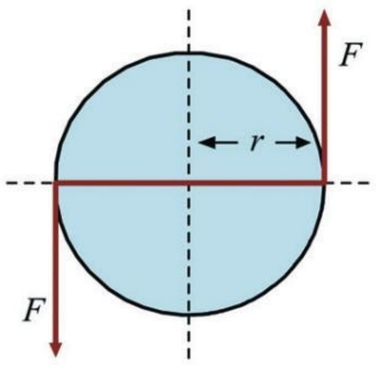


Figura 19.36. Par de fuerzas.

Actividad resuelta 19.4

Determina el par de rotación de un motor que posee un rotor con un diámetro de 0,20 metros y desarrolla una fuerza de 400 newtons.

Solución:

$$M = F \cdot r = 400 \cdot 0{,}10 = 40 \text{ Nm}$$

El par de rotación útil producido por el motor también se puede expresar como la relación existente entre la potencia útil desarrollada en el rotor y la velocidad angular de este.

$$M = \frac{P_u}{\omega}$$

M = Par en Nm.

P_u = Potencia útil del motor en W.

ω = Velocidad angular en rad/s.

Para calcular la velocidad angular del rotor partiendo de su velocidad de rotación en revoluciones por minuto (r. p. m.) se utiliza la siguiente expresión:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60}$$

Actividad resuelta 19.5

La potencia útil de un motor eléctrico es de 6 kW. Determina el par útil de rotación de dicho motor a plena carga, así como la fuerza media que impulsa a girar al rotor si este posee un diámetro de 28 cm y gira a una velocidad de 2.935 r. p. m.

Solución:

La velocidad angular del rotor es:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 2.935}{60} = 307 \text{ rad/s}$$

$$M = \frac{P_u}{\omega} = \frac{6.000}{307} = 19{,}6 \text{ Nm}$$

La fuerza media en el rotor del motor:

$$M = F \cdot r \quad \Rightarrow \quad F = \frac{M}{r} = \frac{19{,}6}{0{,}14} = 140 \text{ N}$$

El par motor que desarrollan los conductores del inducido al ser recorridos por la corriente dependerá, según la ley de Laplace, del valor de dicha corriente y del flujo desarrollado por el campo inductor. La expresión que relaciona el par con estas variables en un motor de C.C. es:

$$M = \frac{Np}{2\pi a} \Phi I_i$$

© Ediciones Paraninfo

Como los términos N, p y a son constantes (N = número de conductores del inducido, p = pares de polos del inductor, a = pares de circuitos del inducido):

$$M = K_2 \Phi I_i$$

El par motor es proporcional a la corriente del inducido y al flujo del campo magnético inductor.

19.8.6. Velocidad de giro

La velocidad de giro de un motor de corriente continua la podemos determinar combinando las ecuaciones de la f. c. e. m. y la de la corriente eléctrica. No teniendo en cuenta la caída de tensión producida por las escobillas, la velocidad adquiere la siguiente expresión:

$$n = \frac{U_L - r_i I_i}{K_1 \Phi}$$

La velocidad de giro de un motor de C.C. aumenta con la tensión aplicada, al disminuir la corriente del inducido y al disminuir el flujo producido por el campo inductor.

A partir de esta expresión se puede comprender el comportamiento del motor para una determinada carga y desarrollar sistemas de regulación de velocidad.

La regulación de velocidad de un motor se puede hacer de dos formas diferentes: manteniendo constante el flujo y variando la tensión aplicada al inducido o manteniendo constante la tensión y variando el flujo de la excitación. Este último sistema es el más empleado por su sencillez, ya que es suficiente con intercalar una resistencia variable (reostato de campo) en serie con el circuito que alimenta al devanado encargado de producir el campo magnético inductor, tal como se muestra en el esquema de conexiones de la Figura 19.37. Si se disminuye el flujo mediante el reostato de campo, la velocidad aumenta, y viceversa.

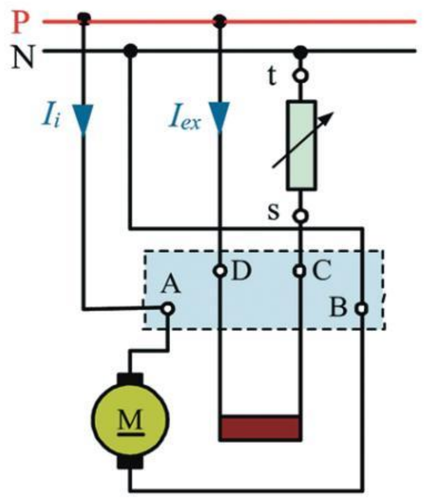


Figura 19.37. Esquema de conexiones de reostato de campo para la regulación de velocidad de un motor de C.C.

19.9. Conexión de los motores de C.C.

Por lo general, el campo magnético inductor o excitación de los motores de C.C. se produce con devanados dispuestos en las piezas polares y que generan dicho campo cuando son recorridas por la corriente eléctrica. Dependiendo de cómo se conecte el devanado de excitación respecto al inducido, al igual que ocurre con los generadores, se consiguen diferentes tipos de motores: motor de excitación independiente, motor de excitación en derivación o *shunt*, motor de excitación en serie y motor de excitación *compound*.

19.9.1. Motor con excitación independiente

En los motores con excitación independiente, el devanado de excitación se conecta a una fuente de tensión diferente a la aplicada al inducido, tal como se muestra en el esquema de conexiones de la Figura 19.38. En la placa de características es necesario indicar tanto la tensión del inducido como la de la excitación. Las características de funcionamiento son similares a las del motor con excitación en derivación, por lo que no insistiremos en su estudio.

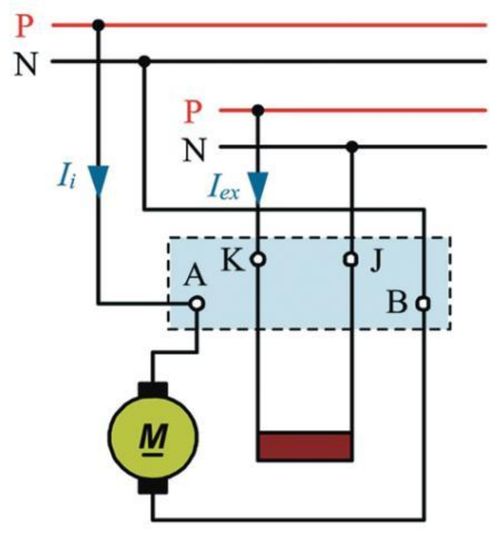


Figura 19.38. Esquema de conexiones de motor de C.C. con excitación independiente.

La separación de la excitación aporta la ventaja de mayores posibilidades de regulación de velocidad que el motor derivación. Gracias al avance de las nuevas tecnologías, hoy en día se fabrican equipos electrónicos para el arranque y control de motores de corriente continua. Dada la posibilidad que poseen estos equipos de controlar separadamente diferentes variables, en combinación con motores de excitación independiente presentan innumerables ventajas.

19.9.2. Motor con excitación derivación o *shunt*

En el motor *shunt* el devanado de excitación se conecta en paralelo con el inducido. El devanado de los polos de conmutación se conecta en serie con el inducido. En la Figura 19.39 se pueden apreciar las conexiones de la placa

© Ediciones Paraninfo

de bornes de un motor de corriente continua con polos de conmutación. Se ha incluido un reostato para limitar la corriente de arranque del inducido, y otro para poder regular el campo magnético inductor de la excitación.

Característica de velocidad. La característica de velocidad indica la relación que existe entre la velocidad del motor y la corriente del inducido. Recordemos que la expresión general de velocidad es:

$$n = \frac{U_L - r_i I_i}{K_1 \Phi}$$

Si se mantiene constante el campo magnético, como la tensión aplicada por la línea (U_L) también lo es, la velocidad solo depende de la caída de tensión del inducido ($r_i I_i$).

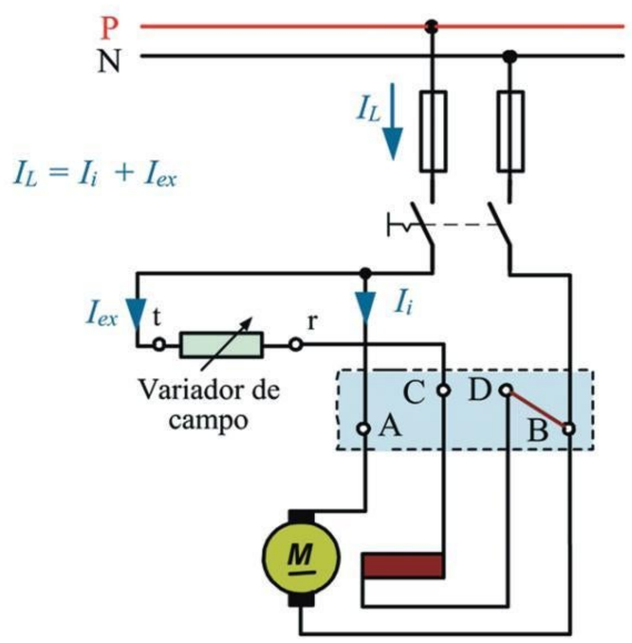


Figura 19.39. Esquema de conexiones de motor de C.C. con excitación en derivación.

Dado que el término $r_i\, I_i$ es muy pequeño, la velocidad tiende a disminuir un poco al aumentar la carga (curva *c*) (Figura 19.40). Por otro lado, cuando aumenta la intensidad del inducido, la reacción del inducido reduce el flujo del campo resultante, tendiendo a aumentar la velocidad con la carga (curva *a*). En conclusión, la velocidad de un motor con excitación en derivación permanece prácticamente constante para cualquier régimen de carga, tal como se puede apreciar en la curva característica $n = f(I_i)$ de la Figura 19.40 (curva *b*).

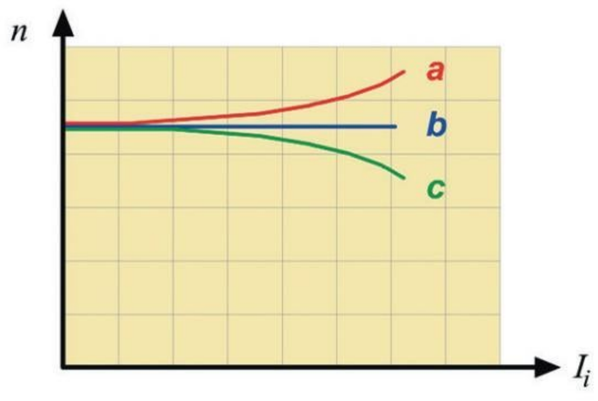


Figura 19.40. Característica mecánica de un motor derivación, $n = f(I_i)$.

En máquinas de gran potencia, cuando se trabaja a regímenes de carga elevados, la reacción del inducido provoca un debilitamiento considerable del campo principal, lo que hace que el motor tienda a elevar su velocidad y funcione inestablemente. Para evitar esto se incorpora el devanado de compensación que evita la distorsión y el debilitamiento del campo. Dado el alto precio de este sistema de compensación, solo se utiliza para máquinas de gran potencia.

La regulación de velocidad de un motor derivación entre amplios límites se consigue, con facilidad, regulando la corriente de excitación mediante un reostato de campo conectado en serie con el devanado de excitación, tal como se muestra en el esquema de conexiones de la Figura 19.39.

Característica del par motor. Relaciona el par motor en función de la intensidad de corriente del inducido, $M = f(I_i)$.

Teniendo en cuenta que la expresión del par es la siguiente:

$$M = K_2 \Phi I_i$$

Si el flujo permanece constante, el par es directamente proporcional a la corriente del inducido.

En la Figura 19.41 se puede apreciar la curva característica del par motor $M = f(I_i)$ de un motor con excitación en derivación.

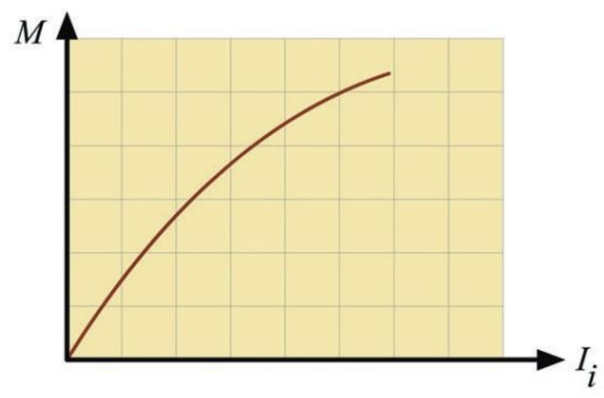


Figura 19.41. Curva característica del par motor.

Característica mecánica. Esta característica relaciona el par motor en función de la velocidad $M = f(n)$. La curva característica correspondiente se puede obtener a partir de las otras dos. Se puede decir que esta característica es la más representativa del funcionamiento del motor, ya que con ella podemos determinar la velocidad de giro del motor para un determinado par resistente aplicado al motor.

Si consideramos que el flujo magnético permanece constante, el par motor permanece también constante con la velocidad. El resultado se ha representado en la curva que se muestra en la Figura 19.42.

© Ediciones Paraninfo

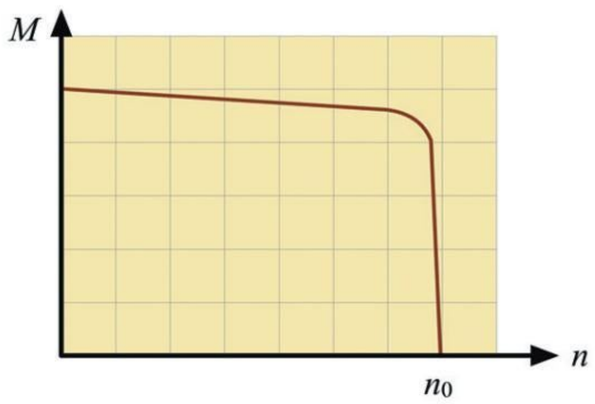


Figura 19.42. Característica mecánica de un motor derivación.

En resumen, en el motor con excitación derivación, la velocidad se mantiene relativamente constante para cualquier régimen de carga. Cuando se aumenta el par resistente aplicado al motor, la corriente del inducido aumenta para producir un par motor igual al par resistente.

Dada la estabilidad que permite el motor derivación, posee un campo de aplicación bastante amplio, como, por ejemplo, en máquinas, herramientas para metales, madera, plásticos, etcétera.

Actividad resuelta 19.6

Un motor de C.C. con excitación en derivación posee una potencia nominal de 5 kW a 110 V y un rendimiento del 90 %. En vacío absorbe una intensidad de corriente de la línea de 3 A y gira a 1.500 r.p.m. Considerando que la resistencia del inducido (r_i) es de 0,03 ohmios y la del devanado de excitación en derivación (r_d) de 100 ohmios, calcula la intensidad por el inducido, por la excitación, y la velocidad a plena carga.

Solución:

La potencia eléctrica absorbida por el motor para un rendimiento del 0,9 es:

$$P = \frac{P_u}{\eta} \cdot 100 = \frac{5.000}{90} \cdot 100 = 5.556 \text{ W}$$

La intensidad de corriente absorbida por el motor de la línea será igual a:

$$I_L = \frac{P_u}{U_L} = \frac{5.556}{110} = 55{,}56 \text{ A}$$

La intensidad de corriente de excitación es igual para cualquier régimen de carga:

$$I_{ex} = \frac{U_L}{r_s} = \frac{110}{100} = 1{,}1 \text{ A}$$

Dado que el devanado de excitación está en derivación con el del inducido, la intensidad por este último en carga y en vacío será igual a:

$$I_i = I_L - I_{ex} = 55{,}56 - 1{,}1 = 54{,}56 \text{ A}$$

$$I_{i0} = I_{L0} - I_{ex} = 3 - 1{,}1 = 1{,}9 \text{ A}$$

Dado que en un motor en derivación el flujo de la excitación permanece prácticamente constante para cualquier régimen de carga, en vacío se cumple que:

$$n_0 = \frac{U_L - r_i I_{i0}}{K_1 \Phi} \quad \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \quad K_1 \Phi = \frac{U_L - r_i I_{i0}}{n_0} = \frac{110 - 0{,}03 \cdot 1{,}9}{1.500} = 0{,}073295$$

La velocidad a plena carga será entonces:

$$n_0 = \frac{U_L - r_i I_{i0}}{K_1 \Phi} = \frac{110 - 0{,}03 \cdot 54{,}56}{0{,}073295} = 1.478{,}5 \text{ r.p.m.}$$

19.9.3. Motor con excitación en serie

En estos motores se conecta el devanado de excitación en serie con el inducido. En la Figura 19.43 se ha representado el esquema de conexiones de un motor serie.

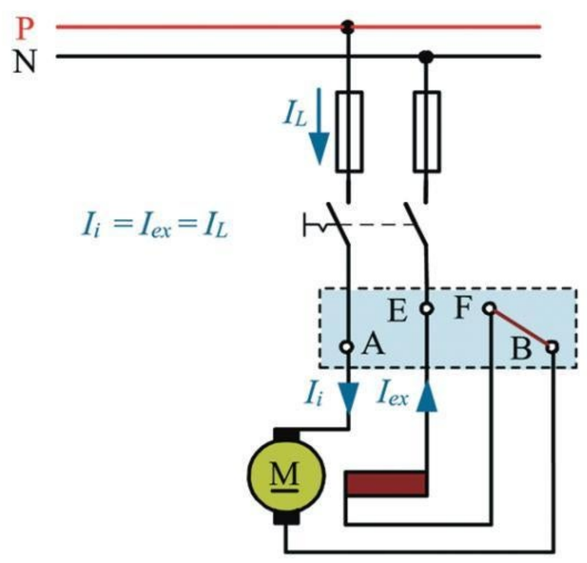


Figura 19.43. Esquema de conexiones de un motor de C.C. con excitación en serie.

Característica de velocidad. La particularidad más importante a observar es que la corriente de excitación es la misma que la del inducido:

$$I_i = I_{ex}$$

Como el flujo del campo magnético inductor es proporcional a la corriente de excitación, este depende directamente de la intensidad de carga del inducido:

$$\Phi = K_3 I_i$$

En este caso la velocidad vendría dada por la expresión:

$$n = \frac{U_L - \Sigma r I_i}{K_4 \Phi}$$

© Ediciones Paraninfo

El término $\Sigma\, rI_i$ indica las caídas de tensión producidas en la resistencia del inducido y en los devanados de excitación, polos de conmutación, etc. Por lo general, este término suele ser bastante pequeño, por lo que podemos decir, con bastante aproximación, que:

$$n \cong \frac{K_5}{\Phi}$$

En la Figura 19.44 se puede apreciar la curva característica de velocidad, que posee la forma de una hipérbola. Según aumenta la intensidad del motor, este va perdiendo velocidad. Para corrientes muy pequeñas el motor tiende a alcanzar velocidades muy elevadas que pueden llegar a ser peligrosas, por lo que no conviene hacer funcionar estos motores en vacío.

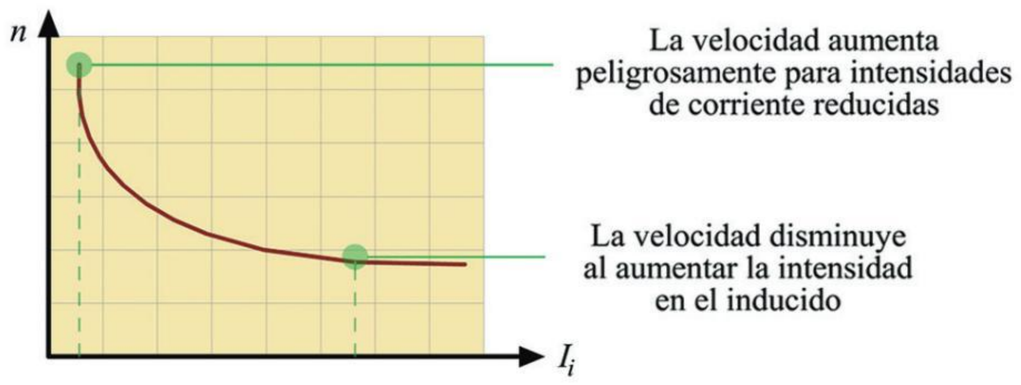


Figura 19.44. Característica de velocidad de un motor serie.

Característica del par motor. El par motor depende de la intensidad del inducido y del flujo magnético. En un motor serie tendremos entonces que:

$$M = K_6\, \Phi I_i = K_6 K_3\, I_i I_i = K_7\, I_i^2$$

Esta ecuación representa una parábola. El par motor crece con el cuadrado de la intensidad, por lo que responde bien en trabajos de tracción.

El motor serie se caracteriza por tener un par muy elevado de arranque, ya que si la intensidad en el arranque es muy elevada, el par crecerá en forma cuadrática a esta intensidad. En la práctica, la saturación y la reacción del inducido tienden a oponerse a que el par aumente con la misma rapidez que el cuadrado de la corriente, por lo que la curva $M = f(I_i)$ no llega a ser exactamente una parábola, tal como se muestra en la Figura 19.45.

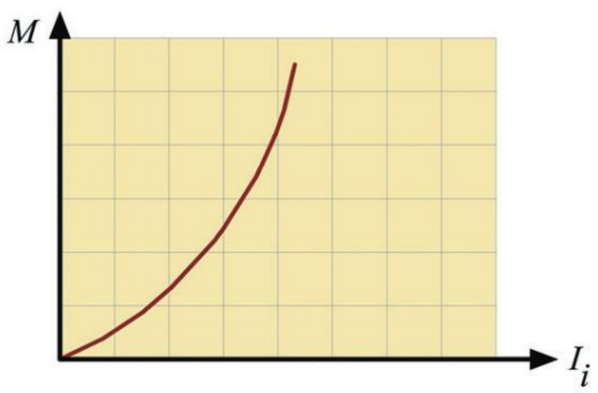


Figura 19.45. Característica de par motor de un motor serie.

Característica mecánica. En la Figura 19.46 se ha representado la curva $M = f(n)$. La velocidad del motor disminuye según se le exige un mayor par resistente. Cuando el par sobrepasa el punto (1), el motor no puede con la carga y tiende a pararse. Cuando el motor desarrolla un par por debajo del punto (2), el motor tiende a embalarse.

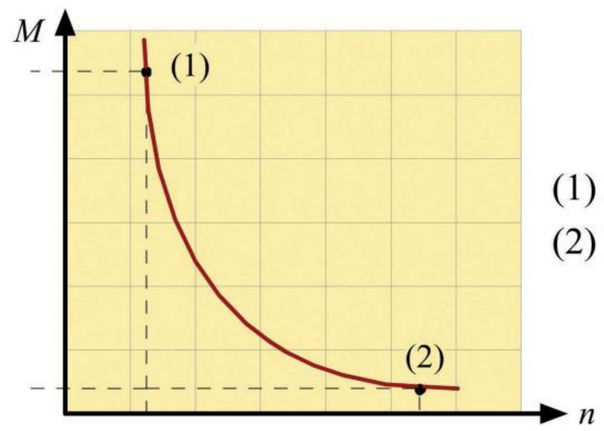


Figura 19.46. Característica mecánica de un motor serie.

Los motores serie se utilizan para los casos en que se exige un gran par de arranque, como, por ejemplo, en los tranvías, locomotoras, grúas, etcétera.

Además tiene otra característica que los hace especialmente adecuados para la tracción. Supongamos que un vehículo eléctrico asciende por una rampa; con un motor serie, tendería a ir más despacio en la rampa, ya que al demandar más intensidad, se reduce la velocidad y se aumenta el par. Esta reducción de velocidad permite al motor desarrollar un gran par con un aumento moderado de potencia. Con un motor derivación, al ascender la rampa, se mantendría la velocidad, con lo que el motor tendría que absorber una intensidad excesiva.

Regulación de velocidad. Para regular la velocidad en los motores serie se conecta un reostato regulador de campo en derivación con el devanado de excitación. Con este dispositivo se consigue desviar parte de la corriente que atraviesa la excitación. De esta forma se consigue controlar el flujo magnético de la excitación y, con él, la velocidad (Figura 19.47).

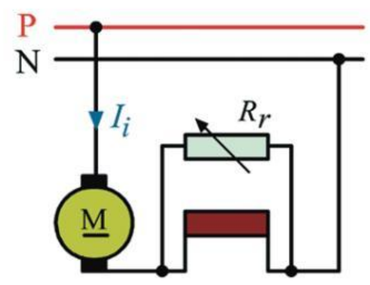


Figura 19.47. Esquema de conexiones del reostato de campo para regular la velocidad en un motor serie.

Actividad resuelta 19.7

Un motor serie de 110 V gira a 1.000 r.p.m. a su potencia nominal. La resistencia del inducido es de 0,11 Ω, la del

© Ediciones Paraninfo

devanado de excitación serie de 0,1 Ω, la del devanado de los polos de conmutación de 0,06 Ω y las del devanado de compensación de 0,03 Ω. La fuerza contraelectromotriz que se genera en el inducido a la velocidad nominal es de 103 V y se considera una caída de tensión en las escobillas de 2 V. Calcula: **a)** intensidad en la línea; **b)** intensidad de arranque; **c)** potencia eléctrica absorbida por el motor; **d)** potencia eléctrica perdida; **e)** velocidad cuando la intensidad de corriente por la línea se reduce a la mitad.

Solución:

Dado que todas las resistencias de los diferentes devanados quedan en serie, tendremos que:

a)

$$I_L = \frac{U_L - E - 2U_e}{\Sigma r} = \frac{110 - 103 - 2}{0{,}11 + 0{,}1 + 0{,}06 + 0{,}03}\,\frac{5}{0{,}3} = 16{,}67 \text{ A}$$

b)

$$I_{L(a)} = \frac{U_L - 2U_e}{\Sigma r} = \frac{110 - 2}{0{,}3} = 540 \text{ A}$$

c) $P = U_L \cdot I_L = 110 \cdot 16{,}67 = 1.834$ W

d) $P_{pe} = \Sigma r \cdot I^2 = 0{,}3 \cdot 16{,}67^2 = 83{,}4$ W

e) Para la velocidad nominal se cumple que:

$$n_n = \frac{U_L - \Sigma r\, I_{in} - 2U_e}{K_4 \Phi_n} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \quad K_4 \Phi_n = \frac{U_L - \Sigma r\, I_i - 2U_e}{n_n} = \frac{110 - 0{,}3 \cdot 16{,}67 - 2}{1.000} = 0{,}102999$$

Dado que el flujo en un motor serie es proporcional a la corriente por el motor, este quedará reducido en la misma proporción que la corriente (2 veces); la velocidad en vacío para la mitad de la intensidad nominal será de:

$$n = \frac{U_L - \Sigma r\, I_i - 2U_e}{K_4 \Phi_0} = \frac{110 - 0{,}3 \cdot (16{,}67/2) - 2}{0{,}102999/2} = 2.049 \text{ r.p.m.}$$

Actividad propuesta 19.1

Un motor derivación posee las siguientes características: los valores nominales de tensión y corriente son 220 V y 20 A; los valores de las resistencias de sus devanados son de 0,18 Ω para el inducido, 200 Ω para el inductor de derivación y 0,07 Ω para el devanado de los polos auxiliares de conmutación y compensación; 2 V de caída de tensión de las escobillas; 1.200 r.p.m. de velocidad a plena carga y un rendimiento global del 90 %. Calcula: **a)** intensidad en el devanado inductor y en el inducido; **b)** fuerza contraelectromotriz a plena carga; **c)** intensidad de arranque en el inducido; **d)** resistencia del reostato de arranque para limitar la intensidad de arranque por el inducido a 1,5 veces; **e)** par mecánico del motor a plena carga; **f)** velocidad del motor cuando este trabaja en vacío si se mide una corriente por la línea que alimenta al motor de 3 A.

La solución a esta Actividad propuesta la puedes encontrar dentro del MATERIAL WEB elaborado para este texto.

Actividad propuesta 19.2

Se dispone de un motor serie con las mismas características que el de la Actividad propuesta 19.1, exceptuando la resistencia del inductor serie que es de 220 Ω. Calcula las mismas magnitudes que se enumeran en dicha actividad.

La solución a esta Actividad propuesta la puedes encontrar dentro del MATERIAL WEB elaborado para este texto.

19.9.4. Motor de excitación *compound*

En estos motores se divide el devanado de excitación en dos partes. Una de ellas se conecta en serie con el inducido y la otra en derivación, tal como se muestra en el esquema de conexiones de la Figura 19.48.

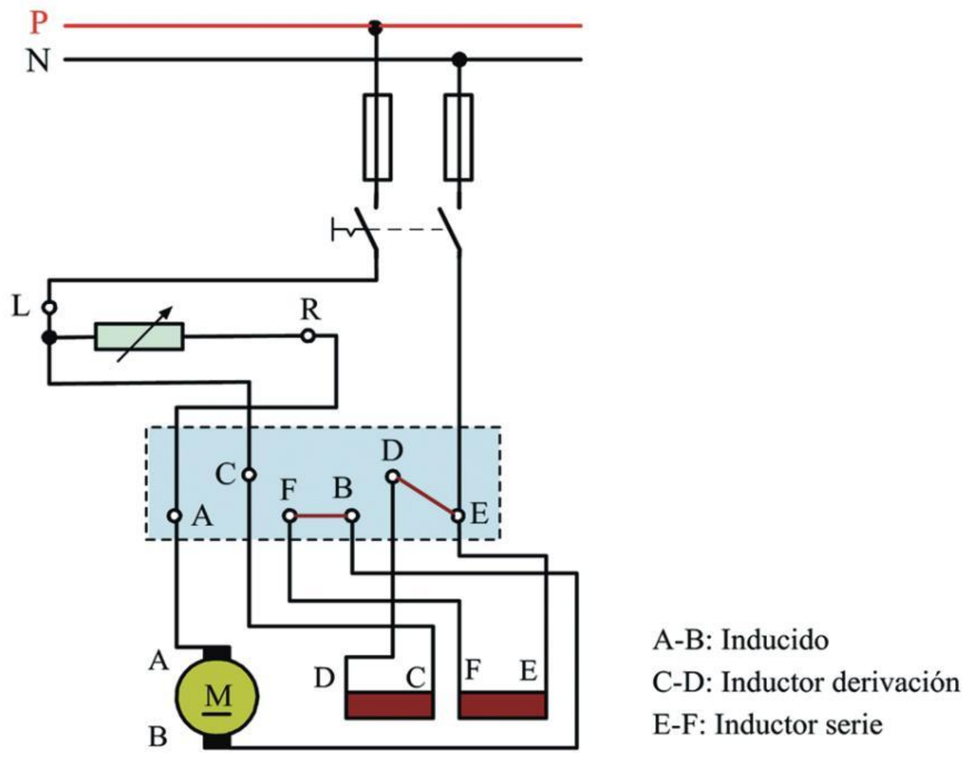


Figura 19.48. Esquema de conexiones de motor de C.C. con excitación *compound*.

Con el devanado en derivación se consigue evitar el peligro de embalamiento del motor por reducción de flujo,

© Ediciones Paraninfo

por lo que estos motores se comportan en vacío como los motores en derivación. En carga, el devanado en serie hace que el flujo aumente, por lo que la velocidad tiende a disminuir, aunque no en la misma medida en que lo hace un motor serie.

En la Figura 19.49 se muestran las curvas características correspondientes a un motor *compound*.

Los motores *compound* se utilizan en aquellos casos en los que el par de arranque de los motores *shunt* no es capaz de mover la carga en los primeros momentos, como, por ejemplo, en dispositivos de elevación.

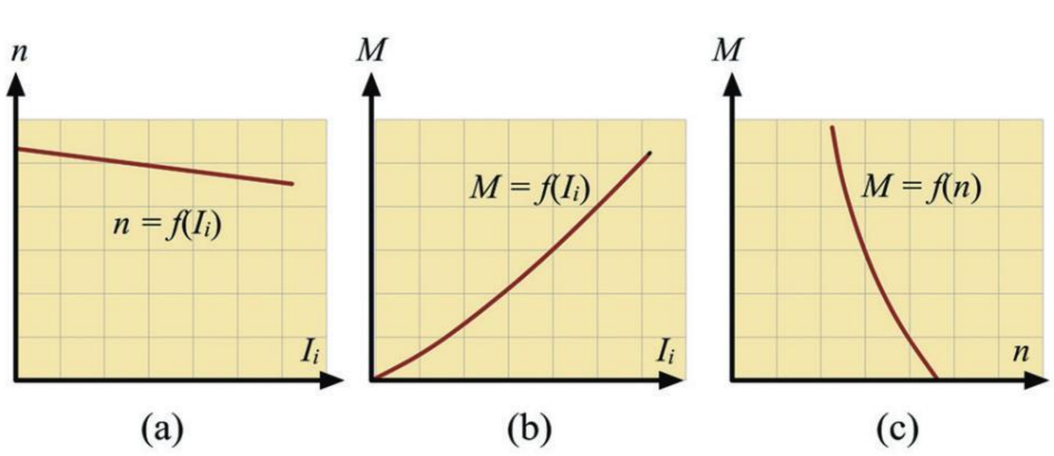


Figura 19.49. Curvas características de un motor *compound* : (a) característica de velocidad; (b) característica del par motor; (c) característica mecánica.

19.10. Inversión del sentido de giro de los motores de C.C.

Existen muchas aplicaciones en las que es necesario dotar a los motores con sistemas que sean capaces de hacerlos girar indistintamente en uno u otro sentido; como, por ejemplo, en sistemas de elevación, tracción eléctrica, etcétera.

Existen dos formas de invertir el sentido de giro de un motor:

a) Cambiando la polaridad del inducido, manteniendo fija la polaridad del devanado de excitación.

b) Cambiando la polaridad del devanado de excitación, manteniendo fija la polaridad del inducido.

En la práctica se suele optar por la primera (permutar la polaridad del inducido), ya que el invertir la polaridad de la excitación ocasiona ciertos inconvenientes, debidos a la alta inductancia que posee este devanado y por el magnetismo remanente de las piezas polares.

En la Figura 19.50(a) se muestra el esquema de fuerza correspondiente a la inversión de giro de un motor con excitación serie. Su funcionamiento es como sigue. Cuando se acciona el contactor KM1, mientras que el KM2 permanece abierto, se alimenta al inducido de tal forma que el terminal A se une con el polo positivo de la alimentación y el terminal B con el negativo. En este caso el motor gira en un determinado sentido. Para invertir el sentido de giro se desconecta el contactor KM1 y se conecta el KM2, con lo que se consigue que el terminal A del inducido quede conectado al negativo de la alimentación y el B al positivo. Observa que la polaridad del devanado inductor, marcado con los terminales C-D, no cambia de polaridad en ningún caso.

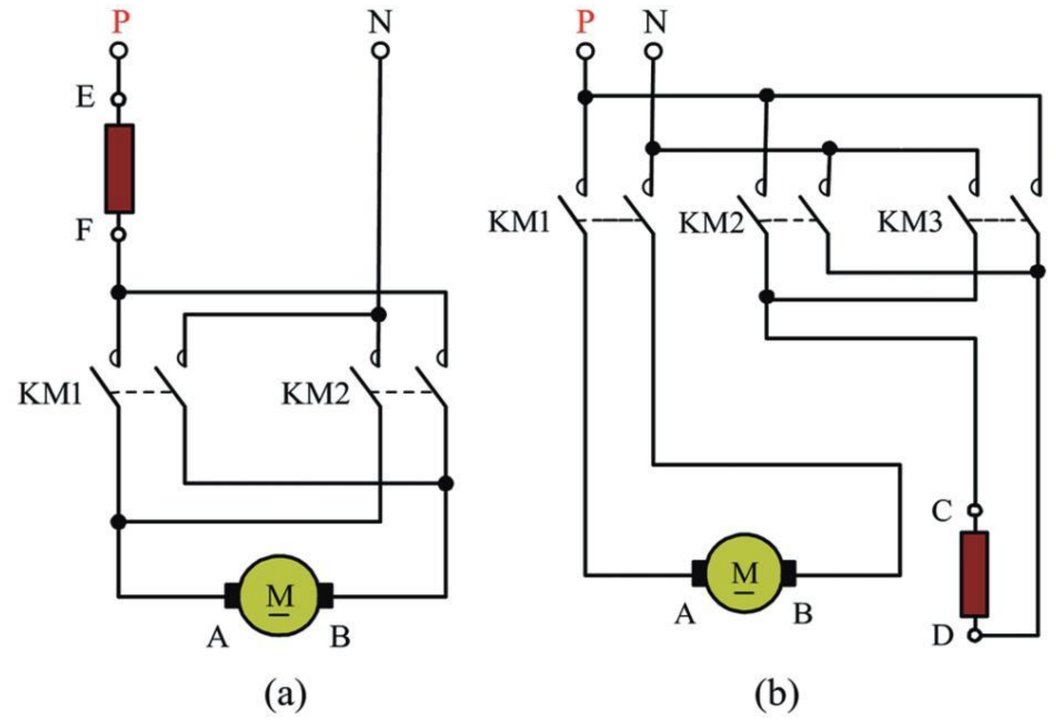


Figura 19.50. Esquemas de conexiones para la inversión de giro de un motor de C.C.: (a) motor serie; (b) motor derivación.

En la Figura 19.50(b) aparece el esquema de fuerza correspondiente a la inversión de giro de un motor con excitación derivación. Aquí se ha optado por invertir la polaridad del devanado de excitación, bien accionando el contactor KM2, o el KM3, mientras que la polaridad del inducido permanece fija y alimentada constantemente por el contactor KM1.

19.11. Regulación y control de los motores de C.C.

Hasta hace muy poco tiempo, el motor de corriente continua presentaba ciertas ventajas sobre los de corriente alterna. Nos referimos a la posibilidad de variar su velocidad de forma simple. Como estudiaremos más adelante, para variar la velocidad de un motor de C.A. es necesario modificar la frecuencia de la tensión de alimentación, procedimiento que hasta no hace mucho tiempo presentaba serias dificultades. Hoy en día, la evolución de la electrónica permite la fabricación de variadores de velocidad para motores de C.A. a precios cada vez más competitivos, lo que unido a la mayor robustez y rendimiento, menor mantenimiento y coste de estos motores, hace que los mismos estén desplazando en su uso a los motores de C.C.

En la actualidad, gracias al avance de la electrónica, ya no se suelen utilizar los reostatos como elementos de regulación para los motores de C.C. Los modernos reguladores son capaces de conocer en todo momento el punto de funcionamiento del motor, de tal forma que se consigue el

© Ediciones Paraninfo

control y regulación de todas las variables del mismo con la máxima efectividad.

En la Figura 19.51 se muestra, a modo de ejemplo y en representación esquemática, el sistema de regulación de un motor de C.C. de excitación independiente por dinamo tacométrica.

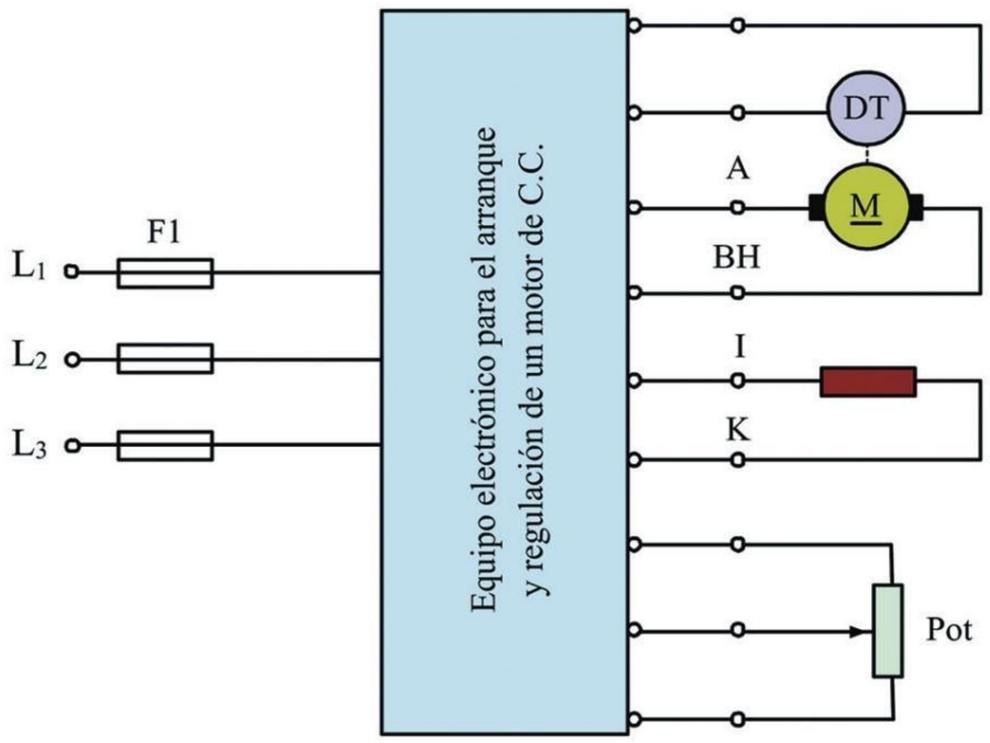


Figura 19.51. Esquema de conexiones de un equipo electrónico para el arranque y control de un motor de C.C. con excitación independiente.

El equipo se alimenta mediante corriente alterna trifásica que, a su vez, alimenta con C.C. regulada y de forma separada al devanado inductor e inducido del motor. Con el potenciómetro de referencia (Pot) se fija la velocidad de funcionamiento deseada. La tacodinamo (DT) es un pequeño generador de C.C. que genera una tensión proporcional a la velocidad con que es movida por el eje del motor. Esta envía una tensión de retorno al equipo electrónico de control. El equipo analiza las señales de estos dos elementos y proporciona al devanado del inducido y al inductor la tensión y corriente continua necesaria para adaptarse a la velocidad de referencia prefijada.

En el arranque el equipo proporciona al motor en todo el momento del proceso y de una forma automática los valores de tensión y corrientes requeridos.

19.12. Ensayos de los motores de C.C.

De la misma forma que se hacía para las dinamos, a los motores de C.C. también se los somete a una serie de ensayos con el fin de determinar sus características y de analizar su comportamiento en diferentes situaciones de funcionamiento. De esta forma, se pueden realizar ensayos para determinar el rendimiento, ensayos para evaluar el calentamiento de la máquina para diferentes regímenes de funcionamiento, medición de la resistencia de aislamiento, medición de la rigidez dieléctrica, etc. Además, a través de los ensayos se pueden determinar las características electromecánicas de los motores, las cuales relacionan la velocidad de rotación (n), el par motor (M) y la corriente del inducido (I_i).

Aparte de los elementos utilizados para ensayar las dinamos, ahora necesitaremos dispositivos que sean capaces de medir el par motor y que además sean capaces de someter el motor a diferentes regímenes de carga. Para ello es posible utilizar frenos de polvo magnético o dinamo-freno, que acoplados al eje del motor pueden someter a este a diferentes pares de frenado, pudiendo conocer en todo momento el par resistente aplicado.

En la Figura 19.52 se expone a modo de ejemplo el esquema de conexiones para realizar el ensayo de un motor de C.C. con excitación en derivación.

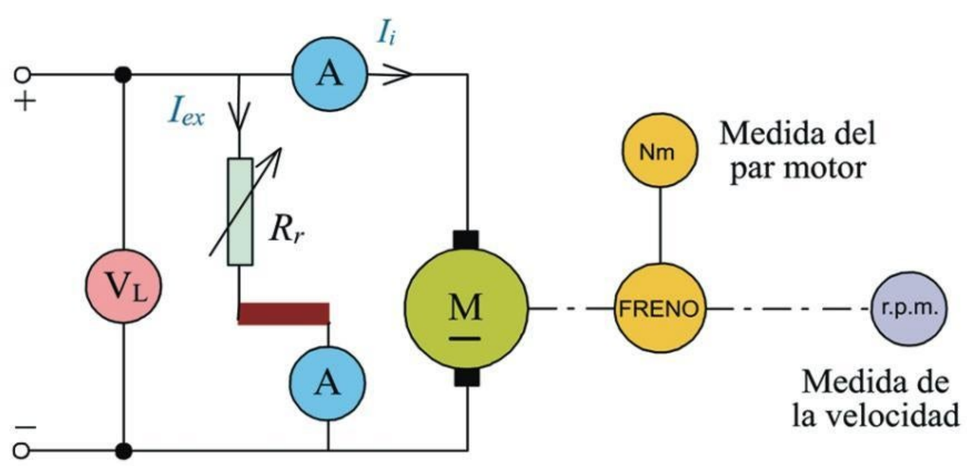


Figura 19.52. Esquema de conexiones para la obtención de las características electromecánicas de un motor de C.C. con excitación en derivación.

© Ediciones Paraninfo

Comprobación práctica en el laboratorio

19.1. **Constitución de una máquina de C.C.** Consigue una dinamo, analiza sus partes, prestando especial atención a la constitución del devanado inductor, al inducido y al conjunto formado por el colector de delgas y las escobillas.

19.2. **Ensayos en una dinamo de excitación independiente.** Partiendo del esquema de conexiones de la Figura 19.32, realiza el ensayo de una dinamo de excitación independiente para la obtención de las diferentes curvas características. Para llevar con éxito estos ensayos en el laboratorio de Electrotecnia, es importante observar previamente las características nominales de las máquinas a ensayar, tales como tipo de excitación, tensión nominal en bornes, velocidad nominal, potencia nominal, tensión en la excitación para dinamos con excitación independiente, etcétera.

Los datos obtenidos en cada punto del ensayo se anotarán, como en otras ocasiones, en un cuadro previamente preparado donde aparecerán las magnitudes que se van a medir.

19.3. **Ensayos en una dinamo con excitación serie y derivación.** Siguiendo las mismas recomendaciones que en la actividad anterior, consigue las curvas características de una dinamo con excitación en serie y de otra con excitación en derivación.

19.4. **Corriente de arranque de un motor de C.C.** Conecta un motor de C.C. (por ejemplo, un motor derivación) directamente a su tensión nominal, intercalando un amperímetro en el circuito del inducido. Comprueba cómo la corriente es muy elevada en el arranque y disminuye según se van alcanzando las revoluciones nominales. Repite la experiencia intercalando un reostato en serie con el inducido y observa cómo se consigue suavizar la corriente de arranque.

19.5. **Inversión de giro de un motor de C.C.** Conecta un motor serie para que gire en un determinado sentido. Invierte la polaridad del inducido y comprueba cómo se invierte el sentido de giro del motor.

19.6. **Curvas características de un motor con excitación en derivación.** Partiendo del esquema de conexiones de la Figura 19.52, realiza el ensayo de un motor con excitación en derivación para la obtención de las diferentes curvas características. Para llevar con éxito estos ensayos en el laboratorio de Electrotecnia, es importante observar previamente las características nominales de las máquinas a ensayar, tales como tipo de excitación, tensión nominal, velocidad nominal, potencia nominal, tensión en la excitación para motores con excitación independiente, etcétera.

Los datos obtenidos en cada punto del ensayo se anotarán, como en otras ocasiones, en un cuadro previamente preparado donde aparecerán las magnitudes a medir.

19.7. **Curvas características de un motor con excitación en serie y excitación independiente.** Siguiendo las mismas recomendaciones que en la actividad anterior, consigue las curvas características de un motor con excitación en serie y de otra con excitación independiente.

Al finalizar cada una de estas actividades deberás elaborar un informe-memoria sobre la actividad desarrollada, indicando los resultados obtenidos y estructurándolos en los apartados necesarios para una adecuada documentación de las mismas (descripción del proceso seguido, medios utilizados, esquemas y planos utilizados, cálculos, medidas, etc.).

© Ediciones Paraninfo

Actividades de comprobación

19.1. ¿Qué tipo de corriente se produce en el inducido de una dinamo?

a) Corriente alterna.

b) Corriente continua.

c) C.C. y C.A.

19.2. ¿De qué depende la polaridad de la f.e.m. de una dinamo?

a) Depende únicamente de la situación de los polos del inductor.

b) Del sentido de giro del inducido.

c) De la situación de los polos de conmutación.

19.3. El valor de la f.e.m. producido por una dinamo:

a) Aumenta con la velocidad del inducido.

b) Se puede modificar ajustando el campo magnético del inductor.

c) Es muy estable en una dinamo con excitación en serie.

19.4. La reacción del inducido de una dinamo:

a) Se elimina conectando polos de conmutación de derivación con el inducido.

b) Se puede evitar desviando las escobillas en sentido contrario al de giro del inducido.

c) Provoca chispas en el colector de delgas.

19.5. ¿Qué tipo de excitación produce una tensión de salida más constante para diferentes estados de carga de una dinamo?

a) Excitación derivación.

b) Excitación *compound*.

c) Excitación serie.

19.6. La fuerza contraelectromotriz de un motor de C.C.:

a) Aumenta con la corriente de excitación.

b) Disminuye al aumentar la corriente por el devanado inductor.

c) Aumenta con la velocidad.

19.7. La corriente que absorbe un motor:

a) Disminuye con el trabajo mecánico a realizar.

b) Aumenta con el trabajo mecánico a realizar.

c) Permanece constante para cualquier régimen de carga.

19.8. La corriente absorbida en el arranque de un motor de C.C.:

a) Si no se limita su valor puede causar perturbaciones en los sistemas de alimentación.

b) Depende exclusivamente de la resistencia del inducido.

c) Se puede limitar mediante resistencias adicionales conectadas en serie con el devanado inductor.

19.9. El par motor desarrollado por un motor de C.C.:

a) Disminuye con la corriente de la excitación.

b) Se hace más elevado con la corriente del inducido.

c) Permanece siempre constante.

19.10. ¿Cómo se puede modificar la velocidad de un motor de C.C.?

a) La velocidad permanece siempre constante.

b) Modificando la corriente aplicada al devanado inductor.

c) Modificando la tensión aplicada al inducido.

19.11. ¿Cómo se conectan respecto al inducido los polos de conmutación y el devanado de compensación de un motor de C.C.?

a) De forma independiente.

b) En serie.

c) En paralelo.

19.12. ¿Cuál de los motores de C.C. corre peligro de embalarse en vacío?

a) Excitación serie.

b) Excitación derivación.

c) Excitación *compound*.

19.13. ¿Cuál de los motores de C.C. mantiene su velocidad relativamente constante para cualquier régimen de carga?

a) Excitación serie.

b) Excitación derivación.

c) Excitación *compound*.

19.14. Un motor de C.C. de excitación en serie se conecta a una tensión de 440 V. Determina la corriente absorbida por el motor en el arranque si la resistencia interna del inducido es de 0,35 Ω, la resistencia del devanado inductor es de 0,1 Ω y la caída de tensión de las escobillas es de 2 V. Determina la corriente en el arranque del motor si se incorpora una resistencia adicional en serie con el inducido de 5 Ω.

© Ediciones Paraninfo

19.15. Un motor de C.C. de excitación independiente de 10 kW se conecta a una tensión de 110 V. Determina la corriente absorbida por el motor en el arranque, si la resistencia interna del inducido y de los polos de conmutación es de 0,3 Ω y la caída de tensión de las escobillas es de aproximadamente 2 V. ¿De qué valor tendrá que ser la resistencia del reostato de arranque que habrá que conectar en serie con el inducido para que la intensidad en el arranque no supere dos veces a la nominal?

19.16. Determina la potencia eléctrica y la corriente de un motor de C.C. de las siguientes características: potencia útil = 5 CV, η = 89 %, 110 V.

19.17. ¿Cuál será la fuerza media que aparece en la periferia del rotor de un motor si este rotor posee un diámetro de 15 cm y desarrolla un par motor de 100 Nm?

19.18. Determina el par nominal de rotación de un motor de 20 CV si en régimen nominal gira a una velocidad de 7.230 r. p. m.

19.19. Se desea conseguir que la fuerza media que aparezca en la periferia del rotor de un motor eléctrico sea de 1.000 N a una velocidad de 1.465 r. p. m. Averigua la potencia útil del motor si el diámetro del rotor es de 25 cm.

Actividades de evaluación resueltas

A continuación se dan los enunciados de una serie de actividades de evaluación. Estas actividades las podrás encontrar resueltas accediendo al MATERIAL WEB creado para este texto.

19.1. Un motor serie de corriente continua de 10 CV, 220 V, 44 A, 1.500 r. p. m., tiene una resistencia de inducido de 0,08 Ω, y una resistencia del devanado de excitación de 0,1 Ω. Calcula, cuando funciona a plena carga:

a) Valor de la fuerza contraelectromotriz.

b) Resistencia del reostato de arranque para que la intensidad de arranque no sea mayor que 1,5 veces la intensidad nominal.

c) Par motor útil.

19.2. Un generador de corriente continua, excitación serie, de resistencia interna (de inducido) 0,05 Ω y resistencia de excitación (de inductor) 0,5 Ω, suministra una corriente de 50 A, a una tensión de 220 V, a una carga conectada a su salida. Suponiendo despreciables las pérdidas mecánicas y en el hierro:

a) Representa el esquema del circuito equivalente del generador.

b) Halla la fuerza electromotriz generada.

c) Determina la potencia disipada por los circuitos inductor e inducido del generador.

d) Calcula el rendimiento de la máquina en este régimen de funcionamiento.

19.3. Un motor de corriente continua, excitación derivación, tiene una resistencia de inducido Ri = 0,5 Ω, una resistencia del circuito de excitación R_{EX} = 60 Ω y absorbe 50 kW a una tensión de 400 V. Determina:

a) Esquema del circuito eléctrico del motor.

b) Intensidades de excitación, de inducido y absorbida por el motor.

c) Fuerza contraelectromotriz del motor.

d) Rendimiento eléctrico de la máquina (se suponen despreciables las pérdidas mecánicas y en el hierro).

19.4. Un motor de corriente continua de excitación serie, de 15 CV de potencia útil y rendimiento del 85 %, es alimentado a una tensión de 240 V. Su resistencia del inducido es de 0,2 Ω, la del devanado inductor de 0,1 Ω y se considera una caída de tensión en las escobillas de 2 V. Calcula:

a) El valor de la fuerza contraelectromotriz y el par útil cuando su velocidad es de 1.200 r. p. m.

b) El valor de la resistencia del reóstato que limite la intensidad de arranque a 1,5 veces la intensidad nominal.

c) La potencia perdida por efecto Joule en el arranque.

19.5. Un motor de corriente continua con excitación en derivación, se encuentra conectado a una línea de 580 V y 135 A, produciendo en el eje una potencia de 95 CV y una velocidad de 1.100 r. p. m. Si la resistencia del inducido es R_i = 0,02 Ω, y la de excitación R_{ex} = 580 Ω, calcula:

a) Rendimiento en las condiciones de plena carga.

b) Dibuja el esquema y halla la fuerza contraelectromotriz.

c) Par motor.

© Ediciones Paraninfo

20 Máquinas eléctricas de corriente alterna

Contenidos

- **20.1.** El alternador trifásico
- **20.2.** El motor asíncrono trifásico
- **20.3.** Motor asíncrono de rotor bobinado o de anillos rozantes
- **20.4.** Arrancadores estáticos (electrónicos)
- **20.5.** Inversión de giro de un motor asíncrono trifásico
- **20.6.** Regulación de velocidad de los motores asíncronos trifásicos
- **20.7.** Motores monofásicos
- **20.8.** Motor síncrono trifásico
- **20.9.** Motores especiales
- **20.10.** El alternador asíncrono de inducción
- **20.11.** Ensayos de los motores de C.A.

La producción de energía eléctrica en grandes cantidades se realiza en las centrales eléctricas mediante el alternador trifásico. Los alternadores son máquinas eléctricas que presentan mayores ventajas que las dinamos, como por ejemplo, la ausencia de colectores de delgas y escobillas para la extracción de la energía del generador.

Por otro lado, el motor de C.A. es el que más se utiliza para la mayor parte de las aplicaciones. Esto es debido fundamentalmente a que consiguen un buen rendimiento, bajo mantenimiento y sencillez en su construcción, sobre todo en los motores asíncronos trifásicos.

Objetivos

- Describir el funcionamiento del alternador trifásico.
- Analizar la constitución del alternador trifásico.
- Describir el funcionamiento del motor asíncrono.
- Seleccionar las características de un motor asíncrono.
- Seleccionar el sistema de arranque más adecuado de un motor asíncrono trifásico.
- Describir los tipos de ensayos fundamentales y normalizados que se deben realizar con los motores de C.A., identificando las magnitudes que se deben medir y explicando las curvas características que relacionan dichas magnitudes.

20.1. El alternador trifásico

Al igual que las dinamos, los alternadores basan su funcionamiento en el principio general de la inducción electromagnética. Cuando estudiábamos la dinamo pudimos comprobar que cuando se ponen a girar conductores en el seno de un campo magnético lo que se produce es una f. e. m. inducida de carácter senoidal que se podía conectar a un circuito exterior mediante dos anillos colectores y un par de escobillas. En la práctica es mucho más interesante hacer girar las piezas polares que producen el campo magnético **inductor** y dejar fijos los conductores del **inducido.**

El la Figura 20.1 se muestra el aspecto de un alternador trifásico elemental de inductor móvil e inducido fijo. El inducido, situado en el estator, lo forman tres devanados independientes y separados entre sí 120º. El inductor, situado en el rotor, está formado por un electroimán que es alimentado por una corriente continua de excitación.

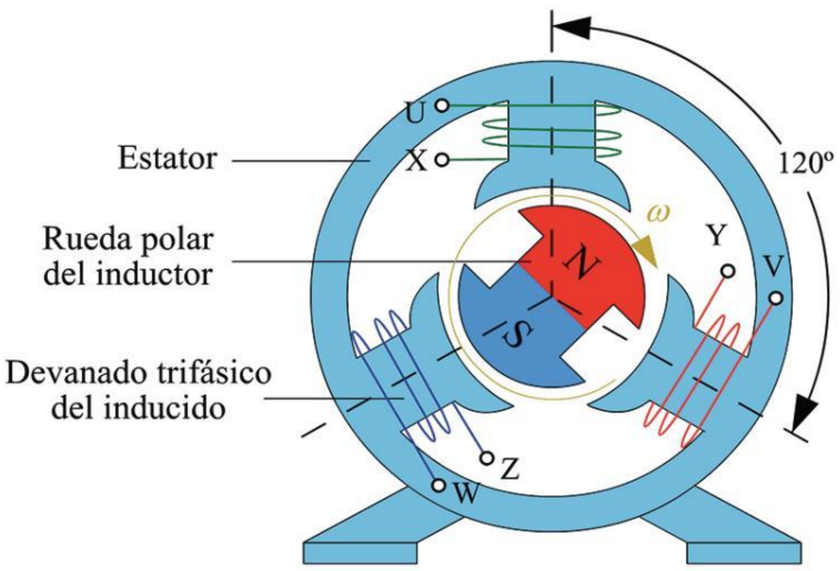


Figura 20.1. Alternador trifásico.

Al disponer los devanados del inducido en el estator se evita la utilización de los correspondientes tres anillos colectores y escobillas para la extracción de la C.A. trifásica generada. Además, hay que pensar que las tensiones y corrientes con las que trabaja un alternador industrial son bastante elevadas (del orden de 10 a 20 kV y cientos de amperios), lo que complicaría aún más la utilización de colectores.

20.1.1. Constitución de un alternador de inducido fijo

Al igual que la dinamo, el alternador consta de un circuito inductor y un circuito inducido (Figura 20.2).

El **circuito inductor** está constituido por un cierto número de electroimanes, cuyo bobinado se realiza de tal forma que los polos presenten alternativamente una polaridad norte y sur, y cuyo número total es siempre par. La alimentación de los devanados del inductor se realiza con corriente continua a través de dos anillos colectores y un par de escobillas.

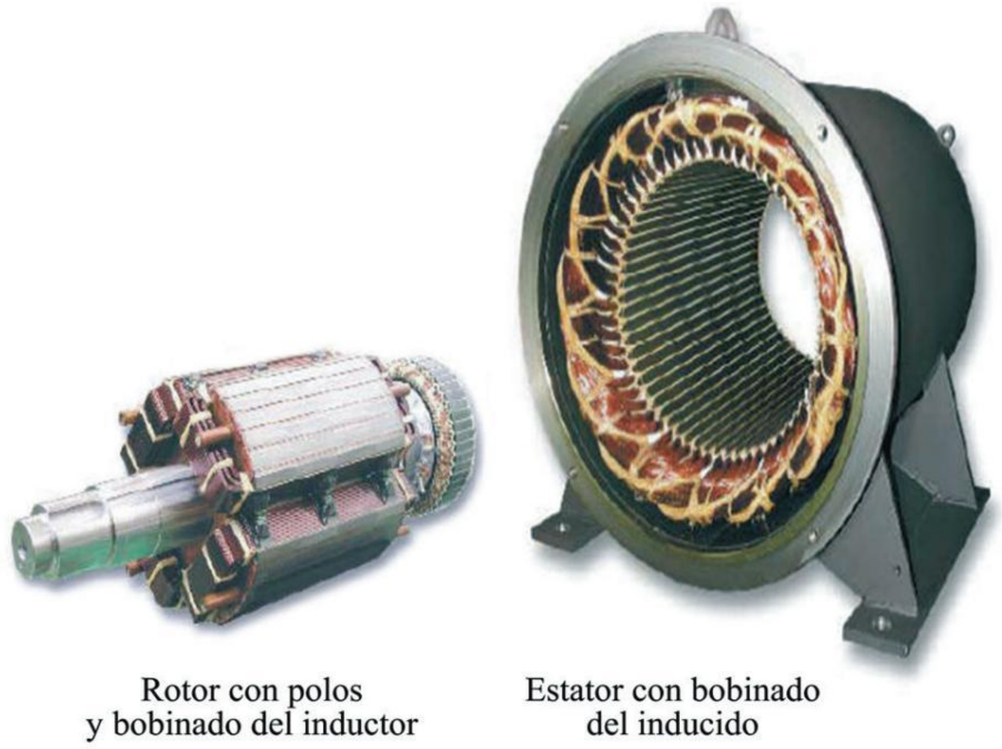


Figura 20.2. Aspecto de un pequeño alternador.

En la Figura 20.3 se muestra el aspecto de un alternador, donde se ha situado en el rotor un sistema inductor consistente en cuatro piezas polares (2 pares de polos) a las que se alimenta con C.C. desde una fuente de energía exterior y a través de un par de anillos colectores.

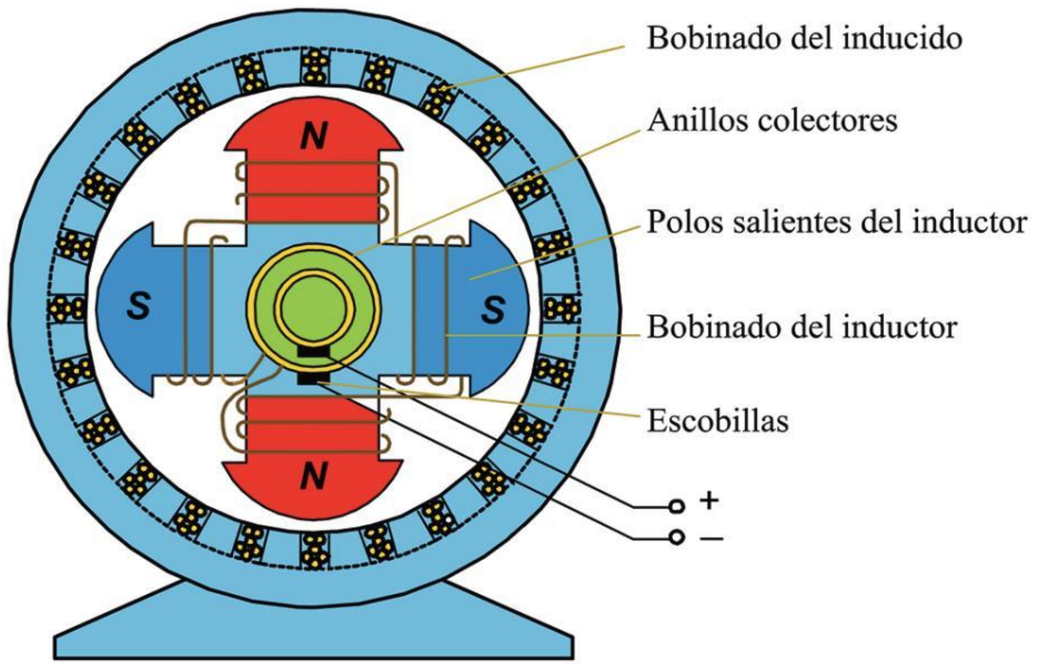


Figura 20.3. Constitución de un alternador de inducido fijo de un par de polos.

Dado que el alternador no genera C.C. es imposible llevar a cabo un sistema de autoexcitación como ocurría con las dinamos. Existen diferentes métodos para alimentar de C.C. el devanado inductor para la generación del campo magnético; indicaremos aquí los dos más importantes.

a) Mediante una dinamo **excitatriz** acoplada al eje del alternador, tal como se muestra en el esquema de conexiones de la Figura 20.4. En este esquema los terminales K-J se corresponden con el devanado inductor del alternador; la dinamo excitatriz posee una autoexcitación *shunt* y la tensión continua que proporciona la dinamo se conecta al devanado inductor a través de un reostato de regulación.

© Ediciones Paraninfo

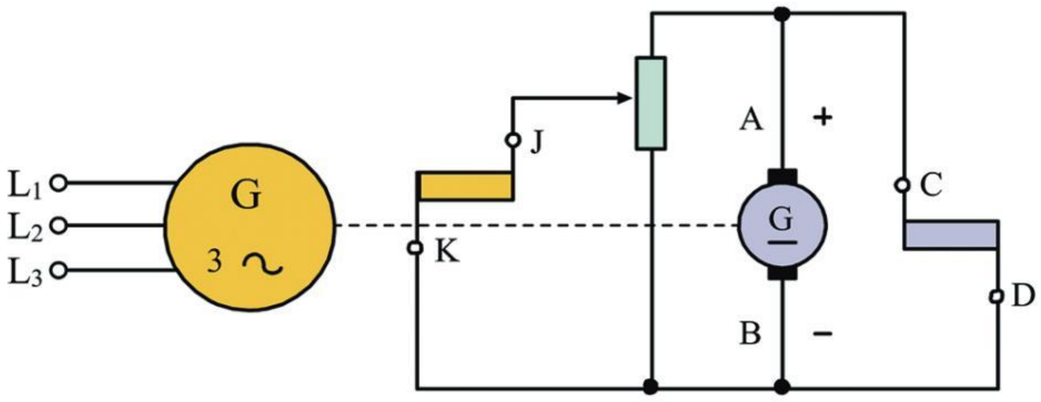


Figura 20.4. Excitación de un alternador mediante excitatriz.

b) Mediante alternador auxiliar acoplado al eje del alternador (Figura 20.5). En este caso se monta un pequeño alternador de inducido móvil en el mismo eje que el alternador principal. El devanado inductor (K-J) del alternador auxiliar se alimenta a través de un rectificador monofásico conectado a los bornes de salida del alternador principal. Hay que pensar que las piezas polares del alternador principal poseen un cierto magnetismo remanente, por lo que al ponerse en movimiento producen una pequeña f. e. m., pero suficiente para comenzar con el ciclo de cebado. El alternador auxiliar produce C.A. trifásica que, al ser convertida a C.C. mediante un puente rectificador trifásico, sirve de alimentación al devanado inductor del alternador principal.

La ventaja que presenta este tipo de excitación es que si acoplamos el puente rectificador trifásico al eje del alternador no se hace necesario el uso de colectores y escobillas para la alimentación del circuito inductor.

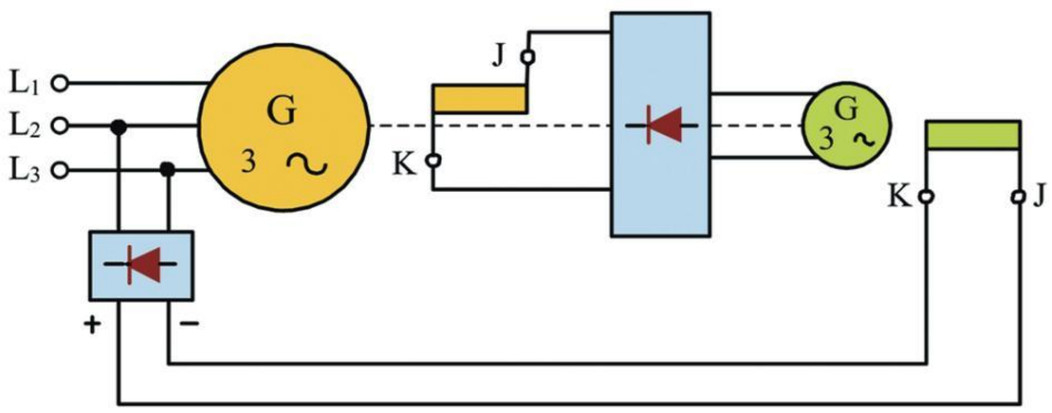


Figura 20.5. Alternador excitado mediante pequeño alternador de inducido móvil.

El **circuito inducido** está constituido por tres bobinas situadas 120º una de otra y alojadas en ranuras practicadas en un núcleo cilíndrico y hueco de chapas magnéticas (Figura 20.3). La conexión del devanado trifásico suele ser en estrella, conectando el neutro a tierra.

El devanado de cada fase del inducido del alternador se compone de varias bobinas, conectadas de tal forma que la fuerzas electromotrices generadas en cada uno de los conductores que las componen se sumen.

En la Figura 20.6 se muestra el aspecto del bobinado del inducido de un alternador con 24 ranuras en el estator.

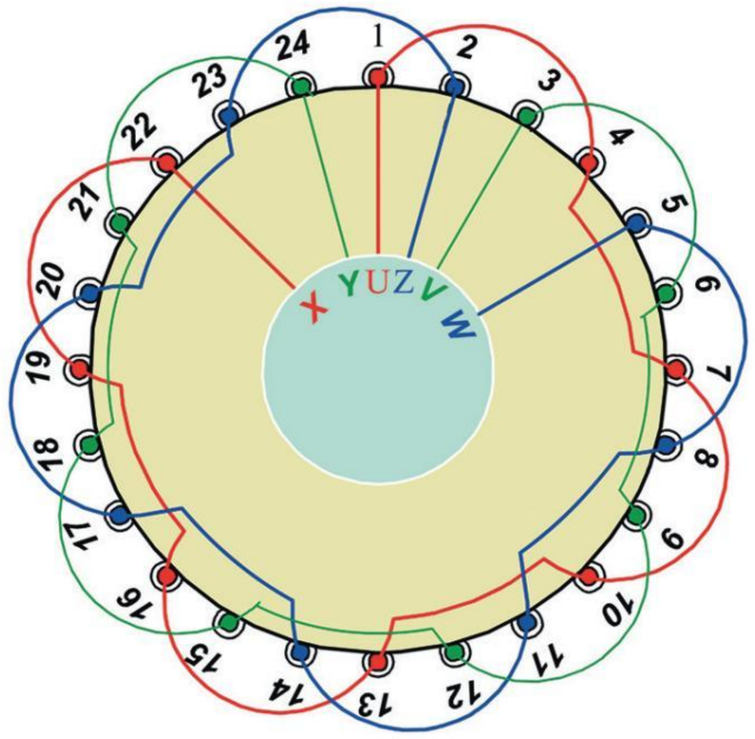


Figura 20.6. Bobinado del inducido de un alternador de 24 ranuras.

En la Figura 20.7 se ha dibujado el mismo bobinado en representación esquemática.

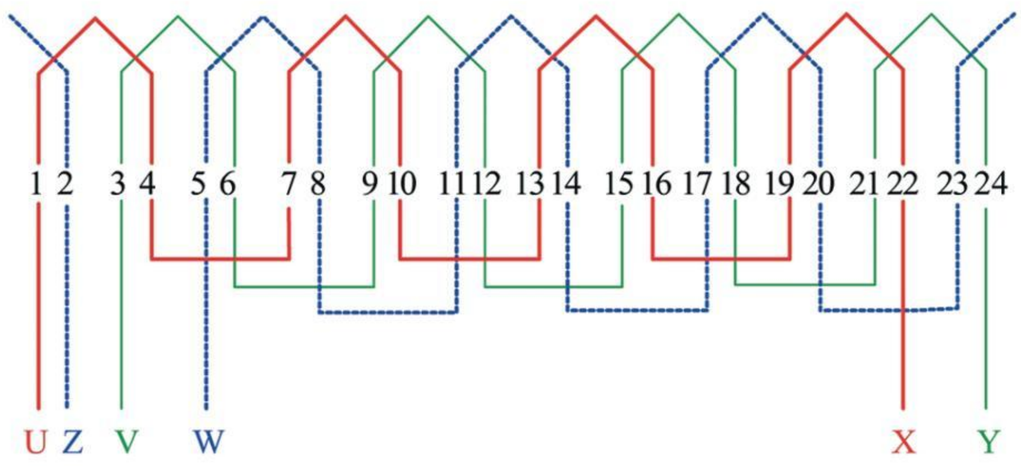


Figura 20.7. Esquema del bobinado del inducido de un alternador de 24 ranuras.

20.1.2. Magnitudes características de un alternador

Dentro de las magnitudes características de un alternador, destacaremos la frecuencia y la fuerza electromotriz inducida.

Frecuencia del alternador

Para que un alternador produzca una C.A. de frecuencia fija, como corresponde al funcionamiento normal de un alternador, debe girar a una velocidad constante, conocida con el nombre de **velocidad síncrona.**

La frecuencia o número de ciclos por segundo que produce un alternador es directamente proporcional a la velocidad del alternador y al número de pares de polos del circuito inductor. Hay que pensar que cuando los conductores del inducido son cortados por un polo norte, del rotor en movimiento, se induce un semiciclo de tensión positiva, y que al ser cortados por un polo sur consecutivo se induce un semiciclo de tensión negativa. Esto indica que cada vez que un conductor pasa frente a un par de polos se produce un

© Ediciones Paraninfo

ciclo completo. Así, por ejemplo, un alternador que posee un par de polos y gira a una velocidad de 50 revoluciones por segundo, producirá una frecuencia de 50 ciclos por segundo. Ahora, si dotamos a este alternador con dos pares de polos se producirá una frecuencia de 100 ciclos por segundo. A raíz de estas consideraciones se deduce que:

$$f = p\,\frac{n}{60}$$

f = Frecuencia de la C.A. (Hz).

p = Pares de polos del inductor.

n = Velocidad en revoluciones por minuto (r. p. m.).

Actividad resuelta 20.1

Determina la frecuencia que produce un alternador que gira a una velocidad de 1.500 r. p. m. si este posee dos pares de polos.

Solución:

$$f = p\,\frac{n}{60} = 2\,\frac{1.500}{60} = 50 \text{ Hz}$$

Actividad resuelta 20.2

¿A qué velocidad deberá girar un alternador con cuatro pares de polos para producir una frecuencia de 50 Hz?

Solución:

De la expresión general tenemos que la velocidad síncrona de un alternador es:

$$n = \frac{60\,f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{4} = 750 \text{ r. p. m.}$$

Actividad resuelta 20.3

Para el accionamiento de un alternador se dispone de una turbina hidráulica de baja velocidad. Determina el número de pares de polos de que deberá disponer el alternador para conseguir una frecuencia de 50 Hz si la turbina gira a 375 r. p. m.

Solución:

$$p = \frac{60\,f}{n} = 8$$

Fuerza electromotriz inducida

El valor eficaz de la f. e. m. inducida en cada una de las fases del alternador se constituye a partir de la suma de todas las f. e. m. de todos los conductores activos de la bobina del inducido de una fase que se encuentren bajo la influencia de uno de los polos del inductor.

Teniendo en cuenta el principio de inducción electromagnética, para un alternador con N espiras por bobina y fase, al girar cortando un campo magnético de flujo máximo igual $\Phi_{máx}$, a una frecuencia f, el valor eficaz de la f. e. m. se puede expresar así:

$$E_f = 4{,}44 \cdot f \cdot K_w \cdot N \cdot \Phi_{máx}$$

K_w es el coeficiente de forma del devanado. Este coeficiente es menor que la unidad y depende de la configuración del devanado de las fases del inducido. Hay que tener en cuenta que, en los alternadores trifásicos, el campo magnético que corta a los conductores del inducido nunca llega a ser seonidal puro, por lo que es necesario aplicar un factor de corrección para tener en cuenta este fenómeno.

Actividad resuelta 20.4

Un alternador tetrapolar a 50 Hz posee un bobinado inducido con un coeficiente de devanado de 0,88 y 200 espiras por fase. Si el flujo máximo producido por los polos del inductor es de 10 mWb, calcula la f. e. m. eficaz por fase. ¿Cuál sería la tensión de línea en vacío si sus devanados se conectan en triángulo? ¿Y si se conectan en estrella?

Solución:

$$E_f = 4{,}44 \cdot f \cdot K_w \cdot N \cdot \Phi_{máx} =$$
$$= 4{,}44 \cdot 50 \cdot 0{,}88 \cdot 200 \cdot 10 \cdot 10^{-3} = 391 \text{ V}$$

Para la conexión de los devanados en triángulo la tensión de línea coincide con la generada por cada fase (Figura 20.8):

$$U_L = E_f = 391 \text{ V}$$

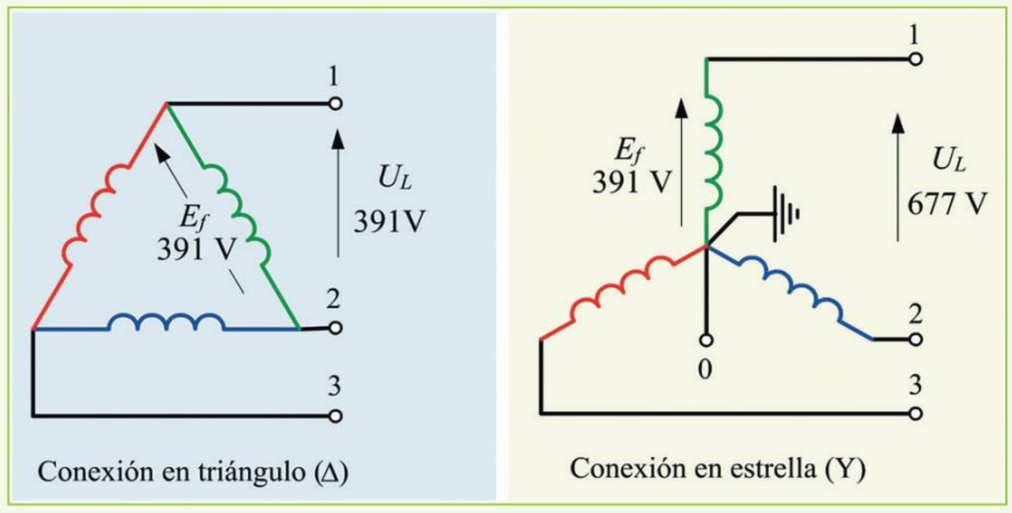


Figura 20.8.

Al conectar los devanados en estrella la tensión que se obtiene en la línea aumenta en:

$$U_L = \sqrt{3} \cdot E_f = \sqrt{3} \cdot 391 = 677 \text{ V}$$

© Ediciones Paraninfo

Característica de vacío

En la práctica, los alternadores giran a una velocidad rigurosamente constante, con el fin de conseguir siempre la misma frecuencia. De esta forma la f. e. m. que se produce en los conductores del inducido depende fundamentalmente del valor del campo magnético del inductor.

En la Figura 20.9 se ha trazado la característica de vacío de un alternador, donde se relaciona la f. e. m. obtenida en vacío en función de la intensidad de corriente de excitación que alimenta a los devanados de los polos inductores. Esta curva se puede obtener mediante un procedimiento similar al de una dinamo y su forma es muy semejante a la de la curva de magnetización.

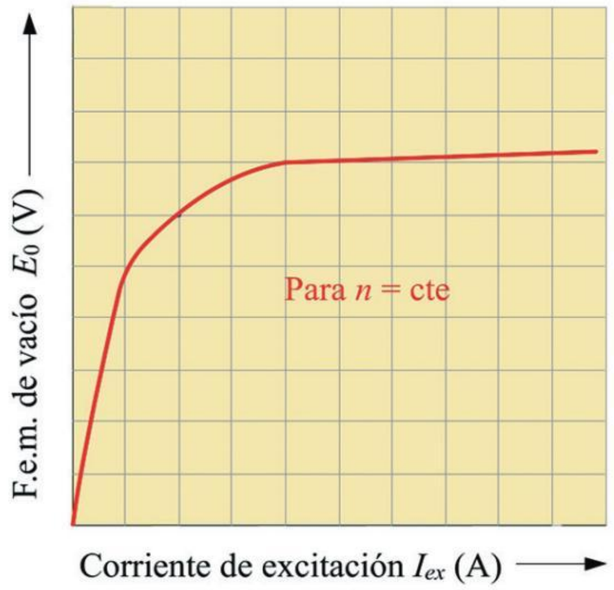


Figura 20.9. Característica de vacío.

Característica externa

Nos suministra información de la tensión que proporciona el alternador para diferentes intensidades de corriente del inducido a velocidad e intensidad de excitación constante. En este caso se aprecia que, para cargas inductivas, a medida que aumenta la corriente que suministra el alternador a la carga, se produce una caída de tensión interna, que hace que la tensión de salida disminuya con la intensidad. Si embargo, si la carga es del tipo capacitivo, la tensión proporcionada por el alternador tiende a aumentar a consecuencia del efecto magnetizante del flujo magnético de reacción (Figura 20.10).

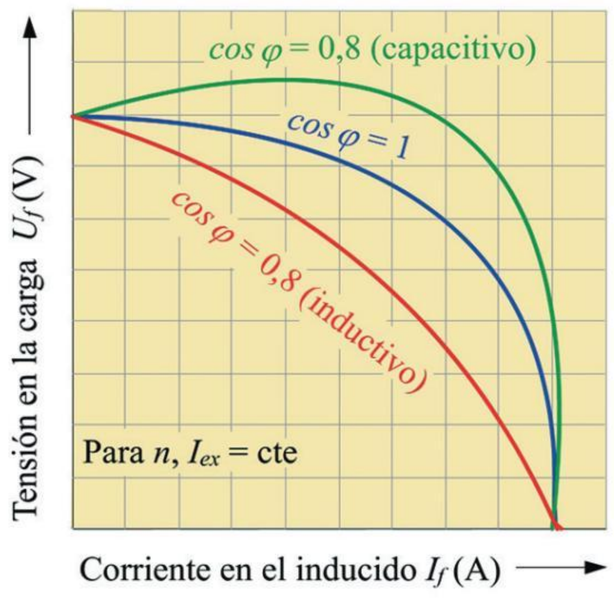


Figura 20.10. Característica externa de un alternador.

20.1.3. Acoplamiento de alternadores

Cuando se desea aumentar la potencia suministrada por un sistema de generación de C.A. se acoplan en paralelo varios alternadores. También es corriente acoplar alternadores a la red eléctrica con el fin de aportar energía eléctrica al sistema general de producción.

Para realizar el acoplamiento con éxito es necesario que se cumplan las siguientes condiciones:

a) La tensión de los alternadores a acoplar debe ser igual.

b) La frecuencia de los alternadores también debe ser la misma.

c) El orden de sucesión de fases de los alternadores debe ser igual.

d) En el momento de la conexión las tensiones de los alternadores deben estar en fase. Es decir, las sinusoides que representan a las tensiones de cada uno de los alternadores deben superponerse exactamente.

Para conseguir que se cumplan estas condiciones se actúa sobre la velocidad y corriente de excitación de los alternadores mientras se siguen con aparatos de medida adecuados las diferentes variables del proceso. En la actualidad, los procesos de acoplamiento entre alternadores o entre alternadores y la red eléctrica se realizan mediante dispositivos automáticos e informatizados de sincronización.

Los alternadores deben funcionar a una velocidad rigurosamente constante para conseguir mantener la frecuencia a un valor fijo. Cuando se le exige una mayor potencia eléctrica al alternador, este reacciona proporcionando una mayor resistencia al movimiento, por lo que la tendencia es perder velocidad. Si la velocidad llegara a descender se perdería el sincronismo con la red a la que está acoplado y habría que desconectar automáticamente el generador de la red. Para evitar esto, se dota al conjunto de alternador y grupo motor, que le impulsa, de un sistema de regulación automático de velocidad.

Así, por ejemplo, imaginemos un alternador que es movido por una turbina de vapor. En el caso de que se le exija, por parte de la carga, una mayor potencia eléctrica al alternador, se le proporciona a la turbina un mayor caudal de vapor con el fin de mantener la velocidad estable.

Dado que el alternador también debe proporcionar una cierta cantidad de potencia reactiva a los receptores que lo requieran, se lo dota de un sistema que controla automáticamente la corriente de excitación del inductor, produciéndose una mayor potencia reactiva al aumentar dicha corriente de excitación.

© Ediciones Paraninfo

20.2. El motor asíncrono trifásico

Al igual que los motores de C.C., el motor asíncrono trifásico de C.A. funciona gracias a los fenómenos de inducción electromagnética. Son los más utilizados en la industria por su sencillez, robustez y fácil mantenimiento. Estos motores consiguen mantener su velocidad bastante estable para diferentes regímenes de carga y poseen un buen par de arranque. Como su velocidad depende de la frecuencia de la C.A. con la que se los alimenta, la única forma de regular su velocidad de giro consiste en alimentarlos a través de variadores electrónicos de frecuencia.

Dependiendo del tipo de rotor que utilicen, existen dos tipos fundamentales: *motores de rotor en cortocircuito o jaula de ardilla* y *motores de rotor bobinado*.

20.2.1. Principio de funcionamiento del motor asíncrono trifásico

Los motores de inducción asíncronos trifásicos basan su funcionamiento en la generación de un campo magnético giratorio en el estator, coincidente con la velocidad síncrona, que corta a los conductores del rotor y los hace girar.

Antes de ver cómo se origina el campo giratorio, vamos a estudiar, mediante un sencillo experimento, el principio general de funcionamiento de los motores asíncronos.

Para ello, se dispone de un imán en forma de U, de modo que pueda girar por su eje central mediante una manivela (Figura 20.11). Muy próximo a los polos se sitúa un disco de material conductor (cobre o aluminio), de tal forma que también pueda girar. Al girar el imán permanente se puede comprobar que el disco también gira, pero a un poco menos velocidad que el imán.

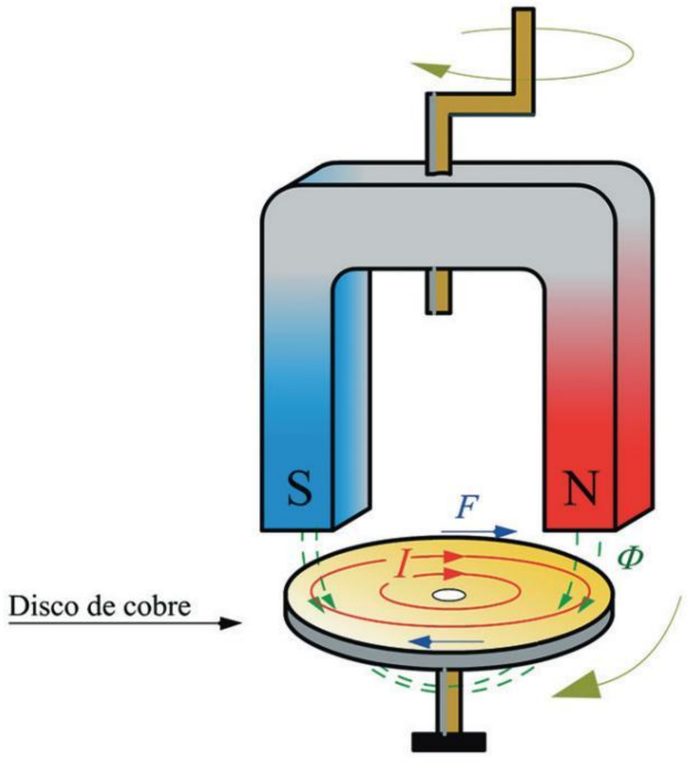


Figura 20.11. Al hacer girar el imán, el disco de material conductor también gira.

¿Por qué gira el disco si es de un material no magnético?

Cuando el imán se pone en movimiento, las líneas de campo que atraviesan el disco también se ponen en movimiento (movimiento relativo del campo magnético frente a un conductor eléctrico fijo), por lo que, según el principio de inducción electromagnética (ley de Faraday), en el disco se induce una f. e. m.

Al estar el disco encerrado eléctricamente en sí mismo (cortocircuito), aparecen corrientes eléctricas por él. Estas corrientes eléctricas quedan sometidas a la acción del campo magnético del imán, por lo que según la ley de Laplace se originan en el disco un par de fuerzas que ponen este en movimiento.

Según la ley de Lenz, el disco gira en un sentido tal que tiende a oponerse a las variaciones del campo magnético que originaron la corriente eléctrica, por lo que el disco gira en el mismo sentido que el campo magnético y que el imán.

El disco nunca puede alcanzar la misma velocidad de giro que el imán, ya que si esto ocurriese, el movimiento relativo de ambos se anularía y el campo magnético dejaría de ser variable respecto al disco, por lo que desaparecería la f. e. m. inducida, la corriente y con ella el par de fuerzas.

Campo magnético giratorio

Si conseguimos crear un campo magnético giratorio aprovechando las variaciones de corriente de un sistema de C.A. trifásica, como el desarrollado por el imán de la experiencia anterior, podremos hacer girar al rotor de un motor asíncrono.

El estator de un motor asíncrono trifásico se construye de igual manera que el de los alternadores trifásicos. En él se alojan tres bobinas desfasadas entre sí 120º. Cada una de estas bobinas se conecta a cada una de las fases de un sistema trifásico, por lo que por cada una de ellas circularán las corrientes instantáneas i_1, i_2 e i_3 (Figura 20.12). Si analizamos los valores que alcanza el flujo magnético creado por cada una de estas corrientes en cada instante del tiempo, podremos comprobar que se genera un campo magnético de carácter giratorio.

Para el instante (a) la corriente i_1 es cero, i_3 posee un valor positivo e i_2 negativo, lo que provoca un campo magnético instantáneo del sentido marcado por la flecha de la Figura 20.12(a) (se ha aplicado la regla del sacacorchos para las corrientes salientes y entrantes). En el punto (b), las corrientes i_2 e i_3 son negativas, mientras que i_1 ahora es positiva, por lo que el campo magnético ha avanzado 1/4 de ciclo. Si seguimos estudiando punto por punto, podremos observar cómo se obtiene un campo magnético giratorio, que en este caso avanza a la misma velocidad angular que el

© Ediciones Paraninfo

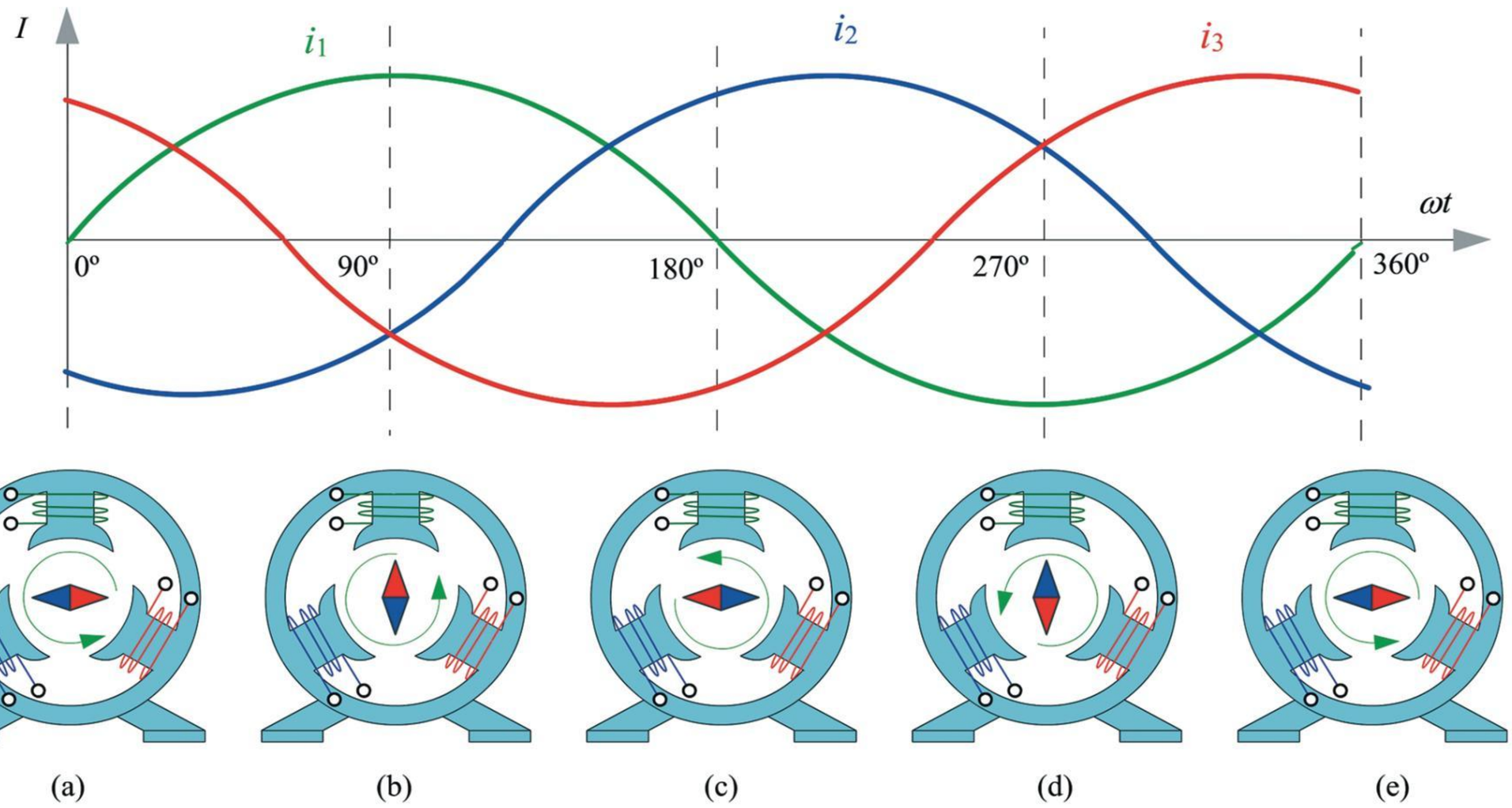


Figura 20.12. Campo magnético giratorio.

de la pulsación de la corriente. En el punto (e) se completa un ciclo y se inicia uno nuevo.

Al igual que ocurría en un alternador, la velocidad síncrona del campo giratorio depende del número de polos con el que se construyan los devanados en el estator y de la frecuencia:

$$n_s = \frac{60f}{p}$$

n_s = Velocidad del campo giratorio (r. p. m.).

f = Frecuencia de la red (Hz).

p = Número de pares de polos del devanado estatórico.

Actividad resuelta 20.5

Se dispone de un motor asíncrono trifásico de 2 pares de polos. Averigua la velocidad del campo giratorio para la frecuencia europea de 50 Hz y para la americana de 60 Hz.

Solución:

$$n_{s(50\ Hz)} = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1.500 \text{ r. p. m.}$$

$$n_{s(60\ Hz)} = \frac{60 \cdot 60}{2} = 1.800 \text{ r. p. m.}$$

20.2.2. Motor asíncrono trifásico de rotor en cortocircuito

En el **estator** de estos motores se colocan las bobinas encargadas de producir el campo magnético giratorio. Estas se alojan en ranuras practicadas en un núcleo formado, por lo general, por paquetes de chapa magnética, tal como se muestra en la Figura 20.13. Las tres bobinas quedan desfasadas entre sí 120º eléctricos, y los 6 terminales de que constan se conectan a la placa de bornes del motor, pudiendo conectarse posteriormente en estrella o en triángulo.

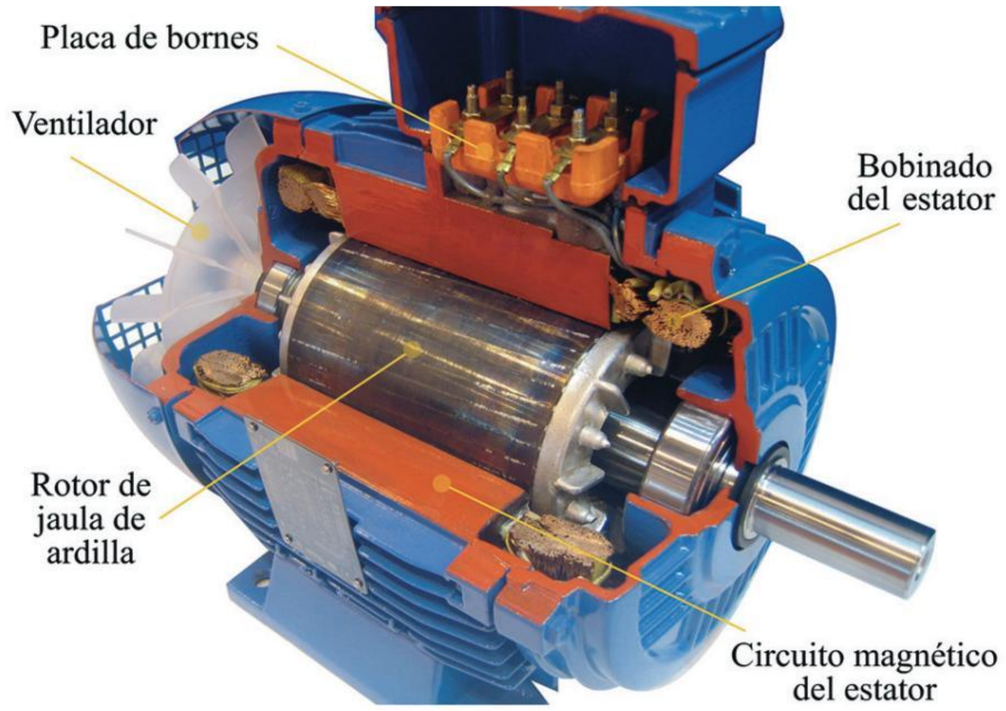


Figura 20.13. Constitución de un motor asíncrono trifásico de rotor en cortocircuito.

El **rotor** es cilíndrico y en él se sitúan conductores de aluminio alojados en las ranuras del núcleo y cortocircuitados

© Ediciones Paraninfo

por sus extremos mediante anillos conductores (Figura 20.14). A este rotor también se le da el nombre de jaula de ardilla. En motores de pequeña potencia el rotor se construye fundiendo en un bloque integral unas varillas de aluminio junto con los anillos.

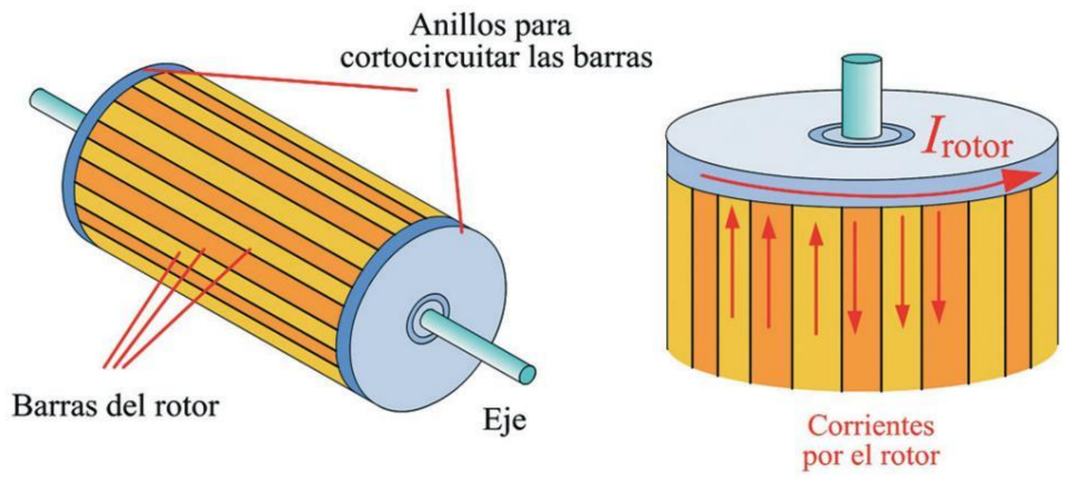


Figura 20.14. Rotor en cortocircuito o de jaula de ardilla.

El funcionamiento del motor asíncrono trifásico de rotor en cortocircuito es como sigue. Al ser recorridas las bobinas del estator por un sistema de corrientes trifásicas, se origina en él un campo magnético giratorio. Los conductores del rotor, que en un principio está parado, son barridos por el campo magnético giratorio, por lo que se induce en ellos una f. e. m. Como estos conductores están en cortocircuito, aparece una corriente por ellos que en unión con el campo magnético del estator da lugar a un par de fuerzas que pone en movimiento el rotor en el mismo sentido que el campo giratorio (Figuras 20.14 y 20.16).

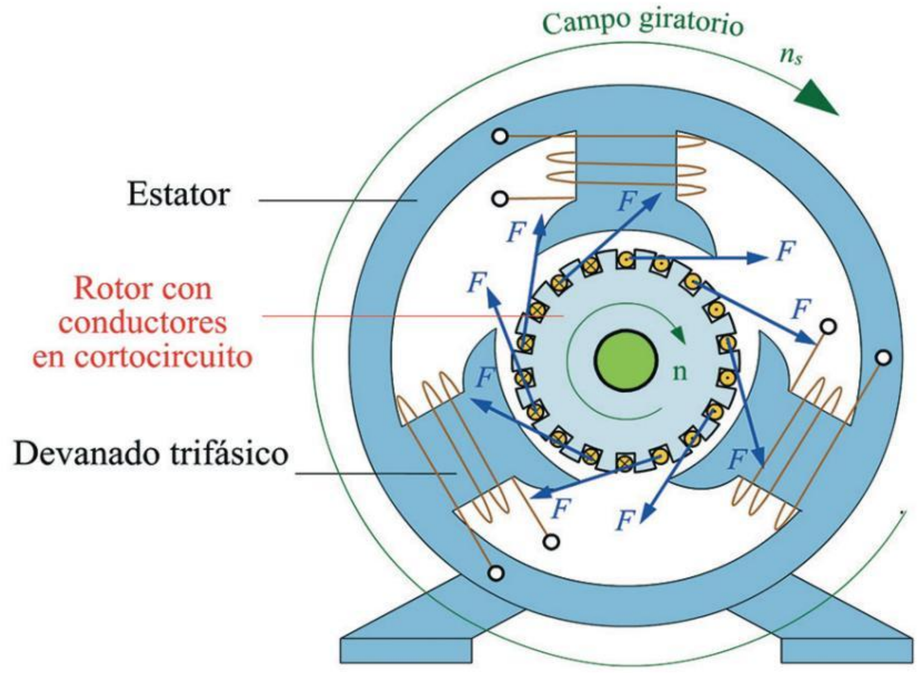


Figura 20.16. El campo magnético giratorio induce corrientes en los conductores del rotor que, al ser cortadas por dicho campo, desarrollan fuerzas mecánicas que hacen que gire el rotor.

La velocidad del rotor nunca puede alcanzar a la del campo giratorio, ya que de ser estas iguales no se induciría tensión

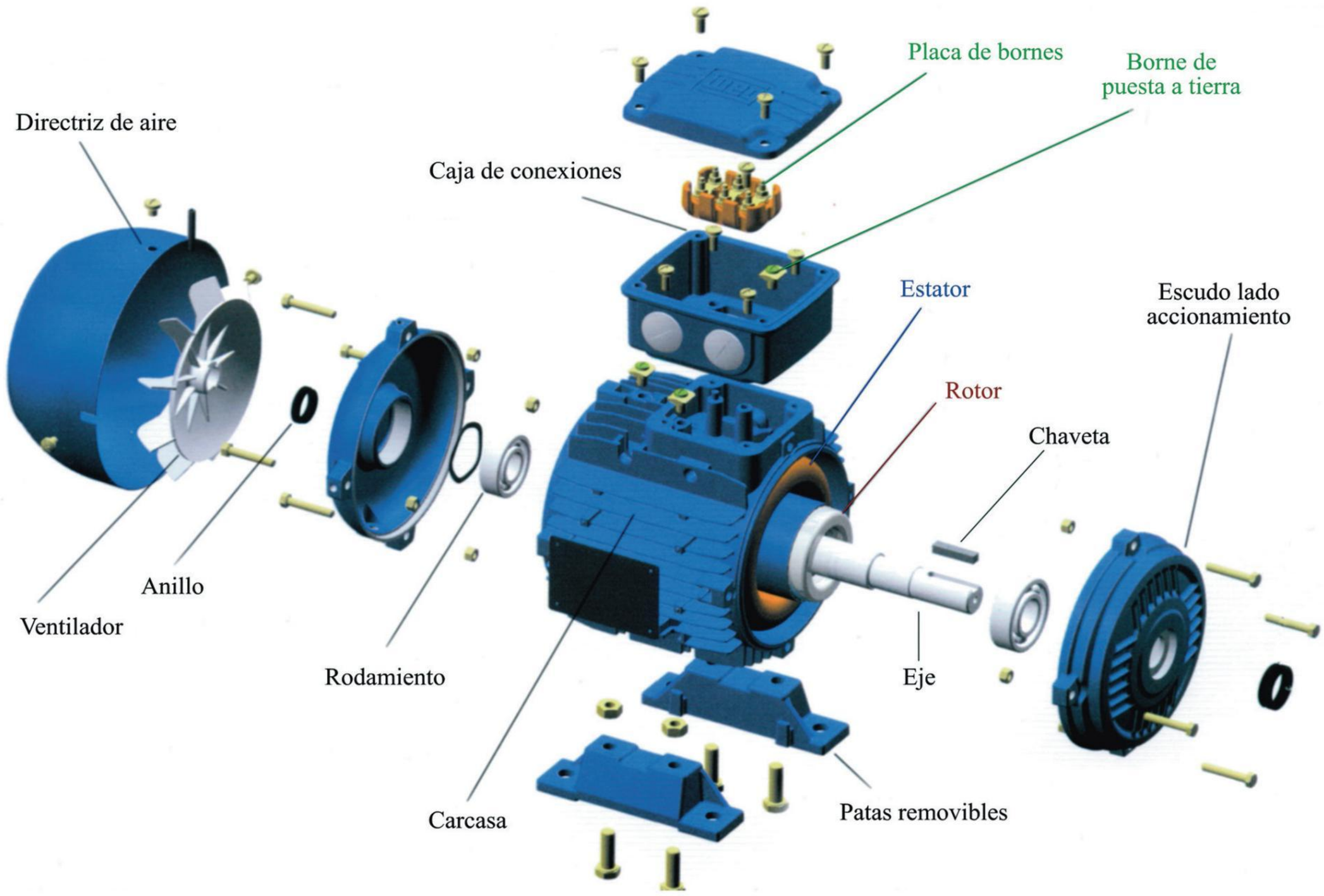


Figura 20.15. Vista de conjunto de un motor asíncrono trifásico. (Cortesía de WEG.)

© Ediciones Paraninfo

alguna en el rotor, por lo que el rotor siempre gira a una velocidad inferior a la de sincronismo (de ahí viene el nombre de asíncrono).

De esta forma, se define el deslizamiento de un motor asíncrono como la diferencia de estas velocidades expresada en tantos por ciento:

$$S = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot 100$$

S = Deslizamiento (%).

n_s = Velocidad del campo giratorio.

n = Velocidad del rotor.

Actividad resuelta 20.6

Un motor asíncrono trifásico de rotor en cortocircuito posee una velocidad síncrona de 3.000 r.p.m. ¿Cuál será el deslizamiento del rotor a plena carga si se mide con un tacómetro una velocidad de 2.850 r.p.m.?

Solución:

$$S = \frac{3.000 - 2.850}{3.000} 100 = 5\ \%$$

El deslizamiento de un motor varía con la carga mecánica que tenga que arrastrar. De esta forma tenemos que, cuando el motor trabaja en vacío, el deslizamiento es mínimo (del orden de un 0,1 %). Al arrastrar la carga nominal, el motor tiende a frenarse y el deslizamiento aumenta un poco (del orden del 4 %).

Cuando el motor pasa de funcionar en vacío a arrastrar una carga mecánica, el rotor tiende a frenarse. Esto hace que el movimiento relativo del campo magnético giratorio respecto a los conductores del rotor aumente, lo que produce un aumento de la f.e.m. y de la corriente inducida en los conductores. Dado que el par de fuerzas que se desarrolla en el rotor depende de la corriente, se produce un aumento de dicho par que tiende a equilibrar el par resistente con el motor. De aquí se entiende que según aumenta la carga en el motor, también aumente el deslizamiento, ya que de este depende el par motor del mismo.

Arranque: al conectar las bobinas del estator de un motor trifásico, permaneciendo el rotor sin movimiento, en un principio, el campo giratorio corta los conductores del rotor e induce en ellos, como si fuese un transformador, una f.e.m. elevada (de la misma frecuencia que la del estator), que, a su vez, producirá una fuerte corriente en el rotor (puede llegar a ser de cientos de amperios). Estas corrientes, al interactuar con el campo magnético, producen elevadas fuerzas mecánicas que, al actuar sobre el rotor, le proporciona un fuerte par de arranque M_a (Figura 20.17).

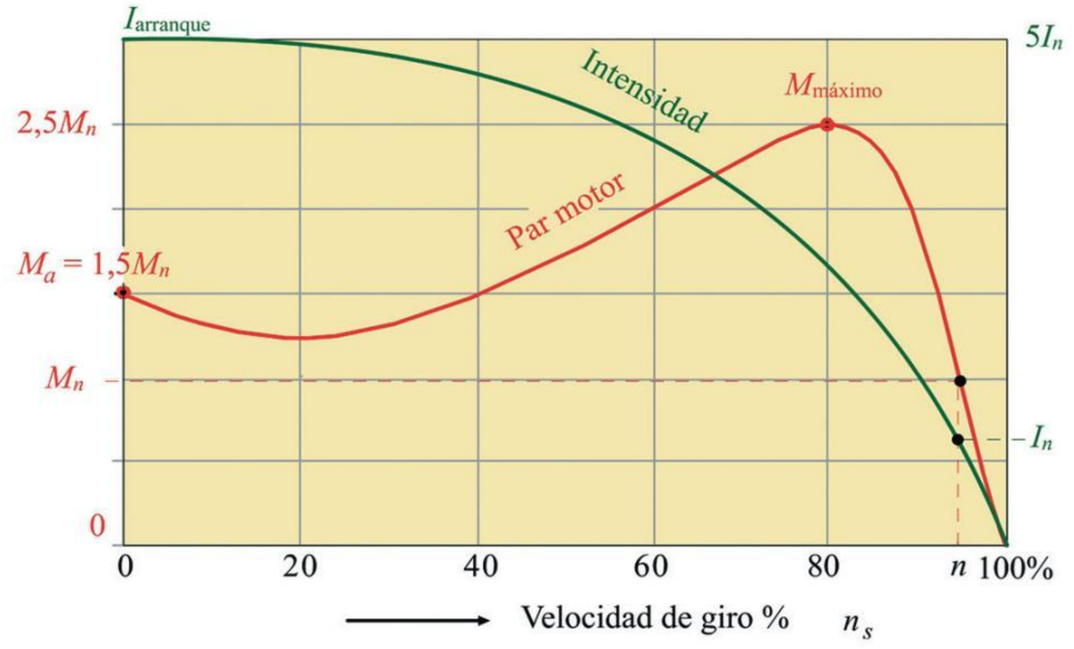


Figura 20.17. Relación entre la intensidad de línea y el par de un motor asíncrono.

Al igual que ocurría en los transformadores (el estator actúa como el primario y el rotor como el secundario), la fuerte corriente del rotor genera, a su vez, un campo magnético que intenta modificar el flujo común; como este solo depende de la tensión aplicada al estator, aparece un incremento de corriente en él que intenta compensar la fuerza magnetomotriz producida por el rotor. De esta forma, cuando aumenta la intensidad rotórica también lo hace la corriente estatórica, que corresponde a la corriente tomada de la red por el motor. En el arranque se produce, por tanto, una elevación de la corriente absorbida por el motor de la red, que, como veremos más adelante, a veces conviene suavizar. En la Figura 20.17 se observan las curvas características de un motor asíncrono, donde se puede comprobar cómo, en este ejemplo, la corriente de arranque es muy fuerte ($I_a = 5\ I_n$), al igual que el par de arranque ($M_a = 1{,}5\ M_n$).

Aceleración y carga: tan pronto como empieza a circular corriente por el rotor parado, este empieza a girar con un movimiento acelerado y en el mismo sentido que el campo giratorio, por lo que el movimiento relativo entre el campo y el rotor disminuye y con él la f.e.m. inducida y la corriente (según disminuye el deslizamiento, la frecuencia del rotor f_2 va también disminuyendo). Si el motor está en vacío, rápidamente se alcanza una velocidad muy próxima a la de sincronismo. Si se aplica una carga mecánica resistente al eje del motor, el rotor tenderá a perder velocidad hasta alcanzar un equilibrio entre el par motor creado por él y el par resistente ofrecido por la carga. En la curva característica de la Figura 20.17 se observa cómo la corriente que absorbe el motor disminuye según aumenta la velocidad de giro del motor, hasta que se alcanza la velocidad nominal n. En este punto de funcionamiento el motor desarrolla el par nominal M_n y por él fluye la corriente nominal I_n.

© Ediciones Paraninfo

Si se aplica una carga mecánica resistente que sobrepase el par máximo que puede proporcionar el motor, este tiende a pararse. Esto siempre debe evitarse, ya que al estar el rotor bloqueado, tanto las corrientes rotóricas como las estatóricas se elevan muchísimo y pueden provocar la destrucción del motor si no se desconecta este rápidamente.

Se puede decir que el motor intenta desarrollar un par motor exactamente igual al par opuesto por el resistente de la carga.

Característica mecánica del motor asíncrono trifásico

La característica del motor nos indica la relación entre el par del motor y su velocidad. El par que desarrolla un motor de inducción está íntimamente relacionado con la velocidad del rotor. Dado que su relación matemática resulta un poco complicada, por lo general, esta relación se expresa gráficamente mediante una curva característica de par-velocidad.

A modo de ejemplo, en la curva de la Figura 20.18 se ha representado la relación par (M)-velocidad (n) de un motor asíncrono trifásico con rotor en cortocircuito. En el eje de abscisas se escriben los valores relativos del par referidos al par nominal M_n y en el de coordenadas el de la velocidad relativa del rotor expresada en porcentaje (en realidad se expresa el deslizamiento). En esta representación gráfica se ha trazado la evolución del par motor, así como la evolución del par resistente al que se lo somete al motor. Este par resistente podría corresponder, por ejemplo, al transmitido por un eje al que se le ha acoplado un montacargas.

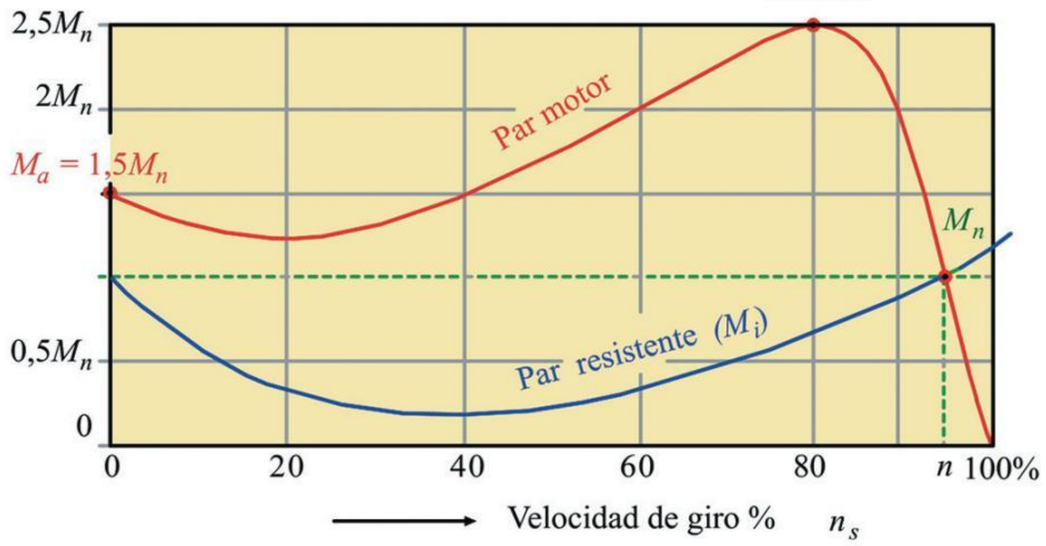


Figura 20.18. Característica mecánica de un motor asíncrono trifásico.

En la curva mostrada como ejemplo en la Figura 20.18 se puede observar que en el momento del arranque del motor ($n = 0$) se obtiene un par de arranque ($M_a = 1{,}5M_n$) que es 1,5 veces el par a plena carga.

Si hacemos que este motor arrastre una carga que origine un par resistente M_i, el motor adaptará su velocidad hasta conseguir desarrollar un par motor M_n que consiga arrastrar la carga mecánica. Esto se consigue a la velocidad n. En el caso de que aplicásemos un par resistente mayor, la velocidad disminuiría hasta que se alcanzara el equilibrio entre el par motor y el par resistente.

En el caso de que el par resistente fuese mayor que el par máximo que puede desarrollar el motor (en nuestro ejemplo: $M_{máx} = 2{,}5M_n$) el motor se pararía. En nuestro ejemplo esto ocurriría cuando la velocidad se redujese al 80 % de la velocidad de sincronismo.

Actividad resuelta 20.7

Un motor asíncrono trifásico posee las siguientes características: potencia eléctrica absorbida de la red = 8 kW; 400 V; 50 Hz; cos $\varphi = 0{,}85$; $\eta = 93$ %; pares de polos del devanado estatórico = 2; deslizamiento a plena carga = 4 %.

Calcula el par de rotación del rotor. ¿Cuál sería el par de arranque y el par máximo de este motor si su característica mecánica es la que se muestra en la Figura 20.17?

Solución:

Primero calculamos la potencia útil del motor:

$$\eta = \frac{P_u}{P} \cdot 100 \quad \Rightarrow \quad P_u = \frac{P}{100}\eta = \frac{8.000}{100} \cdot 93 = 7.440 \text{ W}$$

La velocidad síncrona del campo giratorio es:

$$n_s = \frac{60f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1.500 \text{ r.p.m.}$$

La velocidad del rotor la calculamos mediante el deslizamiento:

$$S = \frac{n_s - n}{n_s} = \cdot 100 \quad \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \quad n = n_s = \frac{S \cdot n_s}{100} = 1.500 - \frac{4 \cdot 1.500}{100} = 1.440 \text{ r.p.m.}$$

La velocidad angular del rotor es, entonces:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 1.440}{60} = 151 \text{ rad/s}$$

Ahora ya podemos calcular el par útil del motor:

$$M_n = \frac{P_u}{\omega} = \frac{7.440}{151} = 49 \text{ Nm}$$

Según la característica mecánica de este motor:

$$M_a = 1{,}5\ M_n = 1{,}5 \cdot 49 = 73{,}5 \text{ Nm}$$

$$M_a = 2{,}5\ M_n = 1{,}5 \cdot 49 = 122{,}5 \text{ Nm}$$

© Ediciones Paraninfo

Características técnicas del motor asíncrono trifásico

Una buena parte de las características de los motores eléctricos se suele expresar en la propia placa de características del motor, tal como tensiones, potencia, frecuencia, velocidad, nivel de protección, clase de aislamiento, factor de potencia, tipo de servicio, etc. Si queremos obtener otros datos, como el comportamiento en servicio a diferentes regímenes de carga, tendremos que recurrir a las características que se facilitan en las informaciones técnicas que proporcionan los propios fabricantes de los motores.

En la Tabla 20.1 se muestran, a modo de ejemplo, las características técnicas de una gama de motores asíncronos trifásicos comerciales con rotor en cortocircuito de un par de polos y 50 Hz.

Tabla 20.1. Características de una gama de motores asíncronos trifásicos comerciales

kW	r.p.m.	η	FP	I_n	$\frac{I_a}{I_n}$	$\frac{M_a}{M_n}$	$\frac{M_{máx}}{M_n}$
1,1	2.880	83,8	0,77	2,5	4,8	3,6	3,6
1,5	2.880	84,1	0,80	3,2	8,1	3,6	4,0
2,2	2.860	85,6	0,85	4,4	8,5	3,5	3,7
3	2.920	86,7	0,84	5,9	12,3	4,2	6,3
4	2.940	89,9	0,86	7,5	12,5	4,3	4,5
5,5	2.920	88,6	0,88	10,1	8,9	3,0	3,2
7,5	2.900	89,5	0,90	13,5	7,9	3	3,5
11	2.930	90,7	0,86	20,4	7,3	2,4	3,1
15	2.930	91,6	0,86	27,5	7,6	2,5	3,1
18,5	2.930	92,0	0,86	33,5	7,9	2,8	3,4

La potencia que habitualmente se indica en las características técnicas es la útil, o mecánica, que el motor puede transmitir por el eje. Para calcular la intensidad nominal habrá que tener en cuenta, entonces, el rendimiento del motor.

M_a / M_n = Indica la relación entre el par de arranque y el nominal para un arranque directo.

$M_{máx} / M_n$ = Indica la relación entre el par máximo que puede desarrollar el motor y el nominal.

I_a / I_n = Indica la relación entre la intensidad de arranque y la nominal para un arranque directo.

Actividad resuelta 20.8

Vamos a comprobar si el motor de 11 kW del catálogo comercial de la Tabla 20.1 absorbe realmente la intensidad que se indica para la potencia nominal: $P_u = 11$ kW; $\eta = 90{,}7$ %; $\cos \varphi = 0{,}86$; $U_L = 400$ V.

Solución:

La potencia que el motor absorbe de la red a plena carga es igual a:

$$P = \frac{P_u}{\eta} \cdot 100 = \frac{11.000}{90{,}7} \cdot 100 = 12.128 \text{ W}$$

$$I_n = \frac{P}{\sqrt{3}\, U_L \cos \varphi} = \frac{12.128}{\sqrt{3}\, 400 \cdot 0{,}86} \cdot 100 = 20{,}4 \text{ A}$$

Valor que coincide con la intensidad indicada en la hoja de características técnicas de la Tabla 20.1.

Actividad resuelta 20.9

Se dispone de un motor asíncrono trifásico de rotor en cortocircuito de 5,5 kW. Averigua el deslizamiento a plena carga, la intensidad en el arranque, par nominal, par de arranque y par máximo.

Solución:

Según las características indicadas en las hojas técnicas (Tabla 20.1), este motor es de un par de polos, por lo que su velocidad de sincronismo para 50 Hz será de 3.000 r.p.m. Como su velocidad nominal es de 2.920, el deslizamiento que le corresponde es:

$$S = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot 100 = \frac{3.000 - 2.920}{3.000} \cdot 100 = 2{,}67 \text{ \%}$$

Según las características técnicas, la intensidad en el arranque es 8,9 veces superior a la nominal; como la intensidad nominal a plena carga es 10,1 A, tendremos que:

$$I_a = 8{,}9\, I_n = 8{,}9 \cdot 10{,}1 = 89{,}9 \text{ A}$$

Ahora calculamos el valor del par nominal:

$$M_n = \frac{P_u}{\omega} = \frac{5.500}{305{,}8} = 18 \text{ Nm}$$

La velocidad angular del rotor la hemos calculado así:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 2.920}{60} = 305{,}8 \text{ rad/s}$$

Según las características técnicas, el par de arranque es 3 veces superior al nominal y el par máximo se alcanza al hacerse 3,2 veces mayor que el nominal:

Par de arranque: $M_a = 3\, M_n = 3 \cdot 18 = 54$ Nm

Par máximo: $M_{máx} = 3{,}2\, M_n = 3{,}2 \cdot 18 = 57{,}6$ Nm

© Ediciones Paraninfo

Actividad propuesta 20.1

Del motor de 15 kW de la Tabla 20.1 se desea averiguar: a) número de polos del bobinado del estator, b) deslizamiento a plena carga, c) corriente de arranque, d) par nominal y par de arranque, e) característica de la batería de condensadores conectada en triángulo para mejorar el factor de potencia del motor hasta 0,95.

La solución a esta Actividad propuesta la puedes encontrar dentro del MATERIAL WEB elaborado para este texto.

Conexión de los devanados del motor trifásico

El devanado trifásico del estator de un motor asíncrono se puede conectar en estrella o en triángulo, dependiendo de la tensión de la red y la que se indique en la placa de características del motor. De esta forma tenemos que los motores trifásicos pueden funcionar a dos tensiones.

Así, por ejemplo, un motor cuya placa de características registre las tensiones 400/230 V, nos indica que se puede conectar en estrella a la tensión mayor (400 V, ya que en cada devanado del motor aparecerá $U_f = 400/\sqrt{3} = 230$ V) y en triángulo a la menor (230 V). De tal forma que cada bobina siempre queda sometida a la tensión menor (Figura 20.19).

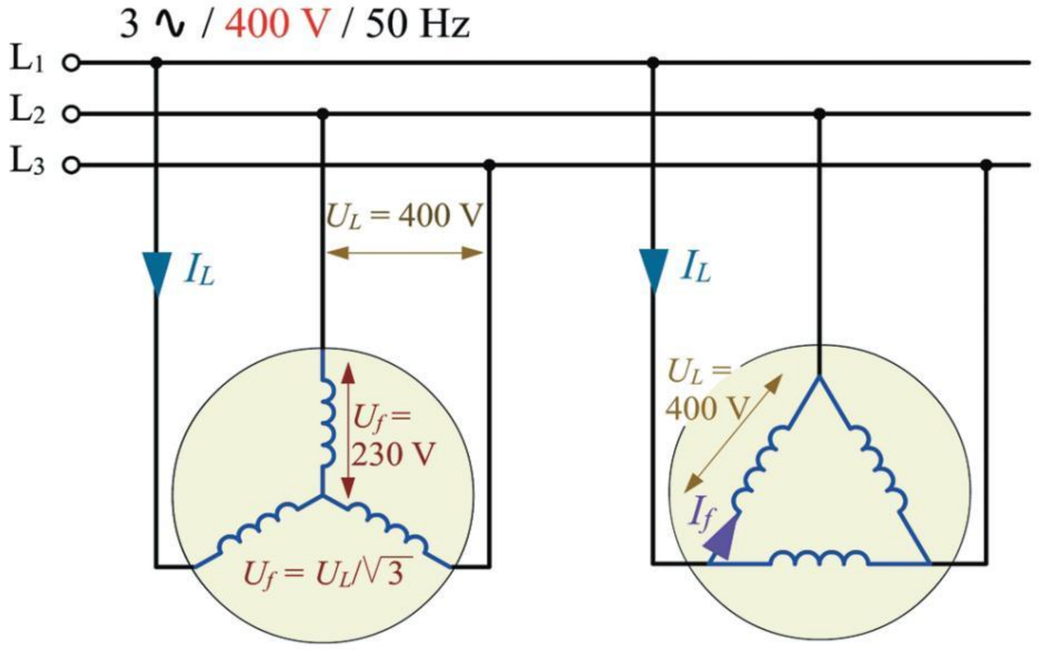


Figura 20.19. Conexiones de los devanados de un motor asíncrono trifásico.

En la caja de bornes de los motores aparecen los seis terminales correspondientes a los tres devanados del motor más el terminal de conexión a tierra. La disposición de los terminales siempre se hace de la misma forma, siguiendo las normas internacionales. Para conseguir la conexión en estrella, basta con unir con unos puentes los finales Z-X-Y. La conexión en triángulo se consigue realizar con facilidad al unir con unos puentes los terminales (U-Z), (V-X), (W-Y) (Figura 20.20).

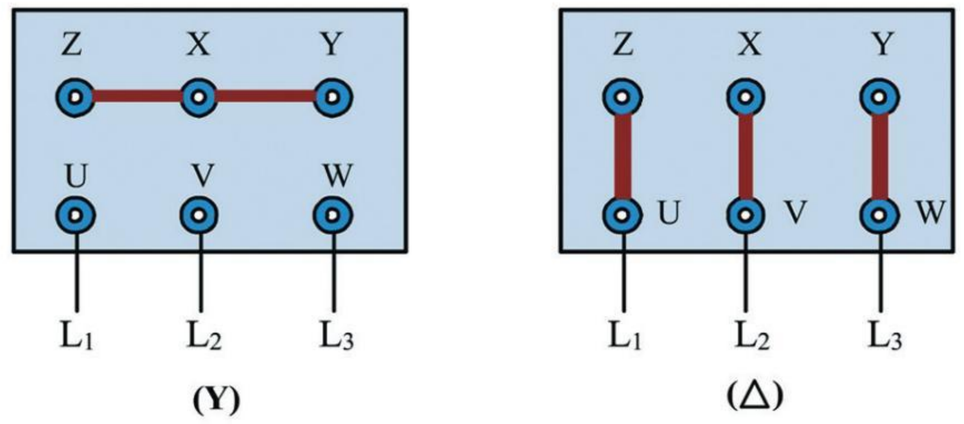


Figura 20.20. Conexiones en la placa de bornas de un motor asíncrono trifásico.

20.2.3. Sistemas de arranque de los motores asíncronos trifásicos de rotor en cortocircuito

Cuando se conecta el motor directamente a la red, este absorbe una intensidad muy fuerte de la línea en el momento del arranque, lo que puede afectar no solo a la duración de los aparatos de conexión, sino a la línea que suministra energía eléctrica. Estas fuertes corrientes sobrecargan las líneas de distribución, por lo que pueden producir caídas de tensión y calentamiento en los conductores de tales líneas. Por esta razón, al igual que se hacía para los motores de C.C., el REBT establece normas para reducir dichas corrientes de arranque a valores que sean aceptables. En la instrucción técnica **ITC-BT 47** se establece la relación máxima entre la corriente de arranque y la de plena carga para motores de C.A. (Tabla 20.2).

Tabla 20.2. Relación máxima entre la corriente de arranque y la de plena carga en función de la potencia nominal para motores de C.A.

Potencia nominal del motor	Relación máxima entre la corriente de arranque y la de plena carga
De 0,75 kW a 1,5 kW	4,5
De 1,5 kW a 5,0 kW	3,0
De 5,0 kW a 15,0 kW	2,5
De más de 15,0 kW	1,5

Consulta en el REBT la Instrucción Técnica ITC-BT 47 relativa a instalación de motores.

Una forma de reducir la corriente de arranque es reducir la tensión aplicada al motor. Con ello también se disminuye el par efectivo de arranque, ya que al disminuir la tensión, el flujo del estator también disminuye y con él la f. e. m. inducida en el rotor y la intensidad rotórica. En conclusión, el par de arranque disminuye con el cuadrado de la tensión.

© Ediciones Paraninfo

En la Figura 20.21 se muestra el efecto que produce una reducción de la tensión aplicada al devanado del estator en el par motor. Así, por ejemplo, cuando reducimos la tensión en un 50 % (1/2), el par se reducirá en $(1/2)^2 = 1/4$. En el ejemplo de la Figura 20.21 cuando se reduce la tensión un 50 % el par de arranque pasa de ser del 200 % del nominal a ser del 50 %.

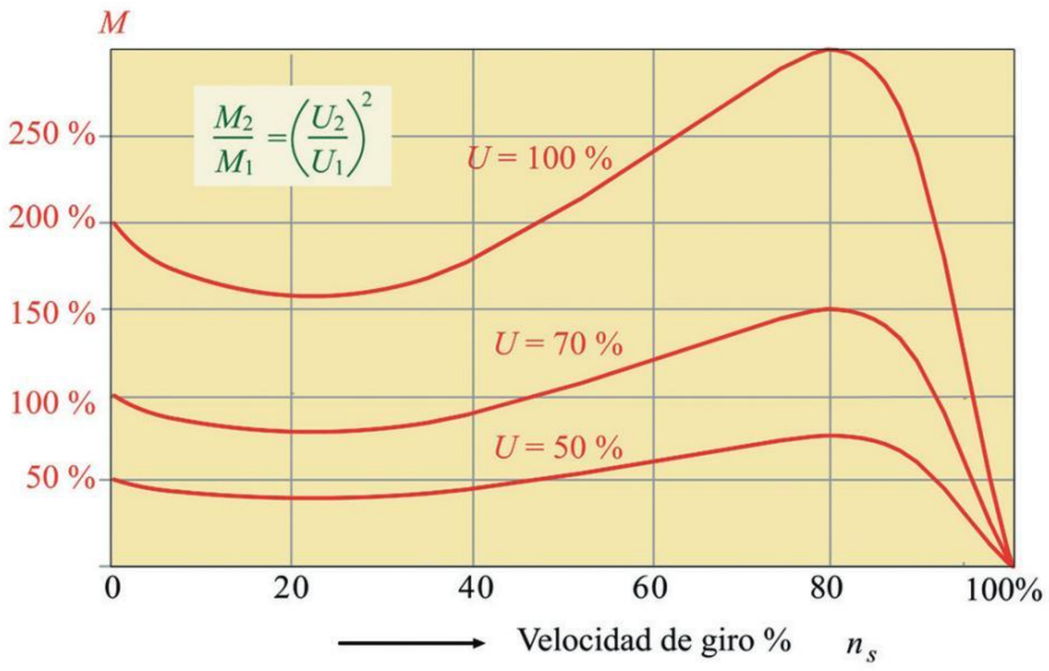


Figura 20.21. Relación entre el par del motor y la tensión aplicada.

Actividad propuesta 20.2

Calcula el par de arranque que tendrá el motor trifásico de 4 kW de la Tabla 20.1 si le aplican al bobinado del estator las siguientes tensiones: **a)** 400 V; **b)** 300 V; **c)** 200 V; **d)** 100 V; **e)** 50 V.

La solución a esta Actividad propuesta la puedes encontrar dentro del MATERIAL WEB elaborado para este texto.

Existen diferentes métodos para reducir la corriente de arranque disminuyendo la tensión: arranque estrella-triángulo, arranque con resistencias estatóricas, arranque por autotransformador y arrancadores estáticos.

Arranque directo

El arranque directo está permitido para motores de pequeña potencia cuya relación I_a / I_n sea igual o inferior a 4,5. En la Figura 20.22(a) se muestra el esquema de fuerza para el arranque directo de un motor asíncrono trifásico de rotor en cortocircuito, y en la Figura 20.22(b) el esquema de mando correspondiente.

F1F = Fusibles de protección del circuito de fuerza del motor.

K1M = Contactor.

S1A = Pulsador de marcha del motor.

S0A = Pulsador de paro del motor.

F2F = Relé térmico trifásico. Protege al motor de las sobrecargas que pudiera sufrir. Cuando aparece una sobrecarga, el conmutador asociado a este dispositivo cambia de posición y desconecta el contactor K1M y el motor.

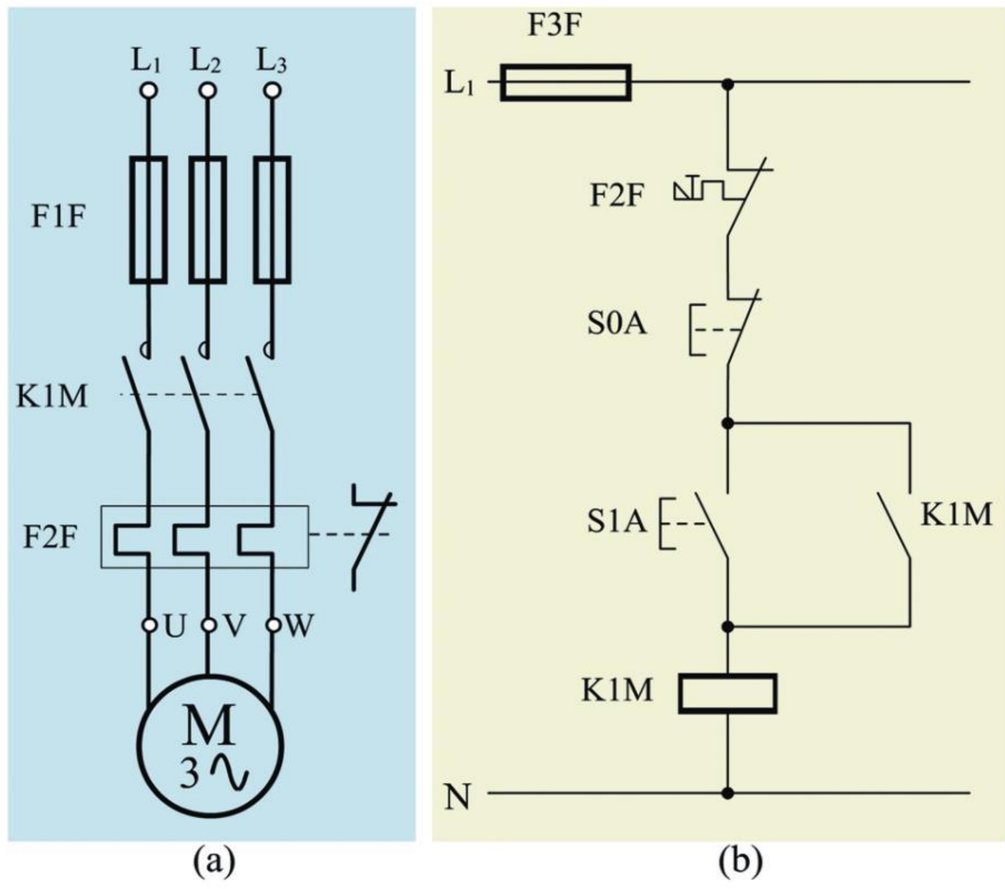


Figura 20.22. Esquema de fuerza y mando para el arranque directo de un motor asíncrono trifásico de rotor en cortocircuito.

Su funcionamiento es como sigue. Al apretar el pulsador S1A se cierra el circuito de la bobina del contactor, lo que provoca que tanto los contactos principales como los auxiliares cambien de posición y el motor se ponga en marcha. En ese mismo instante el contacto auxiliar K1M, normalmente abierto y que está en derivación con el pulsador, se cierra. Al dejar de pulsar S1A, este se abre, pero la bobina sigue siendo atravesada por una corriente, que ahora circula por el propio contacto auxiliar K1M del contactor.

El pulsador de paro S10 tiene su contacto normalmente cerrado. Al apretar el botón de dicho pulsador, se abre su contacto y corta la corriente de la bobina, con lo cual el contactor abre sus contactos principales y el auxiliar K1M, y el motor se para.

Arranque estrella-triángulo

Es uno de los métodos más conocidos con el que se pueden arrancar motores de hasta 11 kW de potencia. Consiste en conectar el motor primero en estrella para, una vez arrancado, conmutar a la conexión en triángulo. Para que esto se pueda llevar a cabo se debe utilizar un motor que esté preparado para funcionar a la tensión inferior conectado en triángulo. Así, por ejemplo, un motor de 230/400 V podrá ser arrancado con este sistema en una red de 230 V y uno de 400/700 V en una red de 400 V.

© Ediciones Paraninfo

Si a un motor de las características indicadas se lo conecta primero en estrella, cada una de las bobinas del motor quedará sometida a una tensión $\sqrt{3}$ veces inferior que si hubiese sido conectado en triángulo. Con ello se consigue que la intensidad en el arranque quede disminuida a la tercera parte respecto al arranque directo en conexión en triángulo. El par también queda reducido a la tercera parte, lo que conviene tener en cuenta si el motor arranca con toda la carga. Por esta razón, conviene que el motor arranque en vacío o con poca carga.

En la Figura 20.23 se muestran las curvas de intensidad y de par en relación con la velocidad de un motor en la conexión en estrella y su conmutación a triángulo. Obsérvese cómo en este ejemplo la intensidad de corriente en el arranque pasa de 6 veces la nominal para la conexión en triángulo a 2 veces cuando se arranca el motor en estrella (3 veces inferior). A su vez, el par de arranque también queda reducido de 2 veces el valor nominal de par de arranque en triángulo a 2/3 cuando lo hace en estrella. Cuando se produce la conmutación de estrella a triángulo aparece una pequeña punta de corriente que rápidamente es suavizada al encontrarse el motor cercano a su velocidad nominal. Obsérvese también cómo en este caso el motor puede arrancar porque el par resistente a mover es ligeramente inferior al par de arranque del motor en estrella; en el caso de que este par resistente fuese algo más fuerte el motor no tendría fuerza suficiente para comenzar a girar y habría que recurrir a otros sistemas de arranque para el motor.

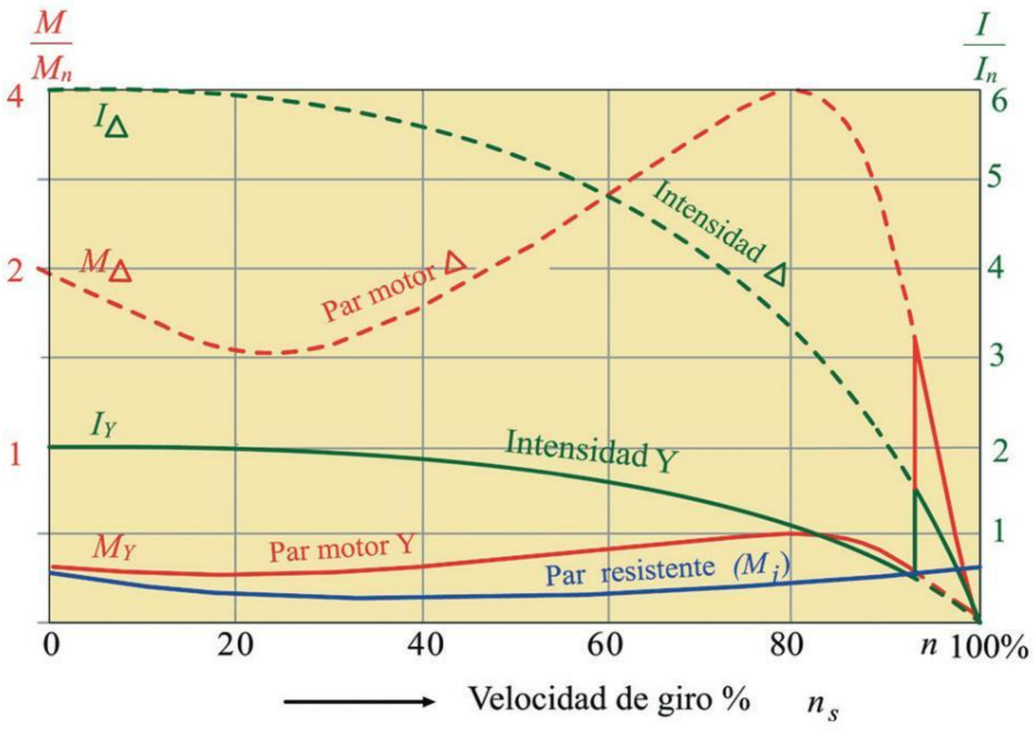


Figura 20.23. Curva mecánica y de corriente del arranque de un motor de inducción en conexión estrella-triángulo.

En un arrancador estrella-triángulo automatizado, el proceso de conmutación se realiza mediante contactores y un relé temporizado. En la Figura 20.24 se muestra el esquema de fuerza y de mando de un arrancador estrella-triángulo mediante contactores.

K1M = Contactor de línea.

K2M = Contactor de conmutación a estrella.

K3M = Contactor de conmutación a triángulo.

K4A = Relé de tiempo.

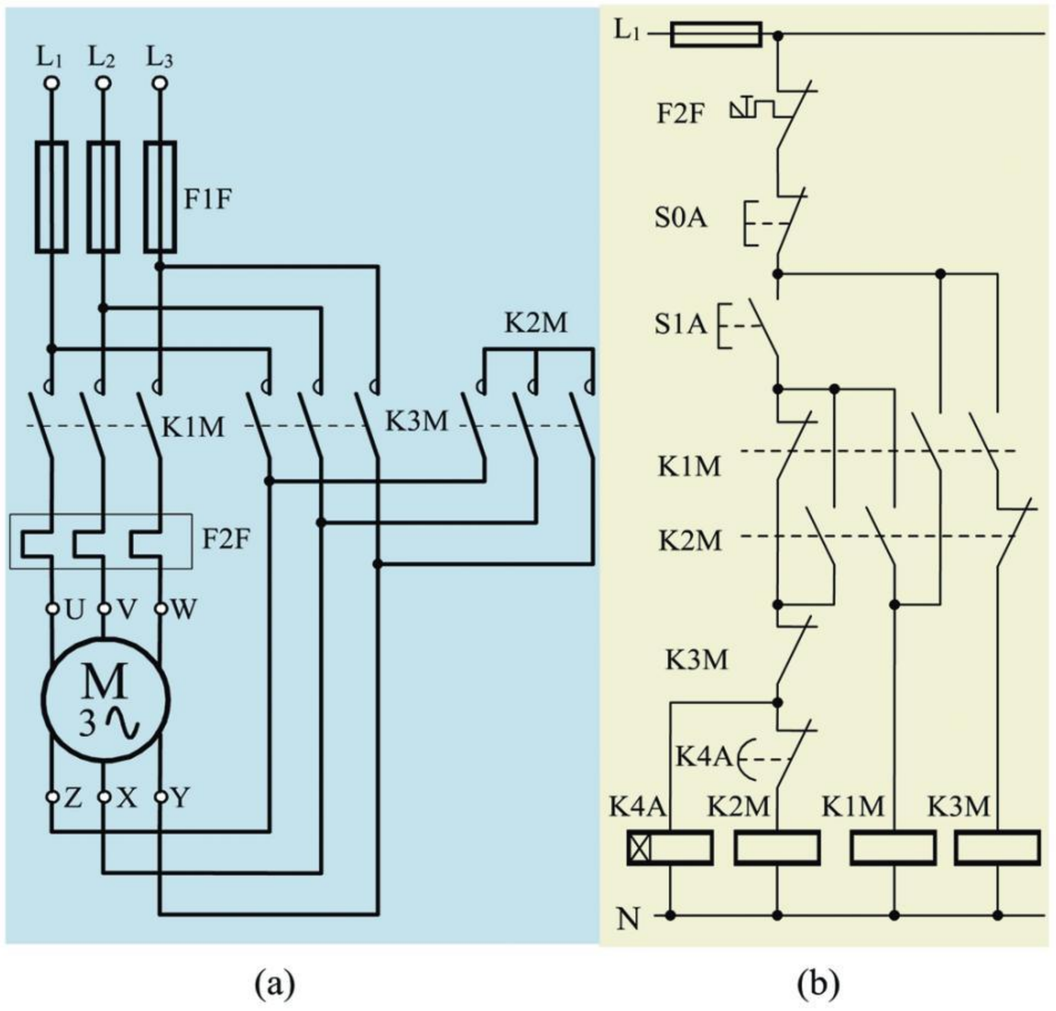


Figura 20.24. Esquema de fuerza (a) y de mando (b) para el arranque en estrella-triángulo de un motor asíncrono trifásico de rotor en cortocircuito.

Su funcionamiento es como sigue. Al accionar el pulsador de marcha S1A, se pone en funcionamiento el contactor de estrella K2M y el relé temporizado (comienza a contar tiempo desde ese momento). El contacto (NA) de K2M hace que también se ponga en marcha el contactor de línea K1M, por lo que el motor queda alimentado y arranca en estrella. Un contacto de realimentación (NA) de K1M hace posible el funcionamiento aunque se deje de pulsar S11A. El relé de tiempo ha sido regulado a un tiempo determinado, transcurrido el cual, el contacto del mismo K4A (NC) se abre y hace que se desconecte el contactor de estrella K2M. El contacto (NC) del K2M vuelve a su posición de reposo, conectando el contactor de triángulo K3M. El motor ha quedado ahora conectado en triángulo.

Para parar el motor se acciona el pulsador de paro S0A. Con él se desconecta el contactor de línea K1M y, con este, el contactor K3M. En caso de sobrecarga, el contacto F2F del relé térmico desconecta igualmente la instalación.

Arranque por resistencias estatóricas

Consiste en reducir la tensión que producen las resistencias conectadas en serie con el estator. Este sistema tiene el inconveniente de que se consigue disminuir la corriente en función lineal de la caída de tensión producida. Sin embar-

© Ediciones Paraninfo

go, el par queda disminuido con el cuadrado de la caída de tensión, por lo que su aplicación se ve limitada a motores en los que el momento de arranque resistente sea bajo.

En el esquema de la Figura 20.25 se muestra el circuito de fuerza de este arranque.

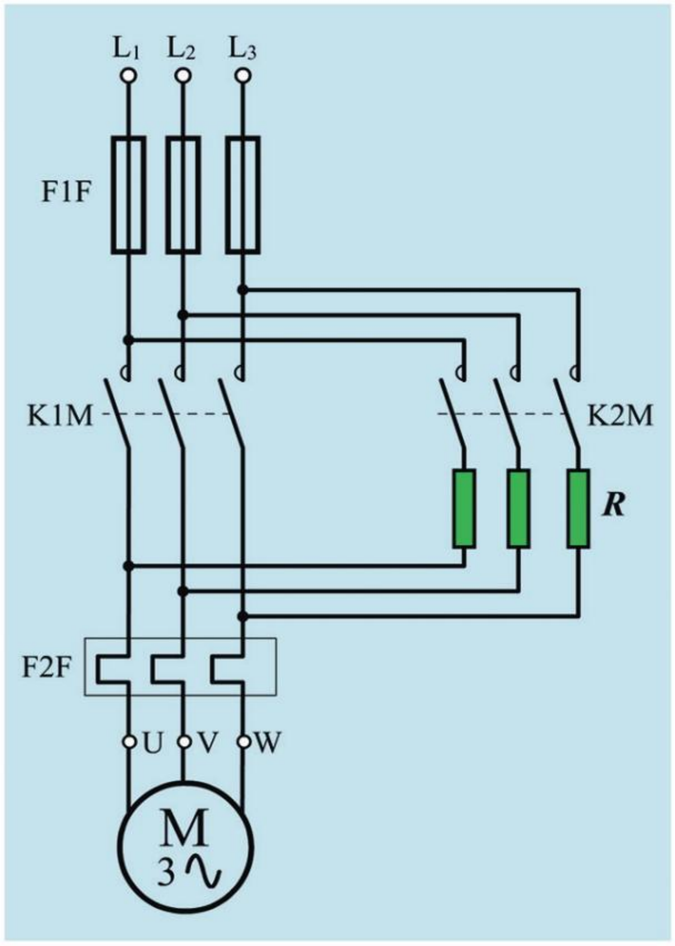


Figura 20.25. Esquema de fuerza para el arranque de un motor asíncrono trifásico mediante resistencias estatóricas.

Primeramente se conecta el motor a través del contactor K2M y a través de las resistencias conectadas en serie con el estator. Una vez alcanzada cierta velocidad se procede a conectar K1M y a desconectar el K2M.

Arranque por autotransformador

Consiste en conectar un autotransformador trifásico en la alimentación del motor. De esta forma se consigue reducir la tensión y con ella la corriente de arranque.

El par de arranque queda reducido en este caso en la misma proporción que la corriente, es decir, al cuadrado de la tensión reducida.

Este sistema proporciona una buena característica de arranque, aunque posee el inconveniente de su alto precio.

En la Figura 20.26 se muestra el circuito de fuerza de este sistema de arranque.

Primero se conectan los contactores K1A y K3A que alimentan al motor con una tensión reducida a través del autotransformador. Una vez alcanzada una cierta velocidad se conecta el contactor K2M y se desconectan K1A y K3A.

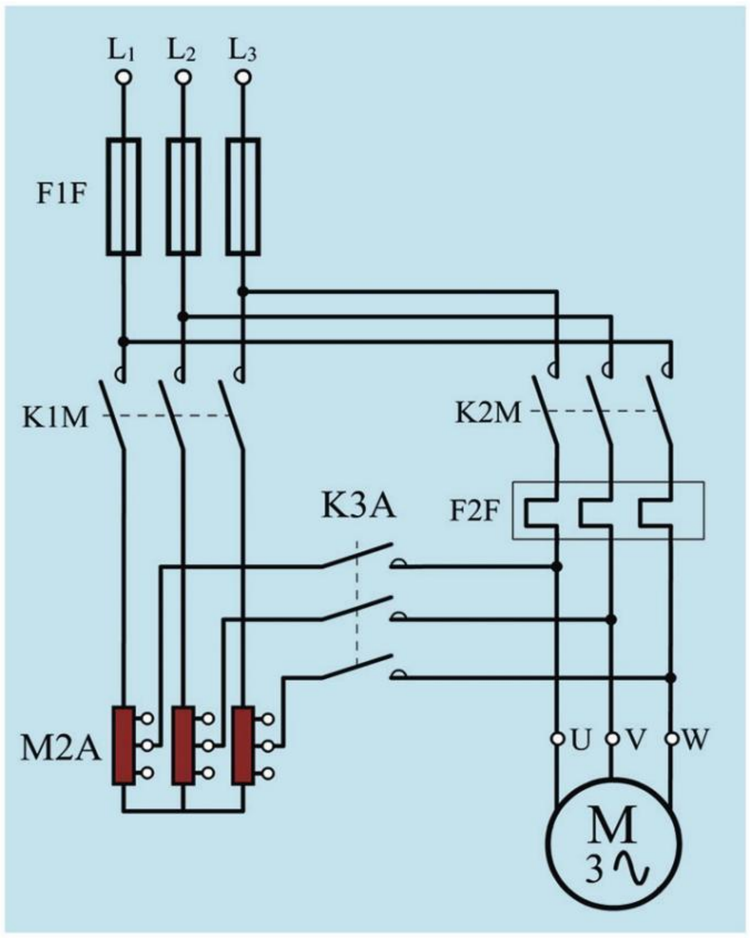


Figura 20.26. Esquema de fuerza para el arranque de un motor asíncrono mediante autotransformador.

20.3. Motor asíncrono de rotor bobinado o de anillos rozantes

En estos motores el estator posee las mismas características que el rotor en cortocircuito, pero el rotor se construye insertando un devanado trifásico en las ranuras de un núcleo cilíndrico de chapas magnéticas (Figura 20.27). Este devanado se conecta normalmente en estrella y los tres terminales restantes se conectan a tres anillos colectores. Unas escobillas frotan estos anillos y permiten conectar unas resistencias externas en serie con el fin de poder limitar la corriente rotórica.

En la placa de características de estos motores aparecen tres nuevos terminales correspondientes al bobinado del rotor, que para no confundirlos con los del estator se indican con las letras minúsculas u, v, w.

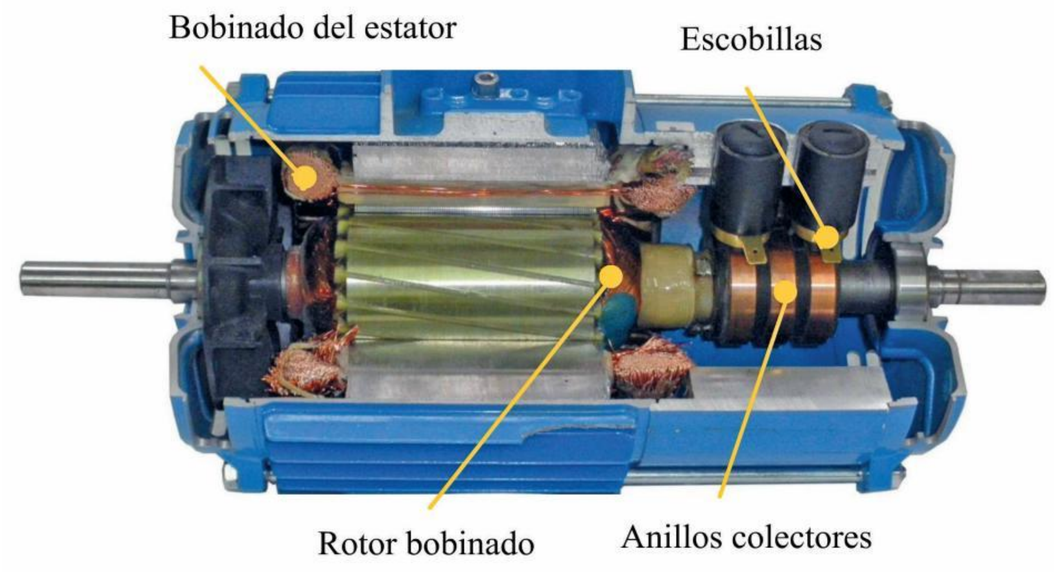


Figura 20.27. Rotor bobinado de un motor asíncrono.

© Ediciones Paraninfo

El principio de funcionamiento es exactamente igual que el del rotor en cortocircuito, pero ahora es posible la regulación directa de la corriente rotórica y, con ella, la propia corriente del estator. Este sistema tiene la ventaja de que no es necesario disminuir la tensión en el estator para disminuir el flujo y, con él, la corriente rotórica, que siempre trae consigo una reducción del par motor.

En la Figura 20.28 se puede apreciar el circuito de fuerza del arranque de un motor asíncrono trifásico de rotor bobinado mediante resistencias rotóricas.

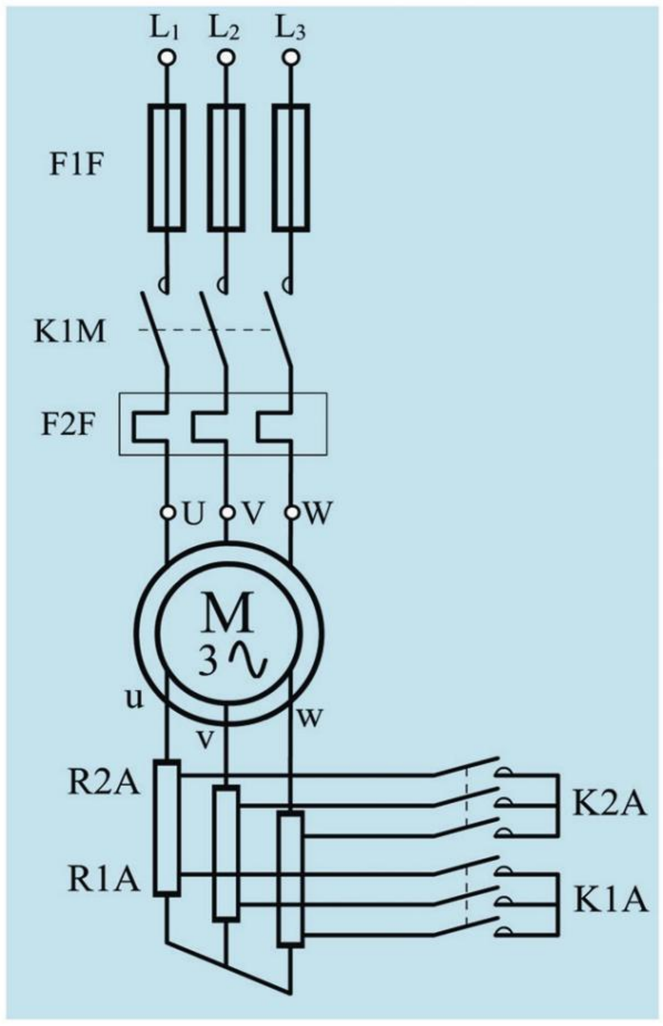


Figura 20.28. Esquema para el arranque de un motor asíncrono de rotor bobinado mediante resistencias rotóricas.

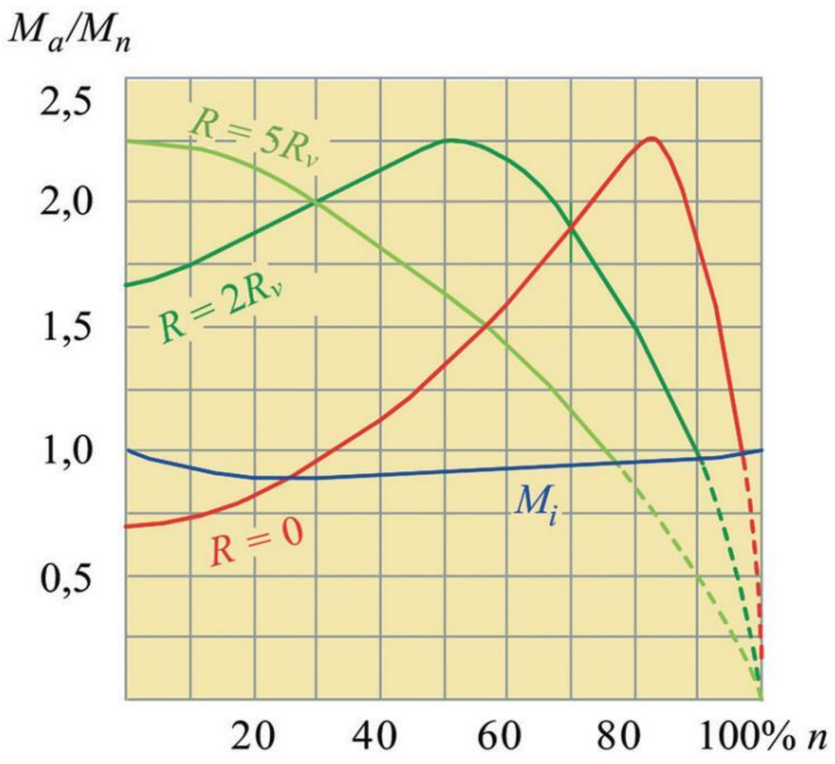


Figura 20.29. Característica mecánica correspondiente al proceso de arranque de un motor de asíncrono trifásico mediante resistencias rotóricas.

El arranque se hace en sucesivos escalones, y se obtiene un arranque con corriente suave en el estator con un par de arranque excelente. Calculando adecuadamente el valor de las resistencias rotóricas, incluso se puede llegar a obtener un arranque con el par máximo.

Al modificar la resistencia del rotor, el deslizamiento se hace mayor y la curva característica par-velocidad se desplaza, tal como se muestra en la Figura 20.29.

El gran inconveniente que presentan estos motores frente a los de jaula de rotor en cortocircuito es que resultan bastante más caros y necesitan de un mayor mantenimiento. En la actualidad el control electrónico de los motores asíncronos de rotor en cortocircuito ha desplazado en casi todas las aplicaciones al motor de rotor bobinado; este último queda para casos especiales donde se requiera un par de arranque muy elevado (grúas, instalaciones de media tensión, etc.).

20.4. Arrancadores estáticos (electrónicos)

Hoy en día, gracias a las nuevas tecnologías, se han desarrollado equipos a base de semiconductores de potencia (tiristores) que son capaces de limitar y controlar en todo momento la intensidad de corriente y el par en el periodo de arranque. Con estos equipos, además de limitar la corriente de arranque según nuestras necesidades, se evitan los esfuerzos bruscos a los que se somete a los componentes mecánicos del motor, tales como correas, engranajes, acoplamientos mecánicos (Figura 20.30).

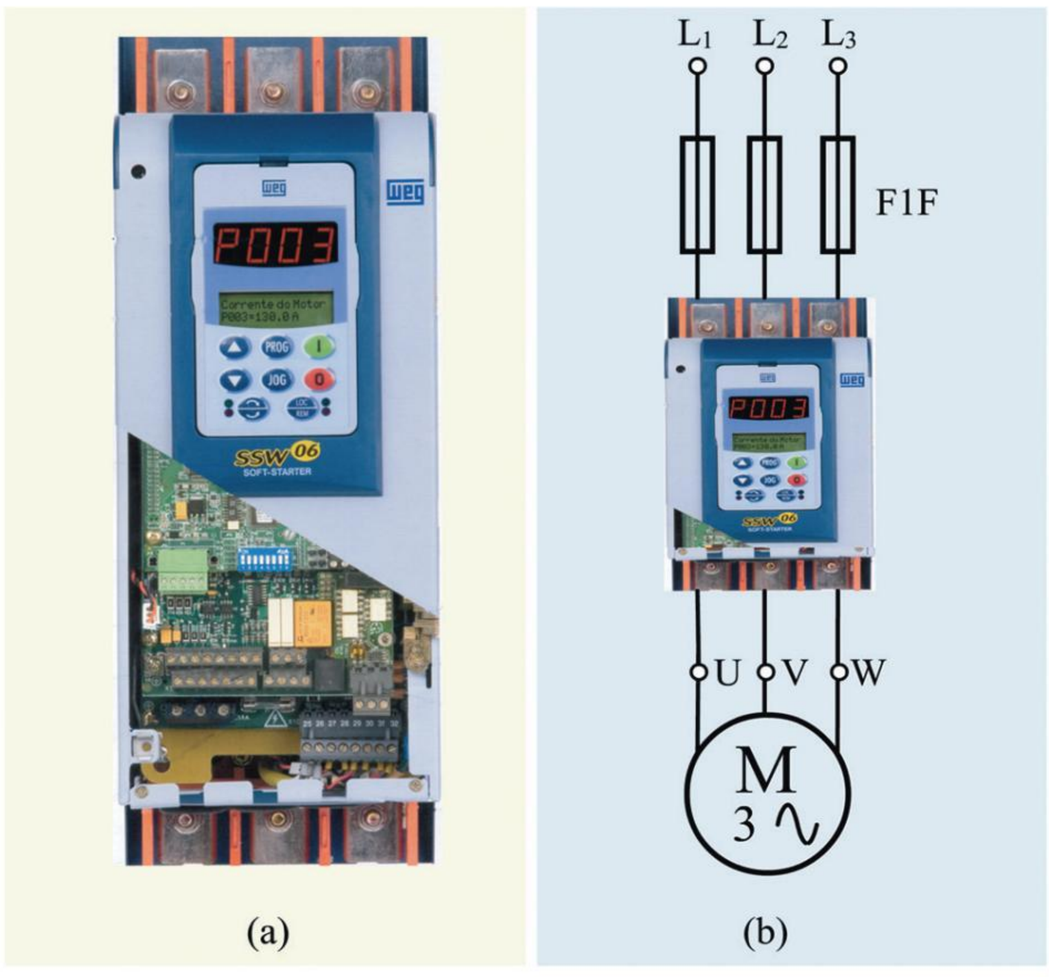


Figura 20.30. Arrancador estático. (a) Arrancador suave marca WEG. (b) Esquema de fuerza.

© Ediciones Paraninfo

Estos arrancadores consiguen limitar la intensidad de corriente y hacer que el motor desarrolle el par motor adecuado a la carga mecánica a cualquier velocidad gracias a un convertidor de frecuencia que aplica al motor una tensión y frecuencia variables. De tal forma que, si lo que se desea es mantener el par constante, se le aplica al motor una relación constante de tensión/frecuencia. El arranque se realiza aplicando una tensión y frecuencia que aumenta progresivamente desde cero hasta sus valores nominales.

A este tipo de dispositivos se lo conoce por el nombre de arrancadores suaves. Con ellos es posible programar diferentes curvas de arranque y así poder atender a cargas de tipo variable.

Además, se añade la posibilidad de frenar el motor de forma programada y una suave desaceleración. Para conseguirlo, el variador de frecuencia reduce progresivamente la frecuencia aplicada al motor, de tal forma que esta se encuentre siempre por debajo de la que le corresponde al giro del motor. Al girar el rotor por encima de la velocidad de sincronismo aplicada al estator, el motor se convierte en generador asíncrono, que, tal como estudiaremos más adelante, genera un par resistente que devuelve la energía hacia la red que hace que el motor se frene.

Por último, hay que indicar que los arrancadores suaves incorporan múltiples protecciones en el mismo equipo, como, por ejemplo, protección contra sobrecargas de corrientes, sobretensiones y bajas tensiones, detección de pérdida de fase y detección de fuga de corriente a tierra.

En la Tabla 20.3 se exponen, a modo de resumen, las principales características de los diferentes sistemas de arranque estudiados en esta Unidad.

Tabla 20.3. Resumen de las características de los diferentes sistemas de arranque para motores asíncronos trifásicos

	Directo	Estrella/ triángulo	Resistencias estatóricas	Autotransformador	Resistencias/ Rotor bobinado	Estático electrónico
$\%I_a$	100 %	33 %	70 %	40/65/80 %	70 %	Regulable
I_a/I_b	4 a 8 I_n	1,3 a 2,6 I_n	4,5 I_n	1,7 a 4 I_n	<2,5 I_n	Regulable
$\%M_a$	100 %	33 %	50 %	40/65/80 %	100 %	Regulable
M_a/M_n	0,6 a 1,5 M_n	0,2 a 0,5 M_n	0,6 a 8,5 M_n	0,4 a 0,85 M_n	<2,5 M_n	Regulable
Ventajas	• Simple y económico • Par de arranque elevado	• Económico • Buena relación par/corriente	• Posibilidad de ajustar valores en el arranque • Arranque progresivo sin cortes de corriente	• Buena relación par/corriente • Posibilidad de ajustar valores en el arranque • Arranque progresivo sin cortes de corriente	• Excelente relación par/corriente • Posibilidad de ajustar valores en el arranque • Arranque progresivo sin cortes de corriente	• Programable para cualquier ciclo de arranque
Inconvenientes	• Punta de corriente excesiva • Arranque brusco	• Par de arranque débil • Corte de corriente en el cambio Y/Δ que produce transitorios	• No se reduce suficientemente la punta de corriente • Resistencias muy voluminosas	• Coste elevado del autotransformador	• Motor de rotor bobinado más caro • Necesita resistencias	• Gran generación de perturbaciones y armónicos
Aplicaciones	• Máquinas de poca potencia	• Máquinas que arrancan en vacío o con poca carga • Compresores, ventiladores, bombas, etc.	• Máquinas de elevada inercia, sin problemas especiales de par ni de corriente de arranque	• Máquinas de elevada potencia o inercia y en los casos en los que la reducción de la punta de corriente sea un factor importante	• Máquinas de arranque en carga y que precisen de un arranque progresivo	• Máquinas de arranque en carga y que precisen de un arranque progresivo

© Ediciones Paraninfo

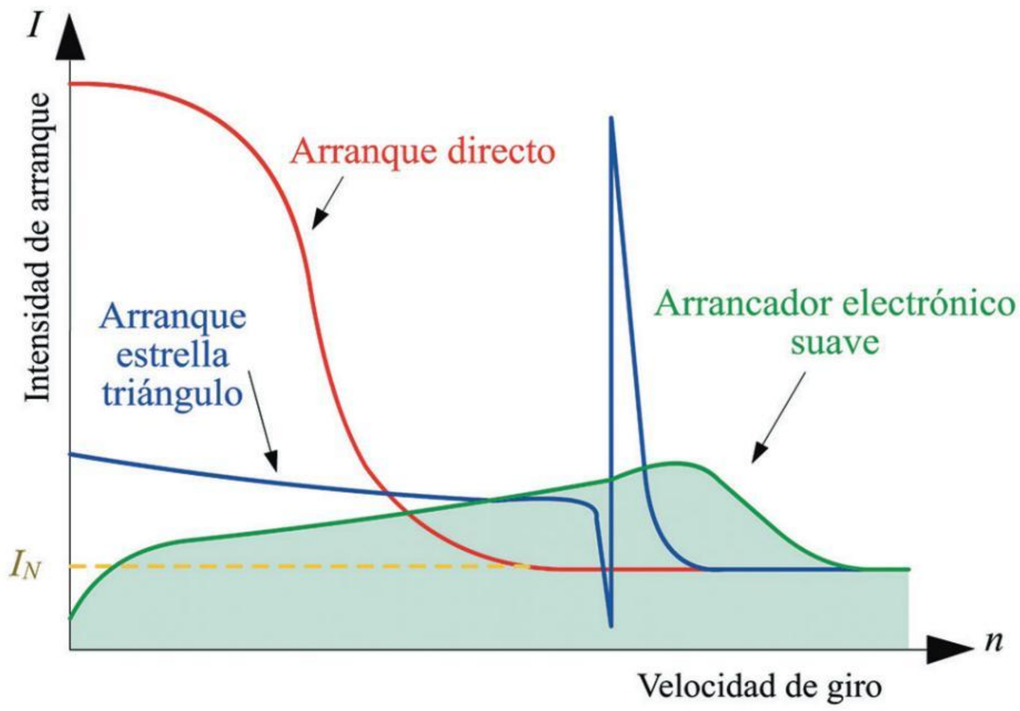


Figura 20.31. Comparativa de las curvas de corriente para diferentes sistemas de arranque.

20.5. Inversión de giro de un motor asíncrono trifásico

Para conseguir invertir el sentido de giro del motor es necesario invertir también el sentido del campo giratorio. Esto se consigue invirtiendo la conexión de dos de las fases del motor. Esta maniobra se realiza normalmente utilizando automatismos a base de contactores.

Los esquemas de fuerza y de mando del circuito de inversión de giro podrían quedar tal como se exponen en la Figura 20.32.

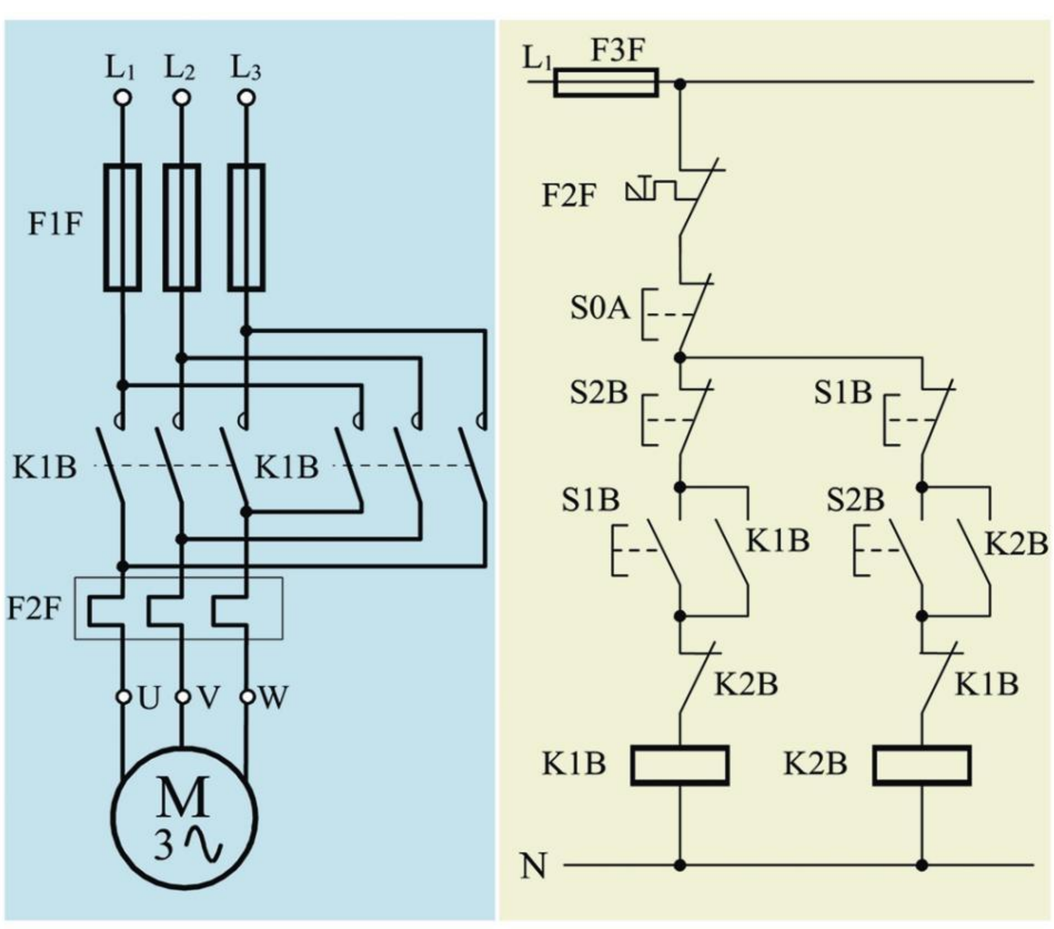


Figura 20.32. Esquema de fuerza y mando para la inversión de giro de un motor asíncrono trifásico.

Cuando se acciona el contactor K1B, el motor gira hacia la izquierda. Al accionar el K2B, se invierten dos fases del motor y este invierte, a su vez, su sentido de giro. Por supuesto, nunca podrán permanecer conectados los contactores a la vez, ya que esto produciría un cortocircuito.

Al accionar el pulsador doble de marcha izquierda (S1B), se alimenta a la bobina del contactor K1B, todos sus contactos cambian de posición y el motor arranca hacia la izquierda. El contacto abierto K1B se cierra (esto se hace para que la bobina quede alimentada aunque dejemos de pulsar S1B). El contacto K1B cerrado se abre e impide la puesta en marcha del contactor K2B (esto se hace para evitar el cortocircuito por una posible conexión de ambos contactores).

Si ahora accionamos el pulsador doble de marcha derecha (S2B), el contactor K1B se desconecta a través del contacto normalmente cerrado de dicho pulsador y el K2B se conecta a través del contacto normalmente abierto del mismo, siempre y cuando el K1B esté totalmente desconectado. El motor se frenará y girará hacia la derecha.

Para efectuar la parada del motor basta con accionar el pulsador de paro S0A. En caso de sobrecarga, el contacto del relé térmico F2F desconecta igualmente a los contactores.

20.6. Regulación de velocidad de los motores asíncronos trifásicos

La velocidad de un motor asíncrono depende fundamentalmente del número de polos con que está construido y de la frecuencia, por lo que si conseguimos modificar una de estas dos variables habremos conseguido controlar la velocidad.

Al igual que se hacía con los arrancadores estáticos, mediante un equipo electrónico especial, a base de tiristores, se puede regular la frecuencia de alimentación del motor. Con ello se consigue modificar entre amplios límites la velocidad del motor.

20.6.1. Motores de dos velocidades en conexión Dahlander

Estos motores se construyen con un devanado con varias posibles conexiones. Dependiendo de cómo se conecten exteriormente estos bobinados, se consigue variar el número de polos y, por tanto, la velocidad. La conexión más empleada es la Dahlander.

En el esquema de la Figura 20.33 se ha representado el circuito de fuerza de un motor trifásico de polos conmutables para dos velocidades en conexión Dahlander.

La velocidad inferior se obtiene cuando el contactor K1M está únicamente accionado. La velocidad superior se

© Ediciones Paraninfo

consigue desconectando K1M y accionando en conjunto los contactores K2M y K3M.

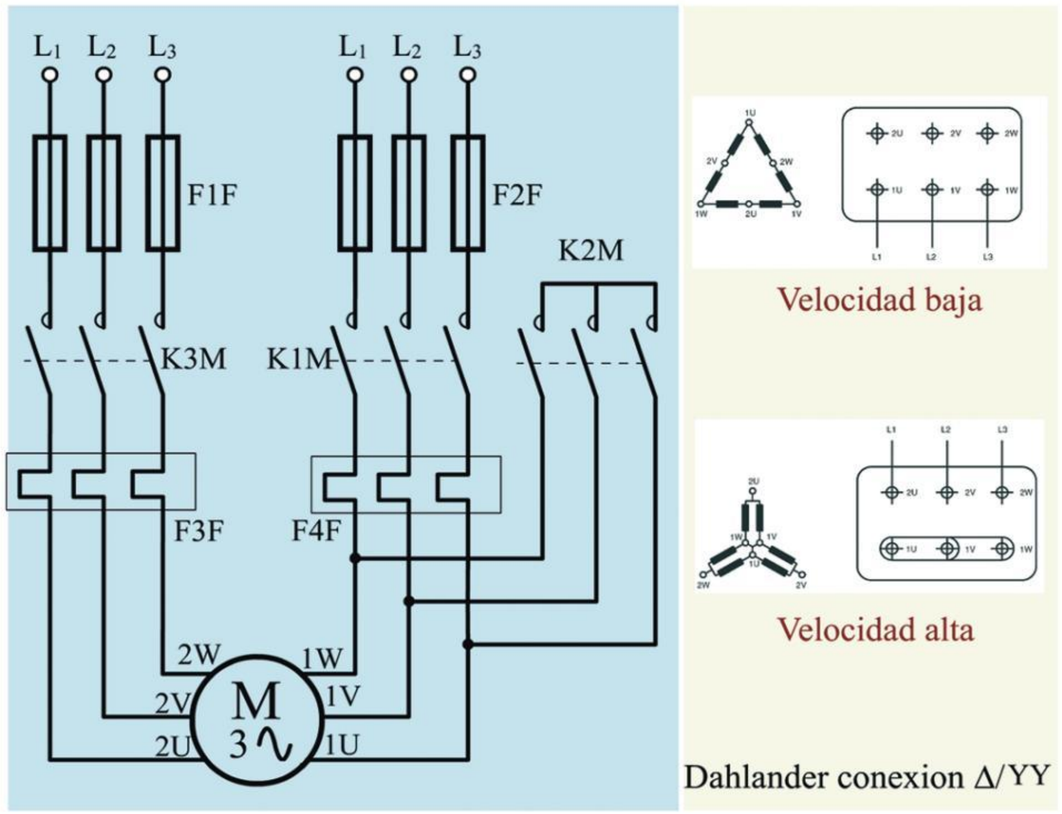


Figura 20.33. (a) Esquema de fuerza de motor de dos velocidades en conexión Dahlander. (b) Conexión de los bobinados para Δ/YY.

20.6.2. Motor de dos velocidades con dos devanados separados

También es posible conseguir dos velocidades de giro diferentes con dos devanados separados. Cada uno de los devanados posee un número de polos acorde con la velocidad deseada. Dependiendo del devanado que se conecte conseguimos una velocidad u otra.

En el esquema de la Figura 20.34 se ha representado el circuito de fuerza de un motor trifásico para dos velocidades de giro con dos devanados separados.

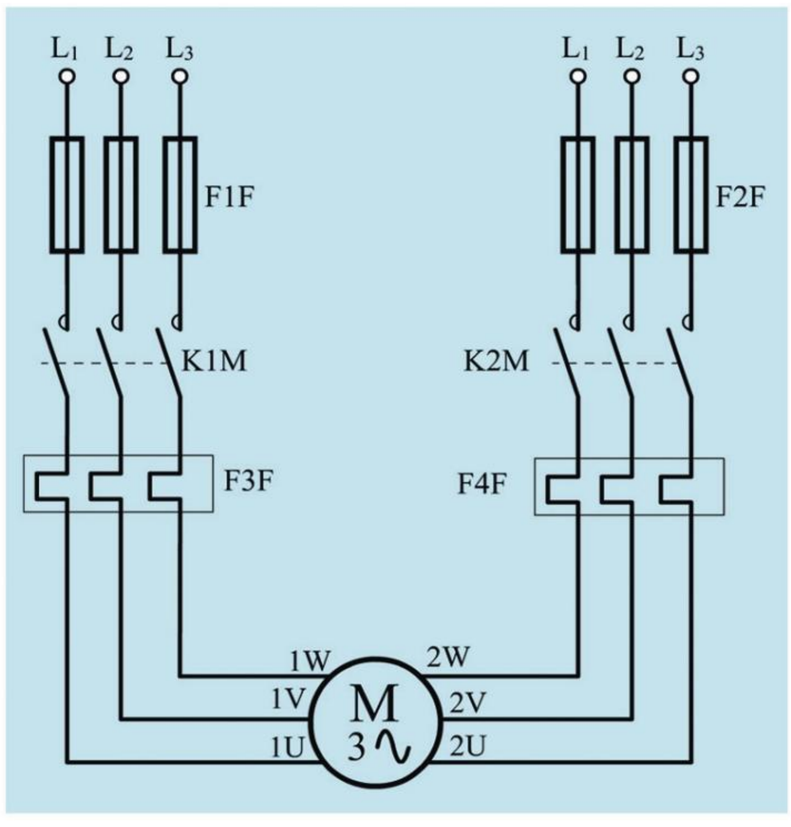


Figura 20.34. Esquema de fuerza de motor trifásico de dos velocidades con devanados separados.

Cuando se acciona el contactor KM1 el motor marcha a velocidad más lenta. Al desconectar KM1 y conectar KM2, el motor funciona a la velocidad más alta.

20.7. Motores monofásicos

El suministro de C.A. trifásica no siempre está disponible en todas las instalaciones eléctricas. Así, por ejemplo, las viviendas son alimentadas con C.A. monofásica (fase + + neutro). En estos casos, dada la sencillez, robustez, bajo precio y ausencia de chispas, son de gran aplicación los motores asíncronos monofásicos de inducción de rotor en cortocircuito. Para pequeños electrodomésticos (batidoras, molinillos, etc.) la tendencia es utilizar el motor universal. En cualquier caso, la utilización de motores monofásicos será factible para aplicaciones de pequeña potencia.

20.7.1. Motor monofásico de inducción de rotor en cortocircuito

Al igual que los trifásicos, están constituidos por un rotor de jaula de ardilla y un estator donde se alojarán los devanados inductores. Su principio de funcionamiento es similar a los asíncronos trifásicos, es decir, se basan en las fuerzas que aparecen en los conductores del rotor en cortocircuito cuando es sometido a la acción de un campo giratorio. Aprovechando este principio se pueden construir diferentes tipos de motores, de los cuales estudiaremos los siguientes: *motor monofásico de fase partida*, *motor monofásico de fase partida con condensador de arranque*, *motor monofásico con espira en cortocircuito* y *motor trifásico como monofásico*.

Si en el estator situamos un bobinado monofásico y lo sometemos a una tensión alterna senoidal, el campo magnético que se obtiene no es giratorio. Lo que se produce es un campo magnético alternativo y fijo (el campo cambia de polaridad con la frecuencia de forma alternativa). El motor se comporta como un transformador, induciéndose en los conductores del rotor una f. e. m. y una corriente que no es capaz de provocar un par de arranque efectivo en el rotor (los conductores del rotor desarrollan primero un par de fuerzas en un sentido y cuando cambia el flujo magnético desarrollan el par de fuerzas en sentido contrario, con lo que no consiguen poner en marcha el motor) [Figura 20.35(a)].

Si en estas condiciones empujamos el rotor manualmente en uno de los sentidos, conseguiremos desplazar el eje del campo magnético del rotor y el motor comenzará a girar hasta alcanzar su velocidad nominal [Figura 20.35(b)]. Hay que tener en cuenta que al ponerse el rotor en movimiento, en los conductores de este aparece una nueva f. e. m. inducida debida al giro de aquellos en el seno del campo magnético alternativo producido por el estator. Esta f. e. m. genera unas corrientes que dan lugar a un campo magnético de reacción que queda desfasado un ángulo de 90º respecto

© Ediciones Paraninfo

al principal del estator. En estas condiciones ya aparece un par de fuerzas sobre el rotor que lo hace girar en el mismo sentido en el que se lo haya impulsado inicialmente.

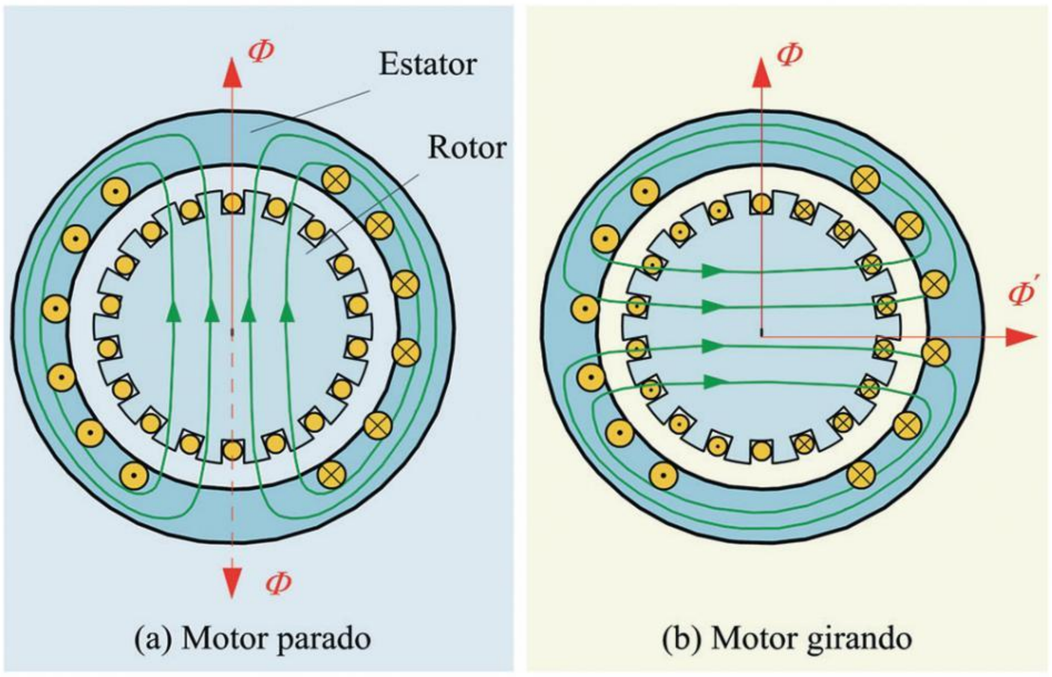


Figura 20.35. Motor monofásico de inducción. (a) Al ser el campo generado por el devanado del estator alternativo, el motor no arranca. (b) Al empujar al rotor, se desplaza el campo magnético y el rotor se pone en movimiento.

Al igual que sucede con los motores asíncronos trifásicos, la velocidad de estos motores depende del número de pares de polos del devanado y de la frecuencia de la red.

20.7.2. Motor asíncrono monofásico de fase partida

Por supuesto, no sería muy práctico tener que arrancar los motores asíncronos trifásicos de forma manual. Para conseguir que el motor arranque automáticamente se inserta en las ranuras del estator un segundo bobinado auxiliar que ocupa 1/3 de dichas ranuras. En la Figura 20.36 se muestra un esquema de la disposición de los dos bobinados para un par de polos en un estator de 12 ranuras. Los terminales marcados con las letras mayúsculas U, X, indican el principio y final del bobinado principal, y los marcados con minúsculas u, x, los del auxiliar.

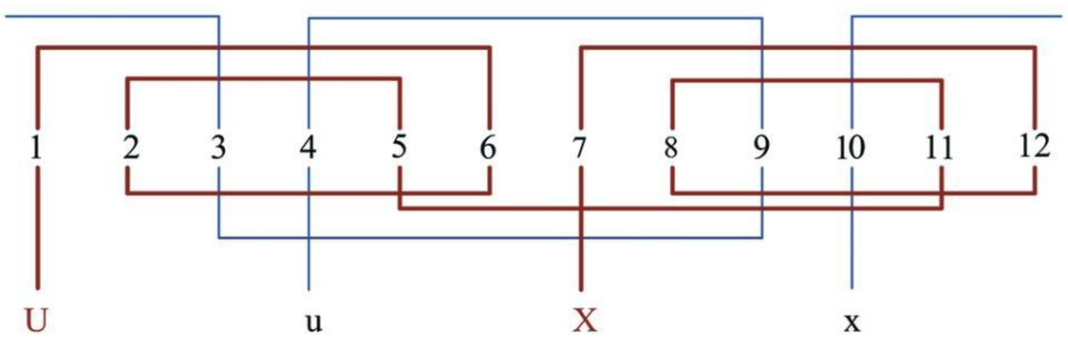


Figura 20.36. Bobinado principal y auxiliar de un motor asíncrono monofásico de fase partida.

Como la impedancia de las dos bobinas es diferente, se produce un ángulo de desfase en la corriente absorbida por el bobinado auxiliar respecto a la del principal. Este ángulo suele ser de adelanto, debido a que el bobinado auxiliar es de menor sección y, por tanto, más resistivo. El flujo que produce dicha bobina queda también adelantado al principal, lo que hace que se forme un campo giratorio suficiente para impulsar a moverse al rotor. Dado que el ángulo de desfase entre ambos flujos resulta muy pequeño, el par de arranque también lo es.

En la Figura 20.37 se muestra el esquema de conexiones de un motor asíncrono monofásico de fase partida, donde se puede observar que el devanado auxiliar se conecta en paralelo con el principal. Dada la alta resistencia que posee el devanado auxiliar, es conveniente desconectarlo una vez que el rotor gira a una velocidad cercana al 75 % de su velocidad nominal. Para no tener que hacer esta operación de forma manual, se intercala en el devanado auxiliar un interruptor centrífugo acoplado al eje de giro del motor, de tal forma que una vez arrancado y superada una cierta velocidad, el interruptor se abre y desconecta el devanado auxiliar.

> Para invertir el sentido de giro de estos motores basta con invertir las conexiones del devanado auxiliar de arranque.

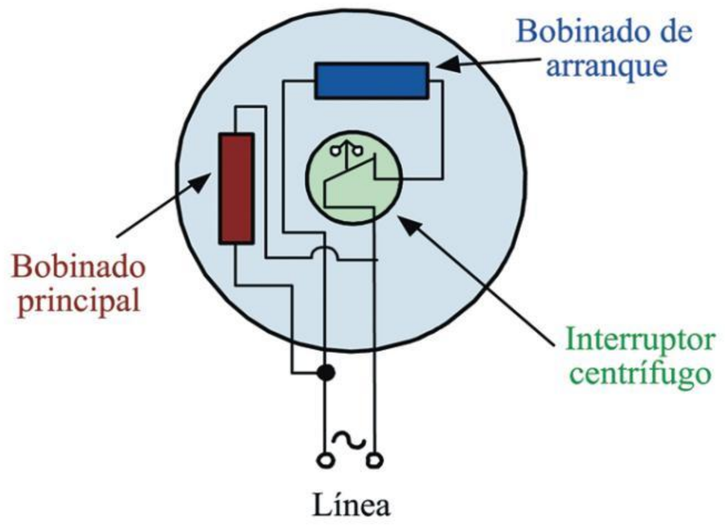


Figura 20.37. Esquema de conexiones de arranque de un motor asíncrono monofásico de fase partida mediante interruptor centrífugo.

20.7.3. Motor asíncrono monofásico con condensador de arranque

Para aumentar el par de arranque de estos motores se añade un condensador en serie con el bobinado auxiliar, de tal forma que el ángulo de desfase entre los flujos producidos por ambas bobinas se acerque a 90º. Dado que el desfase entre ambos devanados se consigue fundamentalmente gracias al condensador, es posible aumentar la sección de los conductores del devanado auxiliar, así como su número de espiras.

El par de arranque conseguido por estos motores aumenta con la capacidad del condensador. Sin embargo, una capacidad excesivamente elevada puede reducir la impedancia total del devanado auxiliar a valores muy pequeños, lo que trae consigo un aumento de la corriente absorbida por el bobinado auxiliar. Si este devanado no se desconec-

© Ediciones Paraninfo

ta una vez arrancado el motor, el calor producido por la fuerte corriente puede llegar a destruirlo. Para que esto no ocurra, una vez que el motor ha alcanzado ciertas revoluciones, se procede a la desconexión del conjunto formado por el condensador y el devanado auxiliar mediante un interruptor centrífugo, tal como se muestra en el esquema de conexiones de la Figura 20.39.



Figura 20.38. Motor monofásico con condensador (ABB).

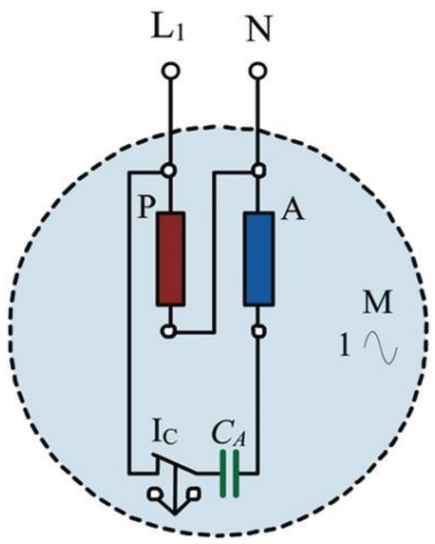


Figura 20.39. Esquema de conexiones de motor asíncrono monofásico con condensador de arranque e interruptor centrífugo.

Existen motores donde el condensador y el devanado auxiliar de arranque se mantienen conectados en paralelo y de forma permanente con el devanado principal. De esta forma se evita el uso del interruptor centrífugo y se consigue que el motor sea más silencioso. En este tipo de motores la capacidad del condensador debe ser más pequeña, por lo que el par de arranque se ve reducido. En la Tabla 20.4 se muestran, como ejemplo, las características técnicas de una gama de motores monofásicos comerciales con condensador permanente. Aquí podemos comprobar como el par de arranque conseguido y el rendimiento es bastante inferior al de los motores trifásicos. Observa también como aumenta la capacidad del condensador con la potencia nominal del motor.

Existe también la posibilidad de dotar a los motores asíncronos monofásicos de un doble condensador, tal como se muestra en el esquema de conexiones de la Figura 20.40. En este caso se conecta un condensador fijo *C* en paralelo con el devanado principal y otro en serie con el devanado auxiliar de arranque. Aquí sí se incorpora un interruptor centrífugo para la desconexión del devanado auxiliar una vez arrancado el motor.

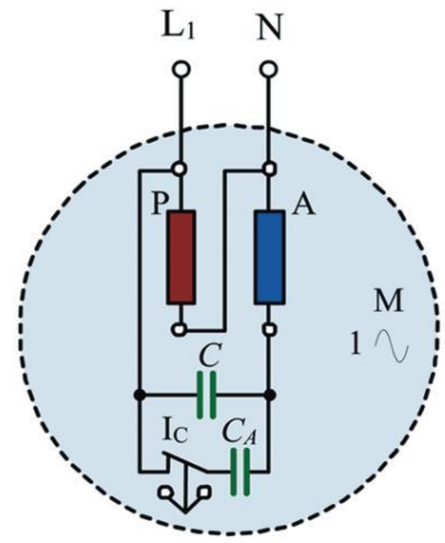


Figura 20.40. Esquema de conexiones de motor asíncrono monofásico de fase partida con doble condensador.

Los motores con condensador poseen un buen factor de potencia y un rendimiento aceptable (es inferior al de los motores trifásicos) y se aplican, por ejemplo, para electrodomésticos, máquinas herramientas, bombas, etcétera.

En los motores sin condensador el campo de aplicación se ve limitado por su bajo par de arranque, por lo que se emplean, por ejemplo, para ventiladores, bombas centrífugas, etcétera.

Tabla 20.4. Características técnicas de una gama de motores monofásicos comerciales con condensador de arranque permanente para 230 V y un par de polos

P (kW)	n (r. p. m.)	η (%)	Cos φ	I_n (A)	M_n (Nm)	M_a/M_n	I_a/I_n	C (μF)
0,12	2.685	0,47	0,97	1,15	0,43	0,90	2,3	5
0,55	2.800	0,63	0,97	3,82	1,88	0,78	3,8	20
0,75	2.810	0,66	0,97	5	2,56	0,76	4,0	25
1,1	2.780	0,67	0,94	7,65	3,81	0,73	4,2	40
1,5	2.790	0,68	0,95	10,23	5,18	0,70	4,3	50

© Ediciones Paraninfo

20.7.4. Motor monofásico con espira en cortocircuito

Este motor es de muy sencilla construcción y se aplica para motores de pequeñas potencias (hasta 100 o 200 W).

El rotor de estos motores es de jaula de ardilla. El estator es de polos salientes, y en él se arrolla la bobina principal como si fuese el primario de un transformador. En la parte extrema de cada polo se coloca una espira de cobre en cortocircuito (Figura 20.41). El devanado principal produce un campo magnético alternativo que atraviesa el rotor y las dos espiras en cortocircuito situadas en el estator. En estas espiras se induce una f. e. m. que hace que aparezca una pequeña corriente y un pequeño flujo magnético que queda retrasado respecto al flujo principal, lo que es suficiente para provocar un pequeño par de arranque en el motor.

El sentido de giro de estos motores depende de la disposición relativa de las espiras de cortocircuito y de los polos principales.

A pesar de que el par de arranque, el rendimiento y el factor de potencia de estos motores no son muy buenos, la gran sencillez de este motor lo hace ideal para aplicaciones de poca potencia en las que el par de arranque no sea muy importante.

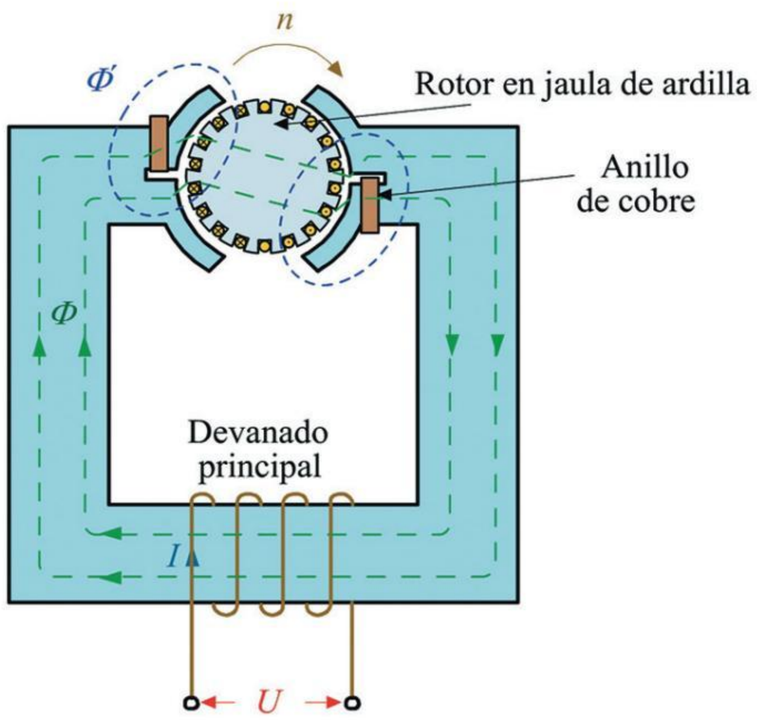


Figura 20.41. Motor monofásico con espira en cortocircuito.

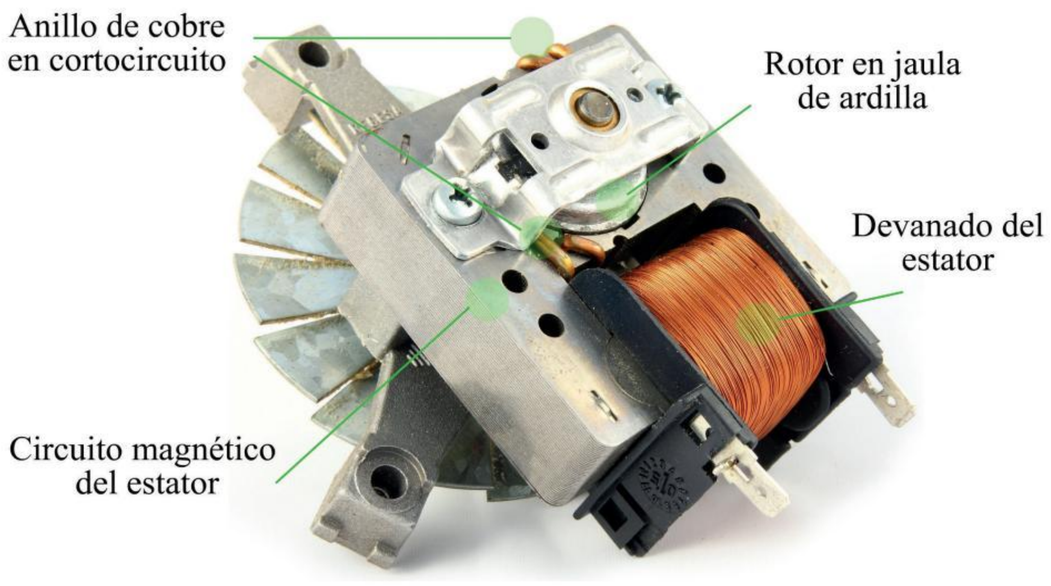


Figura 20.42. Motor monofásico con espira en cortocircuito.

20.7.5. Motor trifásico como monofásico

Existe la posibilidad de hacer funcionar un motor trifásico conectándolo a una red monofásica. Para ello se realiza la conexión de una de sus fases mediante un condensador, tal como se muestra en el esquema de conexiones de la Figura 20.43.

Este tipo de conexión solo conviene realizarla para motores de pequeña potencia. Además la potencia útil que se consigue es inferior a la indicada en sus características nominales. Por otro lado, se reduce el par de arranque.

La capacidad recomendable para el condensador depende de la tensión y potencia del motor: para 125 V y 50 Hz se recomienda 200 μF de capacidad del condensador por cada kW de potencia del motor; para 230 V y 50 Hz, 70 μF por kW, y para 400 V y 50 Hz, 22 μF por kW.

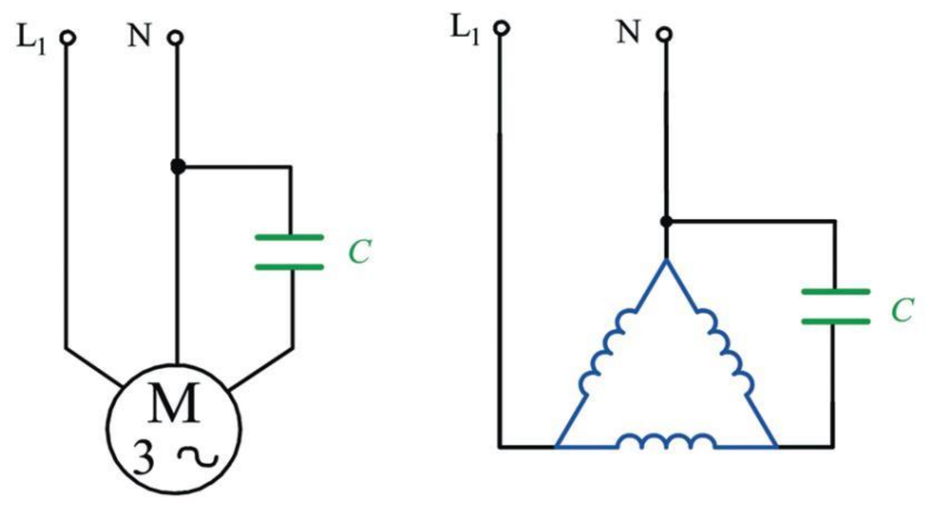


Figura 20.43. Motor trifásico funcionando como monofásico mediante condensador.

20.7.6. Motor universal

El motor universal es un motor monofásico que se puede alimentar igualmente con C.C. o con C.A. En realidad se trata de un motor de C.C. con la excitación conectada en serie con el inducido, tal como se muestra en el esquema de conexiones de la Figura 20.44.

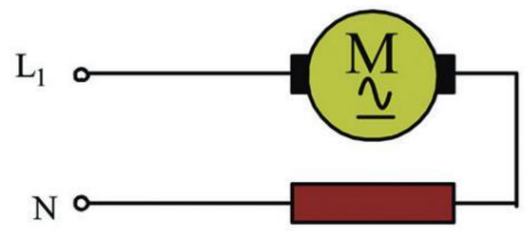


Figura 20.44. Esquema de conexiones de motor universal.

En los motores serie de C.C. el sentido de giro se invierte cuando cambiamos la polaridad de uno de sus dos devanados, el inducido o el inductor. Si invertimos el sentido de la corriente en los dos devanados a la vez, el sentido de giro no cambia. Esta es la razón de por qué estos motores pueden funcionar también en corriente alterna, ya que en este caso se invierte el sentido de la corriente tantas veces como la frecuencia de la red.

© Ediciones Paraninfo

En la práctica los motores diseñados para funcionar en corriente continua no funcionan adecuadamente en alterna, ya que las pérdidas por histéresis y corrientes parásitas provocan fuertes calentamientos en los núcleos de hierro macizos. Además, aparecen fenómenos en los bobinados, como la autoinducción, que limitan la circulación de corriente por ellos. De esta forma, los motores universales se diseñan especialmente para funcionar con C.A., construyendo los núcleos con chapa magnética de hierro al silicio de alta permeabilidad, al igual que se hace con los motores de C.A.

Una de las principales ventajas de estos motores es que pueden funcionar a velocidades muy altas (por encima de las 10.000 r. p. m.). Además se puede regular fácilmente su velocidad, bien modificando la tensión total aplicada al motor, o la aplicada al circuito de excitación. Por contra, estos motores tienen el inconveniente de que al precisar de colector de delgas y escobillas, se producen chispas y desgastes en ambos elementos, que hacen aumentar la tareas de mantenimiento de los mismos.

Al igual que en los motores serie de C.C., la velocidad de estos motores disminuye con la carga aplicada, pudiéndose alcanzar velocidades excesivamente altas cuando trabajan en vacío.

La principal aplicación de estos motores es como elemento motor de pequeños electrodomésticos y pequeñas máquinas herramientas: batidoras, robots de cocina, molinillos, taladradoras portátiles, etcétera.

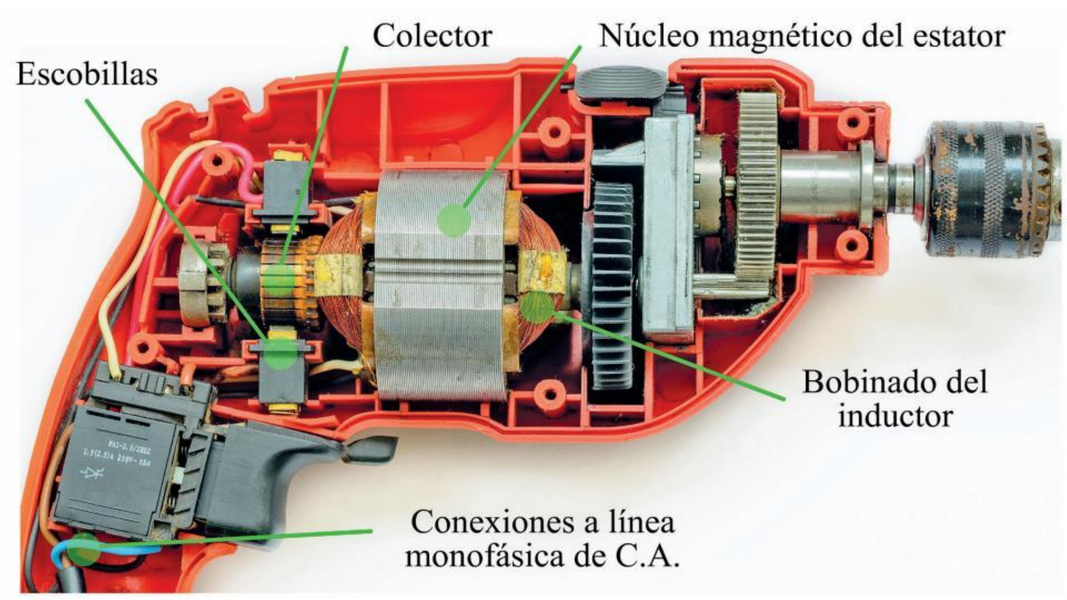


Figura 20.45. Aplicación práctica de un motor universal.

20.8. Motor síncrono trifásico

La constitución de un motor síncrono trifásico es exactamente igual a la de un alternador trifásico. Este tipo de motor presenta la ventaja de que gira a una velocidad rigurosamente constante para diferentes regímenes de carga, siempre que se mantenga constante la frecuencia de alimentación.

Sin embargo, como estudiaremos a continuación, estos motores no son capaces de arrancar por sí mismos, por lo que es necesario utilizar dispositivos auxiliares de arranque.

Cuando aplicamos C.A. al devanado trifásico, situado en el estator, de un motor síncrono, se produce un campo magnético giratorio que gira a la velocidad síncrona. Si hacemos girar a las piezas polares del rotor a una velocidad igual, se produce una especie de acoplamiento entre los polos de distinta polaridad del rotor y los del campo giratorio, de modo que se produce un arrastre del rotor por parte de dicho campo giratorio (Figura 20.46). La velocidad del rotor coincide con la de sincronismo del campo giratorio.

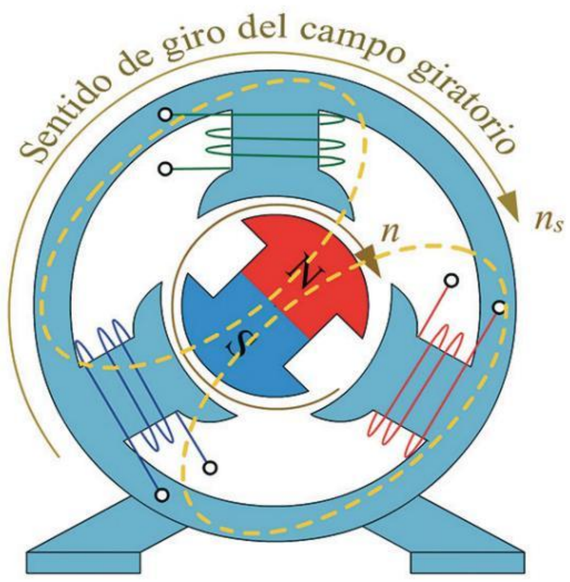


Figura 20.46. Motor síncrono trifásico.

$$n = \frac{60f}{p}$$

n = Velocidad del motor síncrono (r. p. m.).
f = Frecuencia de la red (Hz).
p = Número de pares de polos del devanado estatórico.

El inconveniente principal de este motor es que necesita ser empujado hasta la velocidad de sincronismo para que pueda funcionar, por lo que se suelen arrancar en vacío.

Para arrancarlos existen diferentes procedimientos, tales como el arranque mediante motor auxiliar de lanzamiento o el arranque como motor asíncrono.

Estos motores necesitan de una fuente de C.C. para la alimentación de la excitación del rotor. Además, no se los puede someter a variaciones bruscas de la carga, ya que esto podría ocasionar la pérdida de la velocidad de sincronismo del rotor, lo que provocaría la parada del motor.

Las ventajas fundamentales que presentan estos motores es que desarrollan un factor de potencia muy alto; incluso alimentando adecuadamente a la excitación se puede conseguir que el factor de potencia sea capacitivo. Además, poseen un rendimiento muy bueno.

La utilización de motores trifásicos síncronos de mediana y gran potencia queda limitada a muy pocas aplicaciones. También se pueden construir pequeños motores síncronos monofásicos que consiguen una velocidad constante con una

© Ediciones Paraninfo

construcción relativamente sencilla. En estos casos el rotor no posee ningún tipo de bobinado y se construye de tal manera que se consigue que se formen polos magnéticos opuestos a los del campo giratorio generado por el estator. Estos pequeños motores son ideales para la construcción de relojes eléctricos, registradores y en todas aquellas aplicaciones en las que es importante mantener una velocidad constante.



(a) (b)

Figura 20.47. Motor síncrono: (a) de gran potencia (ABB); (b) pequeño motor.

20.8.1. Motor Brushless con síncrono

Aunque los motores asíncronos trifásicos son unas máquinas con excelentes prestaciones, resulta que para su uso en redes con disponibilidad de solo dos fases, los motores monofásicos presentan una merma en estas prestaciones. Estos motores poseen un par de arranque muy bajo y su par máximo es bastante limitado, resultando de ello, que para ciertas aplicaciones, como por ejemplo máquinas herramientas portátiles, resultan inútiles, ya que tienden a detener su giro cuando la demanda de par es alta. Así, por ejemplo, si una taladradora eléctrica viniese equipada con un motor monofásico, se bloquearía en el momento de exigir la máxima potencia.

De esta forma, el motor que se ha incluido para este tipo de aplicaciones ha sido siempre el motor universal serie, que aunque en un principio es una máquina de C.C., puede funcionar también con C.A. gracias a la conexión serie de los devanados del inductor e inducido. Estos motores tienen un excelente par de arranque y cuando tienden a reducir su velocidad, por una mayor exigencia del par resistente, presentan un par motor elevado que evitan su parada.

Aunque el motor universal serie ha sido hasta ahora el más utilizado en aplicaciones donde se requiere un buen par mecánico y en las que solo está disponible una red monofásica para su alimentación, tienen un punto débil: su colector de delgas y escobillas. El colector de delgas desprende chispas al contacto con las escobillas, lo que le hace peligroso para su uso en ambientes explosivos. Además, se produce un alta emisión de ruido electromagnético que puede llegar a interferir en el funcionamiento de equipos electrónicos de radiocontrol.

Por otro lado, las escobillas frotan de forma continua el colector, produciendo su desgaste, además de un ensuciamiento de las delgas del colector. Estas circunstancias hacen que este motor requiera de un mantenimiento periódico, en el que se deben sustituir las escobillas y limpiar el colector. La solución a estos inconvenientes viene de la mano de los motores sin escobillas o Brushless para la conexión en redes monofásicas.

Estos motores en realidad constan de un motor síncrono trifásico al que se le alimenta mediante un circuito electrónico de conmutación (Figura 20.48).

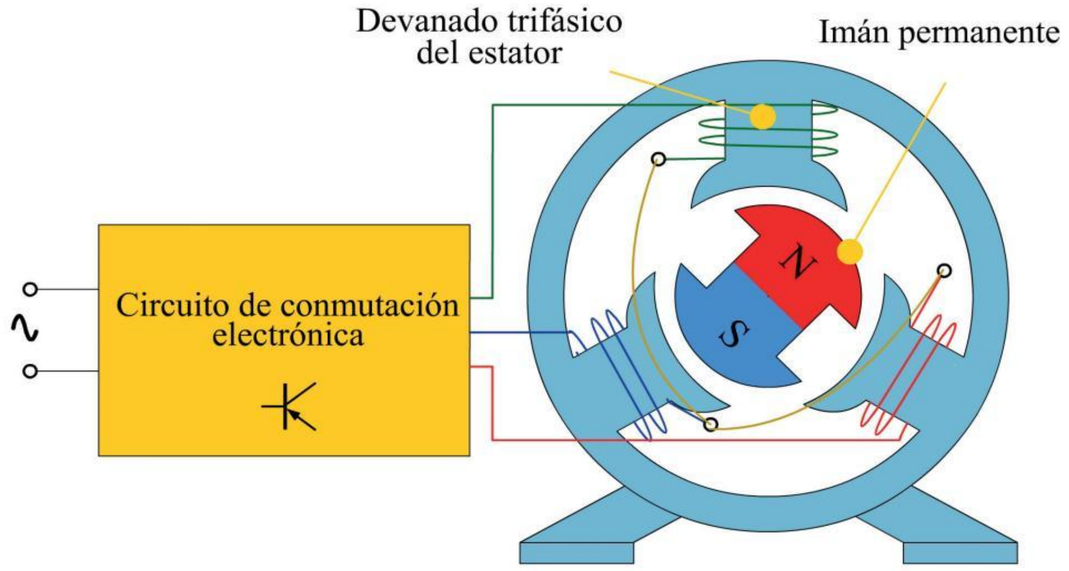


Figura 20.48. Motor Brushless con síncrono trifásico.

Dado que no vamos a disponer de una red trifásica para su conexión, el circuito electrónico de conmutación es capaz de ir alimentando de forma secuencial y sincronizada a cada una de las tres bobinas del estator del motor, generando así el campo magnético giratorio que arrastra a las piezas polares del rotor y produce el giro del eje. La velocidad de giro dependerá de la frecuencia producida por el circuito de conmutación. Tanto la secuencia de arranque, como el control de la velocidad de este motor se realiza gracias a la complejidad del circuito electrónico de control.

Las piezas polares del rotor se construyen con imanes permanentes de alta inducción magnética, utilizando materiales como la ferrita, o aleaciones neodimio-hierro-boro, samario-cobalto y aluminio-níquel-cobalto. Además, se pueden construir con diferente número de polos.



Figura 20.49. Motor sin escobillas con controlador electrónico.

© Ediciones Paraninfo

20.8.2. Motor síncrono para el vehículo eléctrico

Con la llegada del coche eléctrico la búsqueda del motor eléctrico más idóneo no ha hecho más que empezar.

Los primeros motores que se han ido implementando para su uso en la automoción ha sido el motor trifásico asíncrono de inducción por su simplicidad y reducido precio. Sin embargo, la tendencia actual es la incorporación del motor síncrono trifásico con la inclusión de piezas polares de múltiples pares fabricados con imanes permanentes de alta inducción.

El control y la generación del campo giratorio del motor síncrono se realiza mediante un convertidor electrónico que, alimentado por la batería, hace que el rotor gire a una velocidad más precisa y exacta, pudiendo incluso prescindir de la caja de cambios.

Dado que el motor síncrono está constituido de la misma forma que un alternador, es muy sencillo hacer trabajar a esta máquina eléctrica como generador. Esto resulta de vital importancia para la recuperación de energía eléctrica en los tramos de la vía descendentes y en el uso de los frenos regenerativos. De esta forma se consigue recargar la batería eléctrica del vehículo en marcha y aumentar así su autonomía.

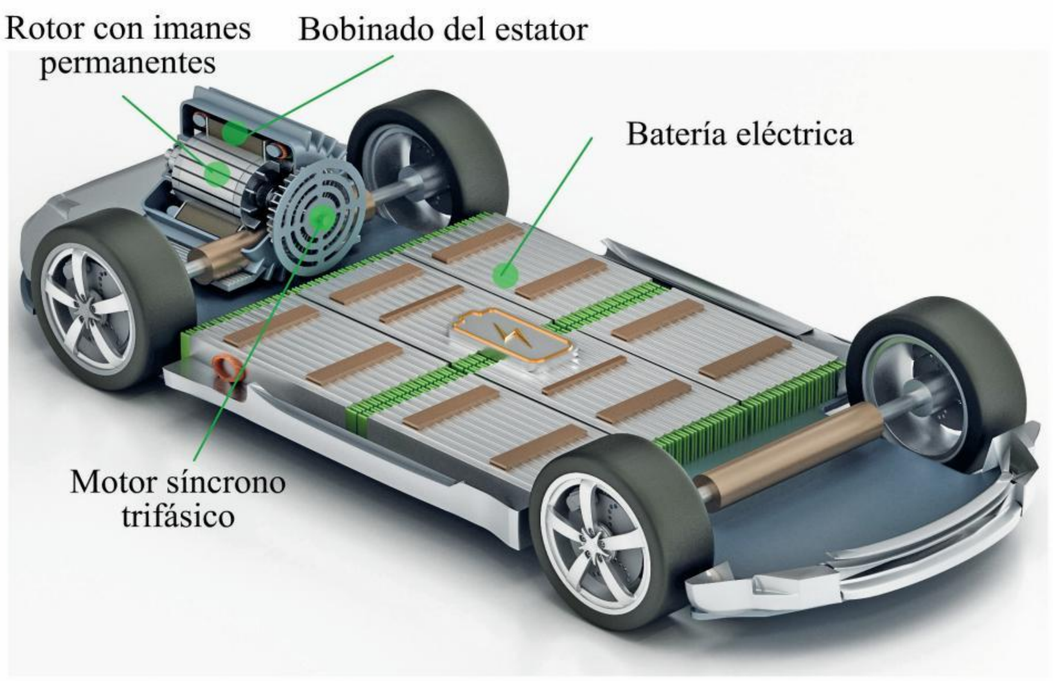


Figura 20.50. Motor síncrono para el vehículo eléctrico.

20.9. Motores especiales

Con la aparición de las nuevas tecnologías se ha hecho necesario el desarrollo de pequeños motores eléctricos capaces de adaptarse en todo momento a las necesidades específicas de cada aplicación. La característica fundamental de estos motores es que poseen un amplio margen de control y regulación de sus características funcionales. Normalmente esta regulación se realiza mediante equipos electrónicos. Entre otros, cabe destacar los siguientes motores: *motor paso a paso* y *servomotor*.

20.9.1. Motor paso a paso

La principal característica de este motor es que podemos hacer que se posicione su eje en una determinada posición de giro; además, es posible tener un control muy preciso de su velocidad de giro.

El estator de estos motores está constituido por varios electroimanes y el rotor por uno o varios imanes permanentes (Figura 20.51). A las diferentes bobinas del estator se alimenta mediante impulsos, proporcionados normalmente por un circuito electrónico, y se consigue que el rotor se posicione paso a paso según sea el avance de dichos impulsos.

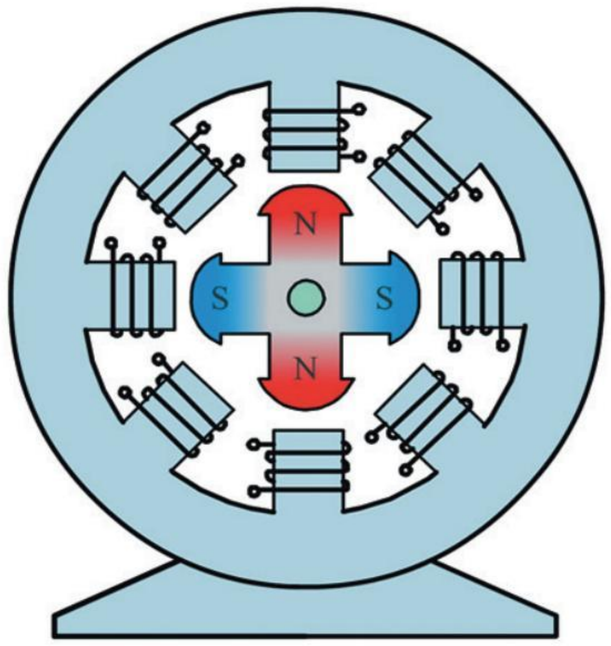


Figura 20.51. Motor paso a paso.

La velocidad de giro del rotor depende de la frecuencia de los impulsos y del número de polos. Se fabrican motores con diferentes ángulos de paso, como, por ejemplo, 24 pasos por revolución, 28, 96, 200, etc. De tal forma que si un motor paso a paso posee 24 pasos, su ángulo de paso será igual a: 360º/24 = 15º.

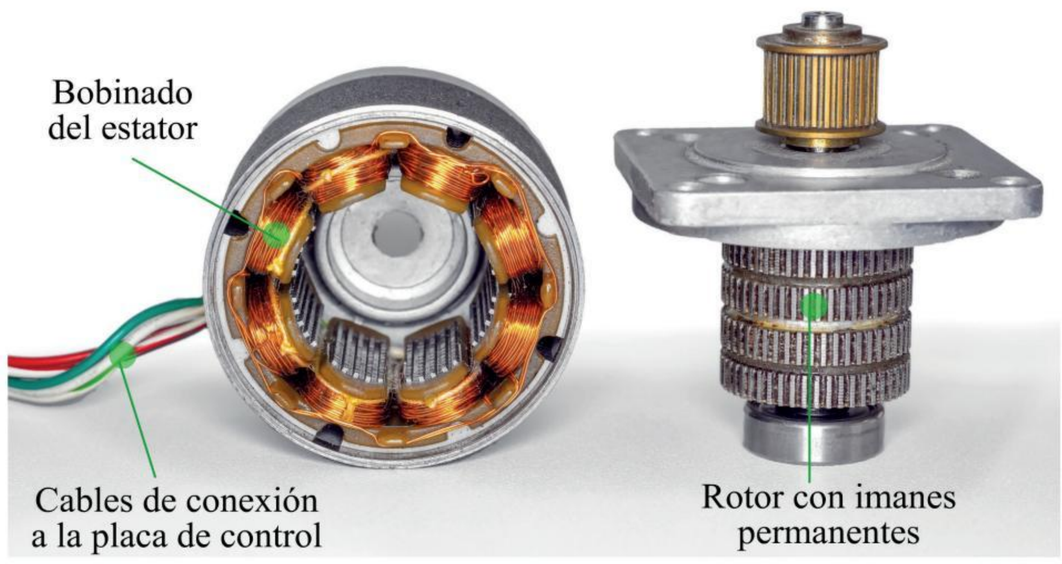


Figura 20.52. Partes de un motor paso a paso.

Entre otras, las aplicaciones de estos motores son: impresoras, plotters, teletipos, telefax, cintas magnéticas, equipos médicos, lectores de tarjetas magnéticas, taxímetros, contadores, etcétera.

© Ediciones Paraninfo

20.9.2. Servomotor

Cuando en ciertas aplicaciones se hace necesario un control preciso de la posición angular exacta del eje del motor, su aceleración y velocidad, se utiliza el servomotor.

Estos motores se utilizan en infinidad de aplicaciones, como por ejemplo, el control de brazos robóticos, puertas automáticas, impresoras, máquinas herramientas, automoción, drones, timones de aviones y barcos, sistemas de posicionamiento de paneles solares, etcétera.

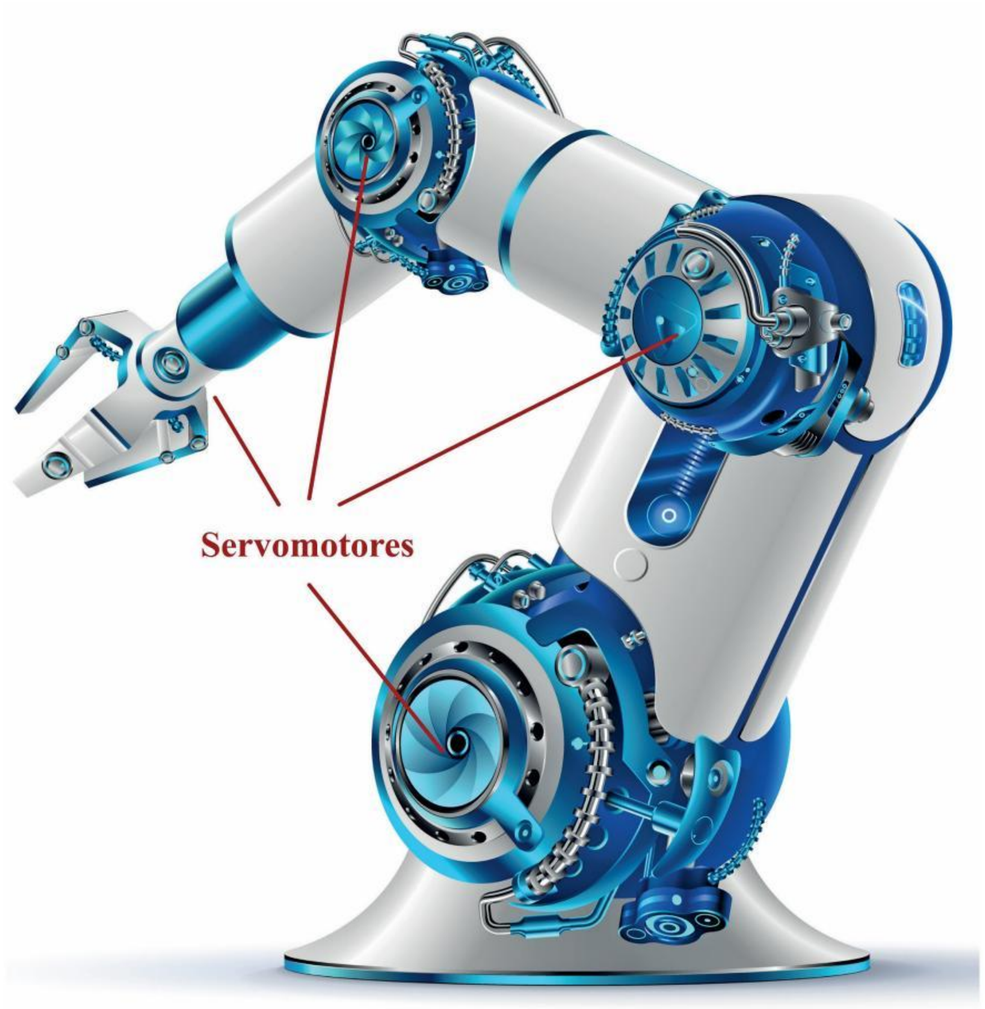


Figura 20.53. Servomotores en robótica.

Estos motores necesitan de un controlador electrónico y de un sensor de posición en su eje, también llamado **encoder,** que produce una señal de retroalimentación que, informa al controlador de los valores precisos de posición, velocidad y aceleración.

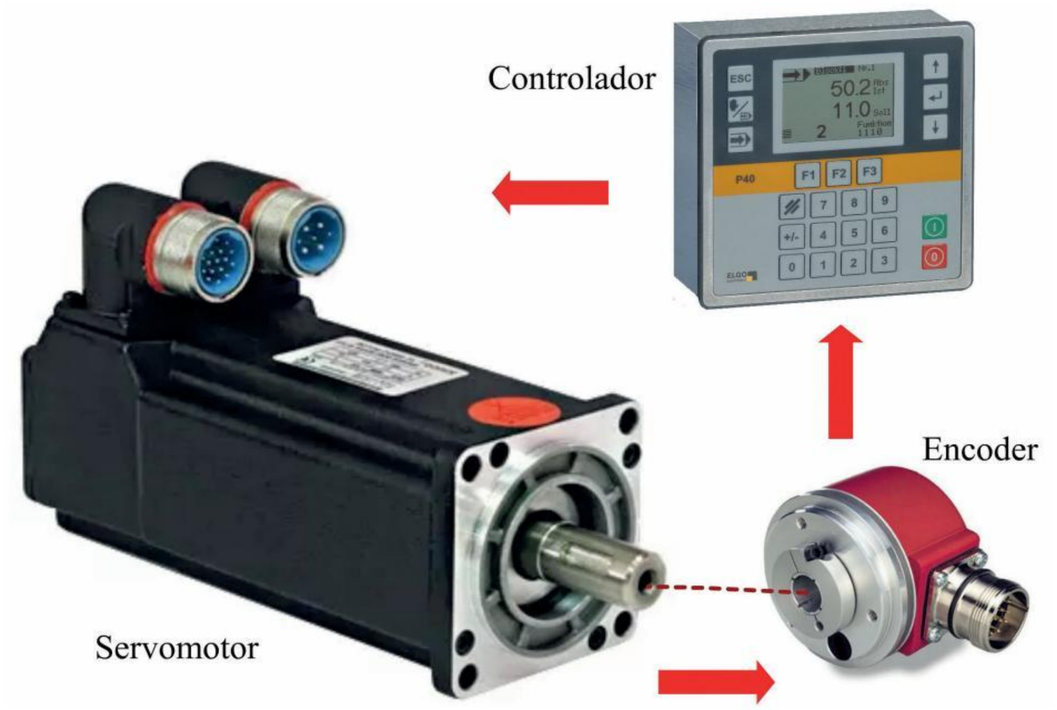


Figura 20.54. Circuito de control de un servomotor.

Dependiendo de la aplicación, hoy en día, los servomotores pueden utilizar diferentes tipos de motores tanto en corriente continua como alterna. De esta forma es posible encontrar servomotores construidos con: motores de C.C. tanto con escobillas como sin ellas, motores paso a paso y motores de C.A. tanto asíncronos como síncronos.

20.10. El alternador asíncrono de inducción

En la actualidad se está extendiendo el uso de este generador de energía eléctrica, sobre todo para hacerse funcionar como aerogenerador en las turbinas eólicas que se conectan directamente a la red eléctrica (Figura 20.55).

Un generador de inducción o alternador asíncrono se construye exactamente igual que un motor asíncrono de inducción. Para hacerlo funcionar como generador se lo conecta a la red eléctrica, y se le hace girar por encima de su velocidad de sincronismo. Esto se consigue al aplicársele al eje un par motor mediante una turbina que consigue que la potencia mecánica aplicada se convierta en energía eléctrica.

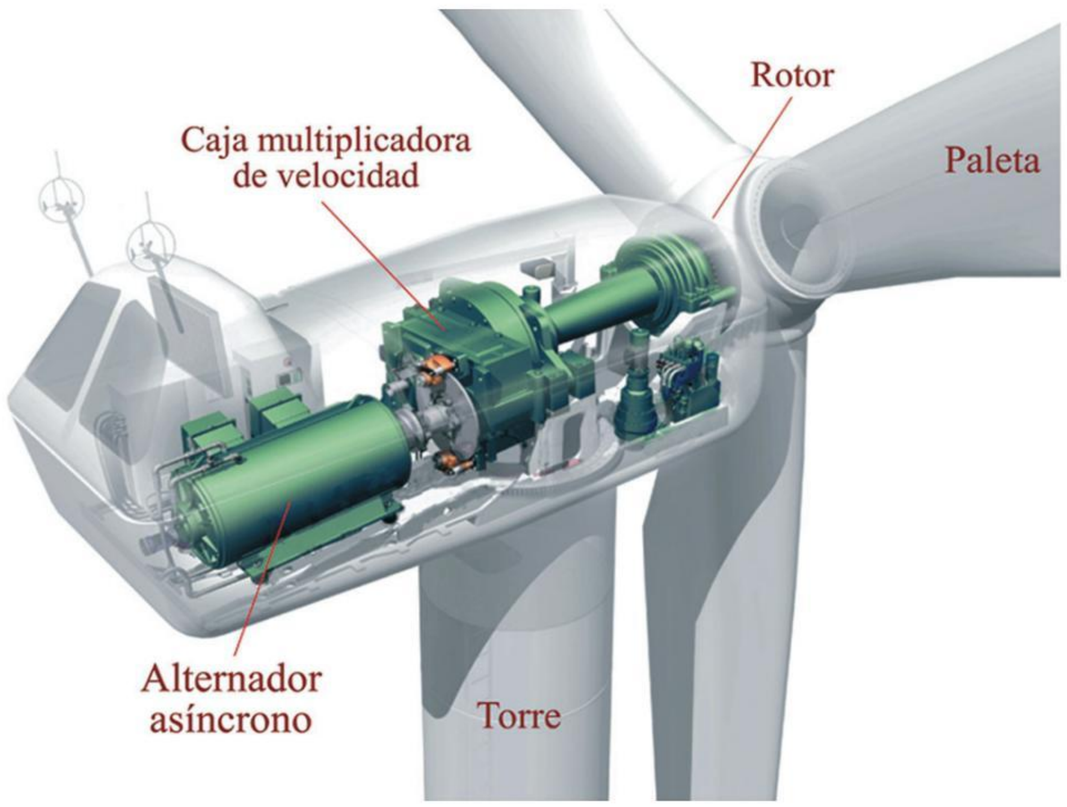


Figura 20.55. Turbina eólica con alternador asíncrono (Nordex-1.500 kW).

El generador asíncrono se puede construir con rotor bobinado o con rotor en jaula de ardilla, aunque este último es más utilizado debido a su bajo coste económico y reducido mantenimiento.

Al conectarse la máquina asíncrona a la red eléctrica, primero funciona como motor y gira a una cierta velocidad en función del número de polos del estator. En el momento en que la turbina eólica hace girar el rotor por encima de la velocidad de sincronismo ω_s, tal como se muestra la Figura 20.56, las corrientes del rotor producen un campo magnetizante que, al cortar en su giro a los conductores del bobinado del estator, inducen fuerzas electromotrices en

© Ediciones Paraninfo

este último bobinado un poco más elevadas que la tensión de línea aplicada por la red trifásica. Esto hace que el bobinado del estator entregue una cierta potencia eléctrica a la red que dependerá de la diferencia que exista entre la velocidad de giro del rotor ω y la de sincronismo ω_s algo inferior.

Si el par mecánico aplicado al rotor es M, la potencia eléctrica generada será igual a:

$$P = M\,(\omega - \omega_s)$$

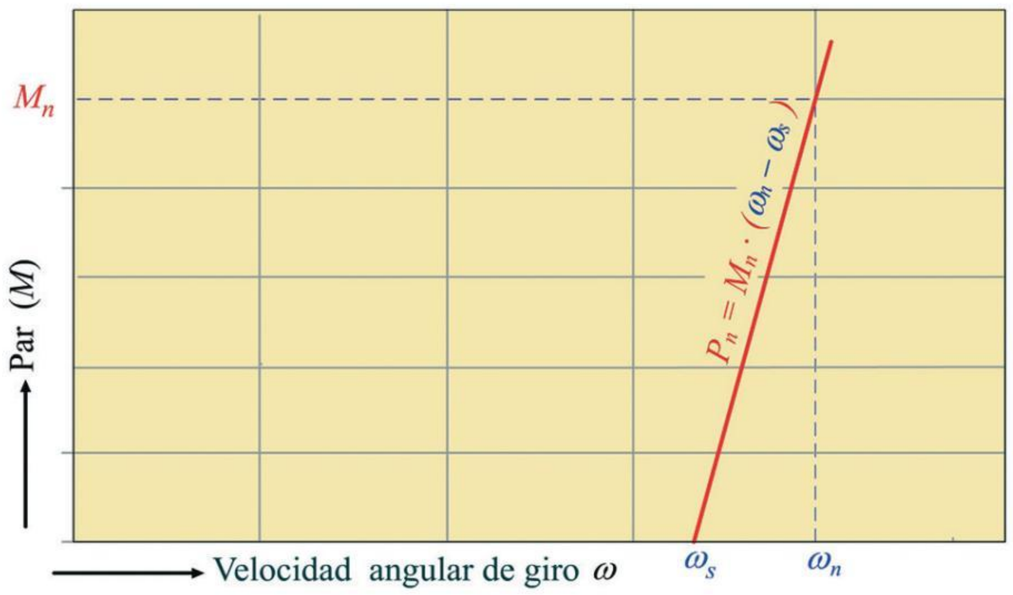


Figura 20.56. Potencia entregada por un generador asíncrono cuando se supera la velocidad de sincronismo.

Actividad resuelta 20.10

Se dispone de un motor asíncrono trifásico de jaula de ardilla de 10 pares de polos. Se le conecta a una red trifásica de 50 Hz y se le hace girar mediante un aerogenerador a una velocidad de 308 r.p.m. gracias al aplique de un par mecánico de arrastre de 20.000 Nm. Calcula la potencia eléctrica que hipotéticamente será entregada a la red.

Solución:

La velocidad síncrona del campo giratorio es:

$$n_s = \frac{60f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{10} = 300 \text{ r.p.m.}$$

$$\omega_s = \frac{2\pi n_s}{60} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 300}{60} = 31{,}42 \text{ rad/s}$$

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot 308}{60} = 32{,}25 \text{ rad/s}$$

$$P = M(\omega - \omega_s) = 20.000(32{,}51 - 31{,}42) = 21.800 \text{ W}$$

Lo habitual es que el deslizamiento sea pequeño, del orden del 2 % para generadores en torno a 100 kW de potencia y del 0,5 % para grandes generadores de MW.

La maniobra de conexión de un aerogenerador asíncrono suele consistir en esperar a que la velocidad de giro del rotor, con el estator desconectado de la red eléctrica, supere ligeramente la velocidad de sincronismo, para posteriormente conectarlo a la red. En estas circunstancias el generador aporta energía a la red de una frecuencia igual a la de la línea. La potencia eléctrica entregada a la red aumenta con la velocidad, la cual se debe limitar para que no se supere la potencia nominal del alternador. En caso contrario se producirían corrientes de sobrecarga que podrían dañar el devanado del estator.

Uno de los inconvenientes que presentan los alternadores asíncronos es que necesitan absorber la potencia reactiva (que alimenta al bobinado del estator para producir el campo magnético giratorio) de la línea eléctrica a la que se los conecta, lo que hace que se produzca un factor de potencia muy bajo que es necesario compensar mediante la conexión de condensadores.

La máquina asíncrona de inducción también puede funcionar como generador sin estar conectado a la red eléctrica; para ello basta con conectar una batería de condensadores, como la utilizada para la compensación de energía reactiva, al devanado del estator.

En la actualidad, en torno al 90 % de los aerogeneradores comerciales se construyen con sistemas de velocidad constante con alternadores asíncronos.

20.11. Ensayos de los motores de C.A.

De la misma forma que se hacía para los motores de C.C., a los motores de C.A. también se los somete a una serie de ensayos con el fin de determinar sus características y de analizar su comportamiento en diferentes situaciones de funcionamiento. De esta forma, se pueden realizar ensayos para determinar el rendimiento, para evaluar el calentamiento de la máquina para diferentes regímenes de funcionamiento, medición de la resistencia de aislamiento, medición de la rigidez dieléctrica, etc. Además, a través de los ensayos se pueden determinar las características electromecánicas de los motores, las cuales relacionan la velocidad de rotación (n), el par motor (M) y la corriente absorbida por el motor (I).

Al igual que hacíamos con los motores de C.C., aquí también necesitaremos dispositivos que sean capaces de medir el par motor y que además sean capaces de someter el motor a diferentes regímenes de carga. Para ello es posible utilizar frenos de polvo magnético o dinamo-freno, que acoplados al eje del motor pueden someterlo a diferentes pares de frenado, pudiendo conocerse en todo momento el par resistente aplicado.

© Ediciones Paraninfo

Comprobación práctica en el laboratorio

20.1. Constitución de un alternador. Consigue un alternador trifásico, analiza sus partes, prestando especial atención a la constitución del devanado inducido, al inductor y al conjunto formado por el par de anillos colectores y las escobillas que alimentan al circuito inductor con C.C.

20.2. Constitución de un motor de C.A. Observa detenidamente las partes de que constan los diferentes tipos de motores de C.A. que existen en el laboratorio de Electrotecnia y apunta las diferencias que existen entre cada uno de ellos, poniendo especial atención en las diferencias básicas entre un motor de C.C. y otro de C.A. Una vez hecho esto, realiza una clasificación de las máquinas eléctricas.

20.3. Arranque directo de un motor asíncrono trifásico. Consigue los elementos necesarios para realizar el arranque directo de un motor asíncrono trifásico mediante contactores y lleva a cabo el montaje en el entrenador didáctico de los circuitos de fuerza y de mando expuestos en esta unidad. Una vez comprobado el correcto funcionamiento del circuito, intercala un amperímetro en una de las fases del motor, así como un vatímetro y un voltímetro. Comprueba cómo el motor absorbe más corriente en el arranque. Con las lecturas de los aparatos de medida determina el factor de potencia del motor y calcula los condensadores necesarios para mejorar el factor de potencia a 0,95. Ahora conecta los condensadores y comprueba cómo se reduce la corriente con el factor de potencia mejorado.

20.4. Inversión de giro de un motor asíncrono trifásico. Consigue los elementos necesarios para realizar la inversión de giro de un motor asíncrono trifásico y lleva a cabo el montaje en el entrenador didáctico de los circuitos de fuerza y de mando expuestos en esta unidad. Una vez comprobado el correcto funcionamiento del circuito, intercala un amperímetro en una de las fases del motor y contrasta los valores de intensidad obtenidos en los siguientes casos: a) motor en marcha normal; b) motor invirtiendo su giro; c) motor en arranque.

20.5. Arranque estrella-triángulo de un motor asíncrono trifásico. Consigue los elementos necesarios para realizar el arranque estrella-triángulo de un motor asíncrono trifásico mediante contactores y lleva a cabo el montaje en el entrenador didáctico de los circuitos de fuerza y de mando expuestos en esta unidad. Una vez comprobado el correcto funcionamiento del circuito, intercala un amperímetro en una de las fases del motor y contrasta los valores de intensidad obtenidos en los siguientes casos: a) motor en conexión en estrella; b) motor en conexión en triángulo.

20.6. Ensayo de un motor asíncrono trifásico. Vamos a estudiar el comportamiento del motor asíncrono trifásico en vacío y carga. Para ello conectaremos un motor trifásico a la red, tomando medidas de tensión, corriente, potencia y número de revoluciones del rotor mediante una tacodinamo. Una vez tomadas las medidas correspondientes se acoplará al eje del motor un freno de polvo magnético con posibilidad de medida del par motor. Ahora se someterá al motor a diferentes pares de frenado para estudiar su comportamiento en carga. Toma las lecturas de todos los aparatos de medida para cada uno de los pares de frenado aplicados y con ellas: calcula el deslizamiento, el factor de potencia y traza una curva donde se represente el deslizamiento en función del par motor y otra donde se represente el par motor en función de la corriente.

20.7. Regulación de velocidad de un motor asíncrono trifásico. Consigue un equipo para la regulación de velocidad de motores trifásicos de C.A. mediante variación de la frecuencia de alimentación. Estudia el comportamiento de un motor asíncrono trifásico cuando se lo somete a diferentes frecuencias. Mide la frecuencia y velocidad del motor en diferentes puntos de funcionamiento y establece una relación entre dichas magnitudes.

20.8. Arranque de un motor monofásico de inducción. Consigue un motor monofásico de inducción y conecta únicamente el bobinado principal a la red. Empuja el eje con la mano y consigue que el motor arranque en uno u otro sentido. A continuación conecta el bobinado auxiliar en paralelo con el principal. ¿Has conseguido que el motor arranque por sí solo? Si no es así, conecta un condensador en serie con el bobinado auxiliar y comprueba cómo arranca el motor. Invierte la conexión de una de las bobinas y comprueba cómo se invierte el sentido de giro del motor.

Al finalizar cada una de estas actividades deberás elaborar un informe-memoria sobre la actividad desarrollada, indicando los resultados obtenidos y estructurándolos en los apartados necesarios para una adecuada documentación de las mismas (descripción del proceso seguido, medios utilizados, esquemas y planos utilizados, cálculos, medidas, etc.).

© Ediciones Paraninfo

Actividades de comprobación

20.1. La frecuencia de la C.A. que proporciona un alternador depende:

a) Exclusivamente de la velocidad del rotor.

b) De la velocidad del rotor y del número de polos del circuito inductor.

c) Del número de polos y de la corriente de excitación.

20.2. Un alternador conectado a la red eléctrica:

a) Debe funcionar a una velocidad constante.

b) Modifica el número de revoluciones por minuto según la potencia que se desea entregar a la red.

c) Entrega más potencia reactiva al aumentar la corriente de excitación.

20.3. Averigua la frecuencia que proporciona un alternador de un par de polos si gira a una velocidad de 3.600 r. p. m.

20.4. ¿Cuántos pares de polos deberá poseer un alternador que gira a 450 r. p. m. para producir una frecuencia de 60 Hz?

20.5. Se desea producir una frecuencia de 60 Hz con un alternador de 3 pares de polos. Averigua la velocidad a que debe girar.

20.6. La velocidad de un motor asíncrono trifásico:

a) Permanece constante con la frecuencia.

b) Es siempre algo inferior a la velocidad del campo giratorio.

c) Depende exclusivamente de la frecuencia y del número de polos del devanado estatórico.

20.7. ¿Cómo habrá que conectar un motor de 133/230 V a una red de 230 V?

a) En estrella.

b) En triángulo.

20.8. ¿Cómo se consigue invertir el sentido de giro de un motor asíncrono trifásico de rotor en cortocircuito?

a) Invirtiendo la polaridad del devanado rotórico.

b) Invirtiendo tres de las fases del devanado estatórico.

c) Invirtiendo dos de las fases del devanado estatórico.

20.9. ¿De qué tensiones tendrá que ser un motor para poder ser arrancado en Y-Δ en una red de 400 V?

a) De 400 V.

b) De 230/400 V.

c) De 400/693 V.

20.10. ¿Qué número de pares de polos debe poseer el devanado estatórico de un motor asíncrono trifásico de inducción para conseguir una velocidad síncrona de 750 r. p. m. a 50 Hz?

20.11. Averigua la velocidad síncrona de este motor para una frecuencia de 60 Hz.

20.12. ¿Cuál será el deslizamiento de un motor asíncrono trifásico de rotor en cortocircuito de dos pares de polos a 50 Hz y a plena carga, si se mide con un tacómetro una velocidad de 1.425 r. p. m.?

20.13. Un motor asíncrono trifásico posee las siguientes características: potencia activa = 6 kW; 230 V; 60 Hz; cos φ = 0,89; η = 91 %; pares de polos del devanado estatórico = 3; deslizamiento a plena carga = 2 %. Calcula el par de rotación del rotor.

20.14. Se dispone de un motor asíncrono trifásico de rotor en cortocircuito de 4 kW correspondiente a la gama comercial de la Tabla 20.1. Averigua:

a) El deslizamiento.

b) La intensidad nominal.

c) La intensidad en el arranque.

d) Par nominal, par de arranque y par máximo.

20.15. Indica cuál de estos motores consigue mantener la velocidad constante para diferentes regímenes de carga:

a) Motor síncrono.

b) Motor universal.

c) Motor asíncrono.

20.16. Indica cuál de estos motores consigue una más fácil posibilidad de regulación de velocidad:

a) Motor universal.

b) Motor asíncrono monofásico de fase partida.

c) Motor asíncrono trifásico como monofásico.

© Ediciones Paraninfo

20.17. Indica cuál de estos motores posee colector de delgas y escobillas:

a) Motor paso a paso.

b) Motor universal.

c) Servomotor.

20.18. Indica cuál de estos motores posee el mejor par de arranque:

a) Motor síncrono trifásico.

b) Motor de fase partida con condensador.

c) Motor monofásico con espira de cortocircuito.

Actividades de evaluación resueltas

A continuación se dan los enunciados de una serie de actividades de evaluación. Estas actividades las podrás encontrar resueltas accediendo al MATERIAL WEB creado para este texto.

20.1. A una red trifásica de 380 V de tensión de línea se conecta un motor de inducción trifásico, en cuya placa de características figuran los siguientes datos: (380/660 V; f = 50 Hz; P = 50 kW; cos φ = 0,77; η = 80 %). Funcionando en condiciones normales, determina:

a) Tipo de conexión que hay que realizar en el motor. Justifica la respuesta.

b) Intensidad de corriente absorbida por el motor.

c) Potencia reactiva y capacidad de la batería de condensadores, conectados en estrella, que son necesarios para elevar el factor de potencia del motor a 0,9 (inductivo).

20.2. Se dispone de un motor asíncrono trifásico de 25 kW, 220/380 V, cos φ = 0,82 a plena carga, 4 polos y deslizamiento a plena carga del 4 %. Halla:

a) Conexión del motor si se conecta a una red trifásica de 220 V de línea y 50 Hz.

b) Corriente a plena carga absorbida de línea cuando la máquina se conecta a la red anterior sabiendo que el rendimiento del motor es del 85 %.

c) Par a plena carga en el eje del motor.

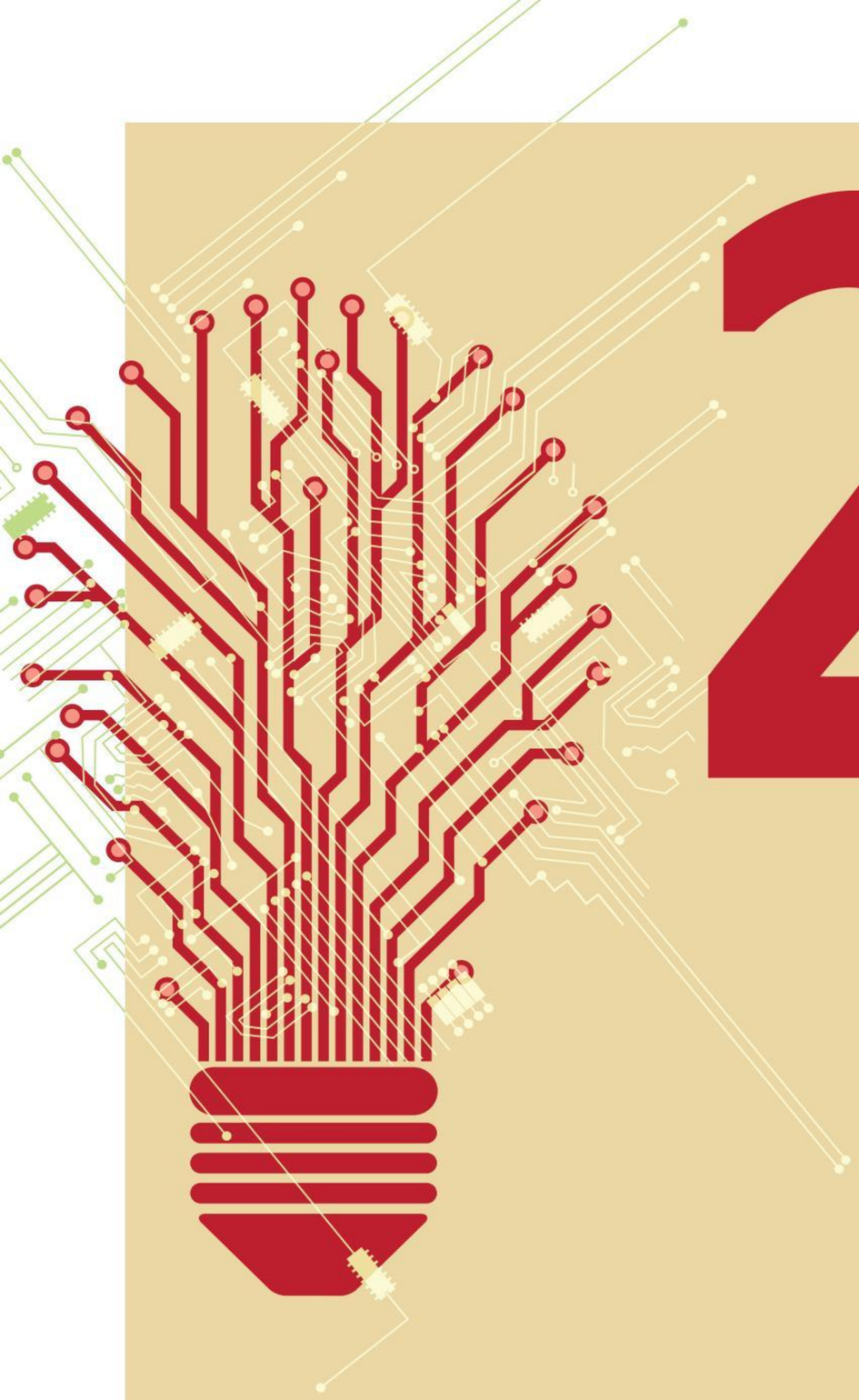
Actividades de ampliación

20.1. Con el fin de conseguir una mayor profundización en la materia, se han incluido los enunciados de una serie de ***«actividades de evaluación propuestas de ampliación (20)»*** para esta unidad que podrás encontrar dentro del MATERIAL WEB elaborado para este texto. Selecciona alguna de estas actividades y encuentra su solución.

20.2. Consigue en internet catálogos comerciales de todo tipo de motores y estudia sus características más relevantes.

20.3. Busca en internet información sobre los nuevos alternadores de inducción utilizados como generador eólico.

© Ediciones Paraninfo



21 Seguridad en las instalaciones electrotécnicas

Contenidos

- **21.1.** Riesgo eléctrico
- **21.2.** Efectos fisiológicos producidos por la corriente eléctrica
- **21.3.** Factores que influyen en el riesgo eléctrico
- **21.4.** Tipos de contactos eléctricos y sistemas de protección
- **21.5.** Riesgos de la electricidad sobre los materiales
- **21.6.** Normativa sobre seguridad
- **21.7.** Normas de seguridad para la realización de trabajos eléctricos
- **21.8.** Primeros auxilios en los accidentes eléctricos

El uso de la electricidad está cada vez más extendido en nuestro medio de vida, en la industria, en la vivienda, en el transporte, etc., de tal forma que es difícil pasar un solo día de nuestra vida sin que tengamos que recurrir a ella. Esto, por supuesto, nos aporta innumerables beneficios, sin olvidar que el uso de aparatos y sistemas eléctricos puede presentar un riesgo inminente de accidente eléctrico para las personas, animales y cosas y que, por tanto, es necesario tomar las medidas de seguridad adecuadas para evitarlos en todo momento.

Objetivos

- Identificar los riesgos de choque eléctrico en las personas y sus efectos fisiológicos, así como sus factores relacionados.
- Conocer los tipos de accidentes eléctricos.
- Identificar los sistemas de protección contra contactos directos e indirectos.
- Identificar las protecciones necesarias para una instalación contra sobreintensidades y sobretensiones.
- Interpretar las cinco reglas de oro para la realización de trabajos sin tensión.
- Manejar el REBT y la normativa de aplicación en materia de prevención de riesgos laborales.

21.1. Riesgo eléctrico

Cuando una persona se expone al contacto de la electricidad, se originan los accidentes eléctricos. En la mayoría de los casos, estos accidentes se producen por ignorancia, falta de prevención, imprudencia, exceso de confianza, reducidos conocimientos de la Electrotecnia, fallos técnicos y humanos, así como el incumplimiento de las normas básicas de *seguridad técnica y personal*.

La prevención de riesgos en las instalaciones eléctricas debe de ser máxima. La electricidad no se percibe. No se ve, pero ocasiona importantes daños en la salud de los trabajadores y las personas.

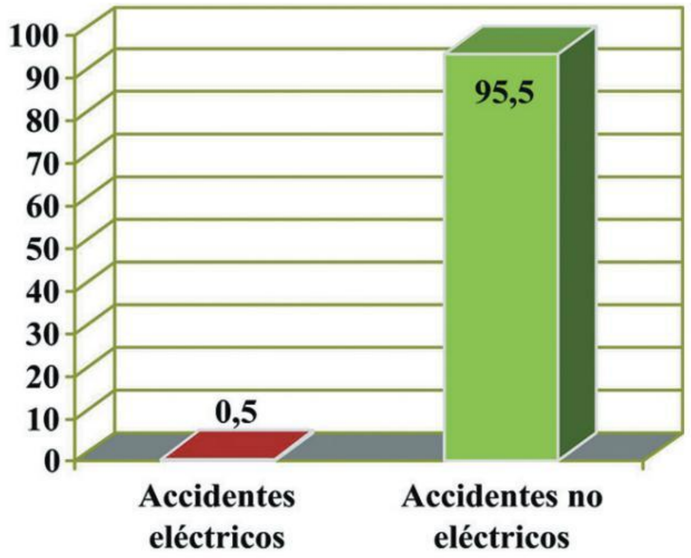


Figura 21.1. Estadística de accidentes.

Los accidentes eléctricos representan el 0,5 % del total de accidentes, pero este bajo porcentaje se corresponde con el 8 % de los accidentes mortales en los centros de trabajo, lo cual indica que se asocian a lesiones muy graves.

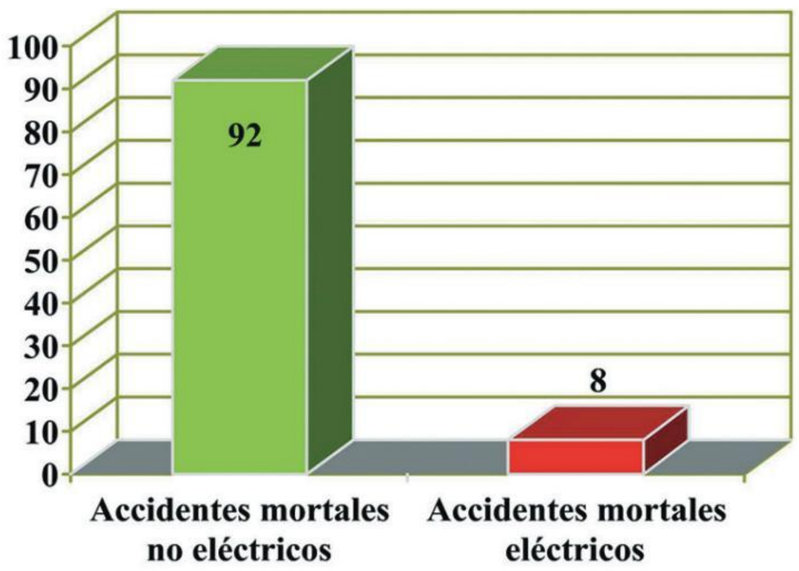


Figura 21.2. Accidentes eléctricos.

Los riesgos que origina el uso de la energía eléctrica son:

- Riesgo de electrocución por el paso de la corriente eléctrica por el cuerpo humano.
- Riesgo de incendio provocado por las instalaciones eléctricas al sufrir una sobrecarga o cortocircuito.

El riesgo de incendio se puede reducir realizando las instalaciones eléctricas según la legislación y normativa vigente, así como utilizando materiales eléctricos de calidad que sean homologados por organismos oficiales. Por supuesto, estos materiales habrá que seleccionarlos y dimensionarlos en función de las características propias de cada instalación. Además, los usuarios de las instalaciones deberán hacer un uso adecuado de las mismas según el fin al que han sido destinadas, debiendo respetar las normas de seguridad básicas que hagan que su uso sea fiable y seguro.

El riesgo de electrocución es la posibilidad de que la corriente eléctrica fluya a través del cuerpo humano. Para que esto ocurra es necesario que el cuerpo humano sea conductor, que forme parte del circuito y que exista una tensión entre dos puntos de contacto.

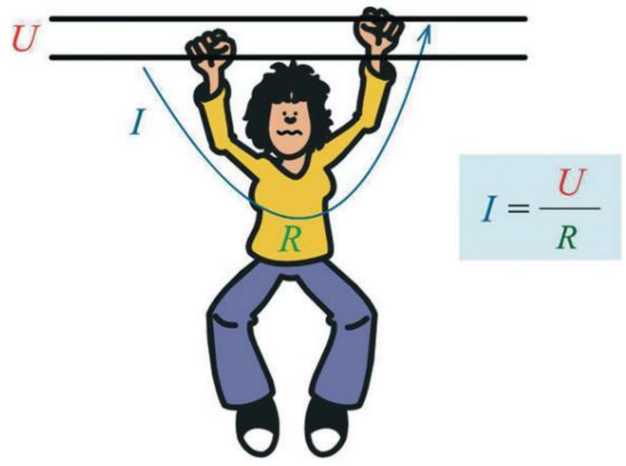


Figura 21.3. La intensidad de corriente que atraviesa el cuerpo humano depende de la ley de Ohm.

Cuanto mayor sea la intensidad de corriente eléctrica que recorra el cuerpo humano mayor será la posibilidad de sufrir daños, que pueden ser graves e incluso llegar a provocar la muerte.

Según la ley de Ohm, esta intensidad de corriente irá en aumento cuanto mayor sea la tensión de contacto del accidentado y cuanto menor sea la resistencia del cuerpo del mismo. De aquí se deduce que cuando se aumenta la tensión de contacto aumenta el riesgo de sufrir un accidente eléctrico; además la resistencia del cuerpo humano se reduce drásticamente en condiciones de humedad, lo que hace que aumente también en estos casos dichos riesgos.

21.2. Efectos fisiológicos producidos por la corriente eléctrica

En la norma UNE 20572 se definen los efectos fisiológicos de la corriente eléctrica por el cuerpo humano. En la Tabla 21.1 se definen los mismos en función de la intensidad de la corriente y del tiempo de contacto con la misma para una corriente alterna de 50 Hz.

En la Figura 21.4 se puede observar cómo aumenta la gravedad de los efectos que produce el paso de la corriente eléctrica según aumenta la intensidad de la misma.

© Ediciones Paraninfo

Tabla 21.1. Efectos fisiológicos a 50 Hz

Intensidad	Efectos fisiológicos en el cuerpo
1-3 mA	Percepción de picor. Umbral de percepción.
5-8 mA	Movimientos bruscos si se produce un contacto prolongado.
8-25 mA	Contracciones musculares y tetanización de los músculos de la mano y brazo.
25-30 mA	Tetanización del músculo del pecho (paso de la corriente por el corazón), en contactos prolongados (más de 2 minutos), que pueden provocar asfixia.
30-50 mA	Fibrilación ventricular, consecuencia del paso de corriente por la región cardiaca. Muerte si no se facilita atención adecuada en pocos minutos.
2-3 A	Parada respiratoria. Inconsciencia.
3 A o más	Quemaduras graves. Muerte.

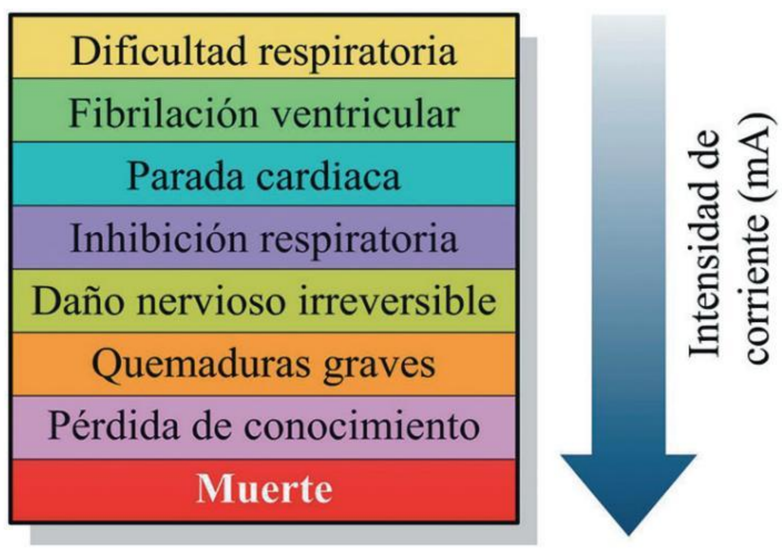


Figura 21.4. El aumento de la intensidad de corriente por el cuerpo humano aumenta la posibilidad de sufrir daños cada vez más graves.

- **Umbral de percepción:** es el valor mínimo de la intensidad de corriente que al paso por el cuerpo humano produce una sensación de cosquilleo no dolorosa y que se sitúa en 0,5 mA, cualquiera que sea la duración del contacto.

- **Corriente máxima de control muscular:** al aumentar el paso de la corriente eléctrica por el organismo, esta interfiere en el sistema nervioso y tiende a provocar contracciones involuntarias de los músculos (tetanización). Cuando esta corriente se sitúa cerca de los 10 mA la persona accidentada todavía tiene el suficiente control muscular para poder soltarse de la fuente del contacto eléctrico.

- **Umbral de no soltar (tetanización):** para corrientes por encima de los 10 mA y hasta los 25 mA, la contracción involuntaria de los músculos se hace muy violenta y la persona se siente incapaz de soltarse de los conductores de contacto, a no ser que se corte la corriente eléctrica. El choque eléctrico recibido es muy doloroso, y puede ir acompañado de dificultades en la respiración y alteraciones en el ritmo cardiaco.

- **Fibrilación ventricular:** esta se puede producir para tiempos largos de exposición al contacto eléctrico y a partir de unos 25 mA de intensidad de corriente. La fibrilación ventricular consiste en una acción involuntaria de las fibras musculares, cuando son recorridas por la corriente eléctrica, y que altera el funcionamiento del corazón. Las consecuencias de la misma pueden ser muy graves, pudiendo llegar a producirse el paro cardiaco del accidentado con el consiguiente riesgo de muerte.

- **Paro respiratorio. Asfixia:** se da en torno a los 25 o 30 mA. Si la corriente eléctrica recorre la cabeza a través del centro nervioso se puede producir un paro respiratorio. En el caso de que la corriente atraviese el tórax se puede producir la contracción involuntaria de los músculos del diafragma, alterándose el ritmo respiratorio y pudiendo llegar a la asfixia, con el consiguiente riesgo de muerte.

- **Quemaduras:** si el paso de la corriente por el organismo es lo suficientemente intenso y se mantiene en el tiempo de forma considerable, se produce una elevación de temperatura por efecto Joule en la piel y en los músculos que da lugar a quemaduras y que incluso puede llegar a la carbonización de los tejidos. Por otro lado, cuando el accidentado se expone a los efectos de un arco eléctrico de alta temperatura (hasta 4.000 ºC), se pueden llegar a producir quemaduras externas (piel, ojos, etc.).

21.3. Factores que influyen en el riesgo eléctrico

Además de los valores de la intensidad de corriente y del tiempo de duración del contacto eléctrico, otros factores que influyen en el riesgo eléctrico y que habrá que tener en cuenta para poner las medidas de prevención necesarias que eviten los accidentes eléctricos, son:

- Intensidad de la corriente.
- Tiempo de duración del contacto.
- Recorrido o trayectoria de la corriente a través del cuerpo.
- Impedancia o resistencia del cuerpo humano.
- Tensión de contacto.
- Tipo de corriente y frecuencia.

© Ediciones Paraninfo

21.3.1. Intensidad de la corriente y tiempo de duración del contacto

En la Figura 21.5 se muestran los efectos fisiológicos que produce el paso de una corriente eléctrica, en función de su intensidad y de la duración del contacto, para una corriente alterna comprendida entre 15 y 100 Hz y según se expone en la norma UNE 20572.

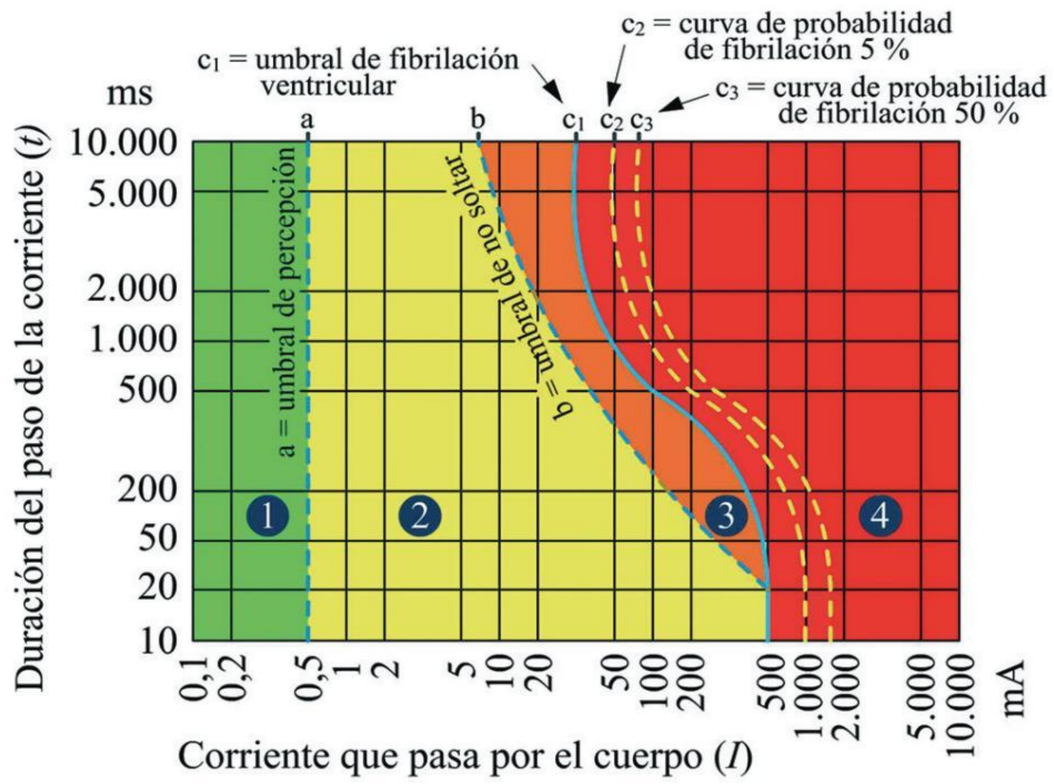


Figura 21.5. Efectos fisiológicos que produce una corriente alterna de 15 a 100 Hz en función del tiempo.

En la Tabla 21.2 se explican los efectos fisiológicos para cada una de las zonas que aparecen en la Figura 21.5.

Tabla 21.2. Zonas de riesgo para las curvas de la Figura 21.5

Zonas	Efectos fisiológicos
Zona 1	Curva a. No se produce ninguna reacción del organismo. Sin peligro.
Zona 2	Curva b. Se perciben los efectos de la corriente eléctrica pero sin que la persona sufra peligro alguno.
Zona 3	Curva c_1. Probabilidad de contracciones musculares involuntarias y dificultad respiratoria. Alteraciones en el funcionamiento del corazón de tipo reversible. El riesgo es mayor, aunque habitualmente no se produce ningún daño orgánico.
Zona 4	Curvas c_2 y c_3. Alta probabilidad de fibrilación ventricular, parada cardiaca, parada respiratoria, asfixia y quemaduras graves, aumentando su gravedad con la intensidad y el tiempo.

21.3.2. Recorrido o trayectoria de la corriente a través del cuerpo

Los efectos del contacto eléctrico dependerán de los órganos del cuerpo humano que atraviese la corriente. Las trayectorias más peligrosas son las que recorren el corazón, la cabeza y los pulmones, y las mayores lesiones se producen cuando la corriente circula en las siguientes direcciones (Figura 21.6):

- Mano izquierda – pie derecho.
- Mano derecha – pie izquierdo.
- Manos – cabeza.
- Mano derecha – tórax (corazón) – mano izquierda.
- Pie derecho – pie izquierdo.

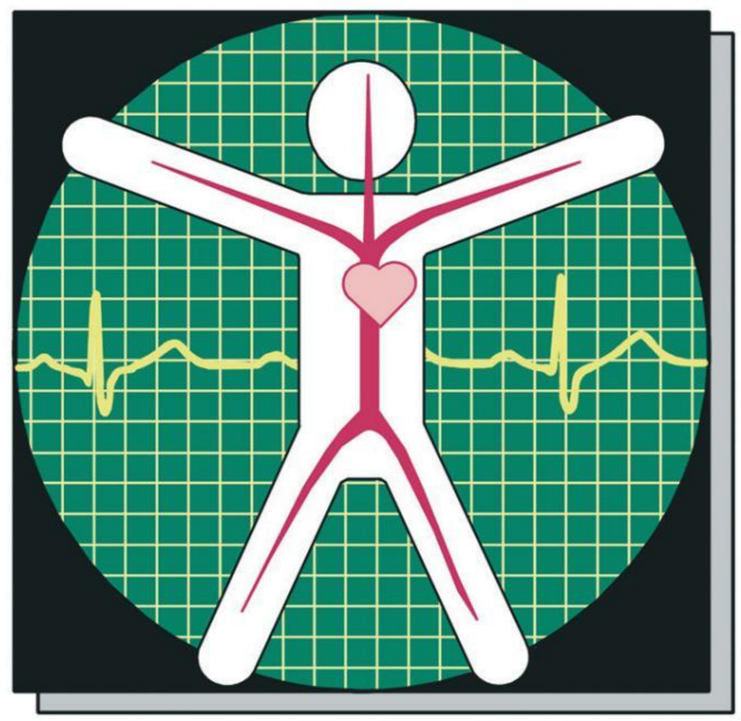


Figura 21.6. Trayectorias de la corriente eléctrica por el cuerpo humano.

21.3.3. Impedancia o resistencia del cuerpo humano

Cuanto más baja sea la impedancia eléctrica que ofrece el organismo frente a la exposición de una tensión eléctrica de contacto, mayor será la corriente eléctrica que recorra el cuerpo humano, con el consiguiente aumento del riesgo de sufrir una fuerte electrocución.

Dependiendo de la trayectoria que recorra la corriente por el cuerpo humano (piel, músculos, sangre, articulaciones, etc.), así será la impedancia que ofrecerá el cuerpo humano, siendo esta de carácter resistivo y capacitivo (debido sobre todo a la piel).

Además, la resistencia eléctrica de la piel que entra en contacto con un electrodo es variable de una persona a otra, bajando considerablemente en condiciones de humedad (sudoración, locales húmedos o mojados) y aumentando al disminuir la superficie de contacto.

El Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión establece 2.500 Ω como valor nominal de la resistencia del cuerpo humano en condiciones normales de humedad.

Por otro lado, la norma CEI 479 nos indica que los valores de la resistencia del cuerpo humano en función del

© Ediciones Paraninfo

grado de humedad de la piel y para una tensión de 250 V son los que se muestran en la Tabla 21.3.

Tabla 21.3. Resistencia del cuerpo humano para 250 V

Estado de la piel	Resistencia
Piel seca	1.500 Ω
Piel húmeda	1.000 Ω
Piel mojada	650 Ω
Piel sumergida	325 Ω

En la Tabla 21.4 se exponen los valores de la resistencia del cuerpo humano en función de la tensión de contacto (alterna) y según establece la norma UNE 20572.

Tabla 21.4. Impedancia del cuerpo humano

Tensión de contacto (V)	Valores de impedancia en (Ω) del cuerpo humano que no son sobrepasados por el siguiente porcentaje de población		
	5 %	50 %	95 %
25	1.750	3.250	6.100
50	1.450	2.625	4.375
75	1.250	2.200	3.500
100	1.200	1.875	3.200
125	1.125	1.625	2.875
220	1.000	1.350	2.125
700	750	1.100	1.550
1.000	700	1.050	1.500

21.3.4. Tensión de contacto

Para una determinada resistencia del cuerpo humano en el momento del contacto eléctrico, el valor de la intensidad que recorre el cuerpo del accidentado aumentará con la tensión, de lo que se deduce que cuanto mayor sea la tensión de contacto mayor será el peligro de la electricidad.

El REBT tiene en cuenta el peligro que suponen las instalaciones eléctricas en ciertos locales donde el riesgo de electrocución es mayor. Así, por ejemplo, en la instrucción ITC-BT 36 se tienen en cuenta tres tipos de instalaciones a muy baja tensión:

- Muy Baja Tensión de Seguridad (MBTS).
- Muy Baja Tensión de Protección (MBTP).
- Muy Baja Tensión Funcional (MBTF).

Para los tres casos, el REBT establece una tensión nominal que no exceda de 50 V en C.A. y 75 V en C.C. Por otro lado, el REBT fija tensiones de trabajo inferiores para locales especiales, como 12 V para piscinas y 24 V para locales conductores (húmedos o mojados).

21.3.5. Tipo de corriente y frecuencia

El tipo de corriente que resulta más peligroso es la corriente alterna de 50/60 Hz, siendo la corriente continua mucho menos peligrosa para valores de intensidad de corriente y tiempo de exposición al contacto iguales.

Para frecuencias altas los efectos sobre el organismo disminuyen, ya que la impedancia del cuerpo aumenta con la frecuencia, sobre todo la de los órganos internos, tendiendo la corriente a fluir por la piel. A partir de unos 10.000 Hz la piel se calienta por efecto Joule sin llegar a afectar a los órganos internos.

Aunque la corriente continua no sea tan peligrosa como la alterna, si el tiempo de contacto es grande se pueden producir fenómenos de electrólisis en la sangre y en los fluidos corporales, con el consiguiente riesgo de sufrir una embolia gaseosa.

Actividad resuelta 21.1

Determina los efectos que producirá el contacto de una tensión eléctrica alterna de 50 Hz en los casos mostrados en la Tabla 21.5 para un 95 % de la población y para un determinado tiempo de duración del contacto.

Tabla 21.5.

Caso	Tensión (V)	Tiempo (ms)
1	25	5.000
2	50	2.000
3	220	500
4	1.000	300

Para calcular los valores de la impedancia del cuerpo humano se ha tenido en cuenta la Tabla 21.4 y la Figura 21.5.

Solución:

$$\text{Caso 1: } I = \frac{U}{R} = \frac{25}{6.100} = 0{,}004 \text{ A} = 4 \text{ mA}$$

$$\text{Caso 2: } I = \frac{U}{R} = \frac{50}{4.375} = 0{,}011 \text{ A} = 11 \text{ mA}$$

© Ediciones Paraninfo

$$\text{Caso 3: } I = \frac{U}{R} = \frac{220}{2.125} = 0{,}104 \text{ A} = 104 \text{ mA}$$

$$\text{Caso 4: } I = \frac{U}{R} = \frac{1.000}{1.500} = 0{,}667 \text{ A} = 667 \text{ mA}$$

Consultando los efectos fisiológicos causados por estas corrientes según la Figura 21.5 se han sacado las siguientes conclusiones:

- Caso 1 (4 mA/5.000 ms): zona 2, ligero cosquilleo, no se produce ningún peligro.
- Caso 2 (11 mA/2.000 ms): zona 2, ligera contracción involuntaria de los músculos, no se produce ningún peligro.
- Caso 3 (104 mA/500 ms): zona 3, probabilidad de contracciones musculares involuntarias y dificultad respiratoria. Riesgo de fibrilación ventricular.
- Caso 4 (667 mA/300 ms): zona 4, alta probabilidad de fibrilación ventricular, parada cardiaca, parada respiratoria, asfixia y quemaduras graves.

21.4. Tipos de contactos eléctricos y sistemas de protección

Los accidentes eléctricos se producen cuando una persona se pone en contacto de forma imprevista con elementos que están sometidos a una cierta tensión eléctrica. Estos contactos se pueden producir de dos formas:

- Contacto eléctrico directo.
- Contacto eléctrico indirecto.

21.4.1. Contacto eléctrico directo

El contacto eléctrico se produce cuando la persona toca directamente dos partes activas (con tensión) de una instalación.

El contacto directo se puede producir de tres formas diferentes:

- Contacto directo con dos conductores activos de una línea eléctrica.
- Contacto directo con un conductor activo de línea y masa o tierra.
- Contacto directo por descarga disruptiva.

Contacto directo con dos conductores activos de una línea eléctrica

En este caso el contacto se produce cuando una persona toca con una mano una fase de la línea y con la otra mano otra fase distinta o el neutro (Figura 21.7). Para redes de distribución de baja tensión en C.A., esta tensión será de 230 V si el contacto se produce entre fase y neutro, y de 400 V si el contacto es entre fases.

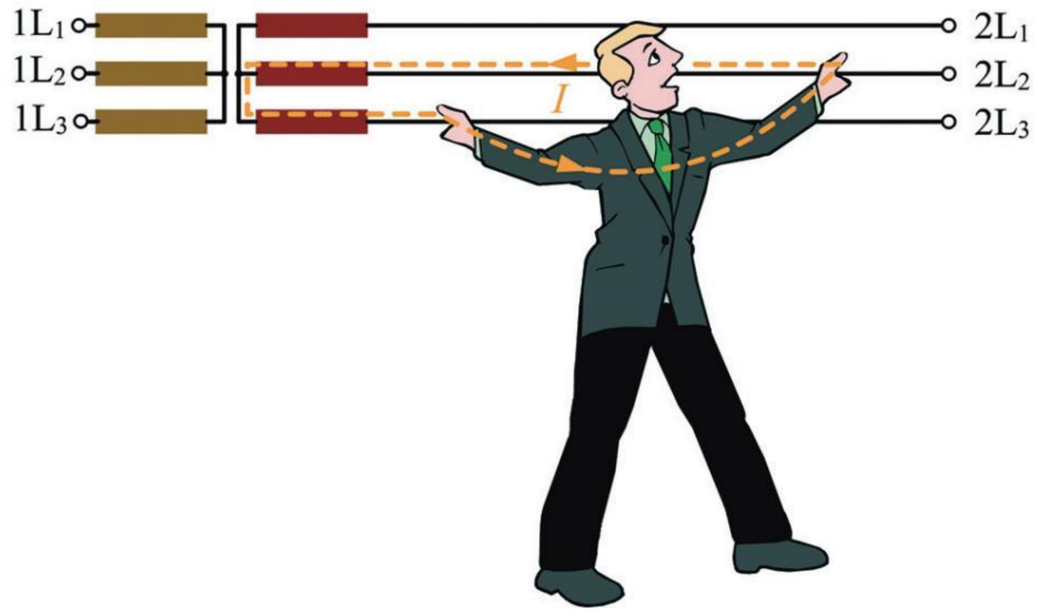


Figura 21.7. Contacto directo con dos conductores activos (dos fases).

En este tipo de accidente eléctrico, la trayectoria que sigue la corriente por el organismo atraviesa el tórax, lo que unido a las tensiones elevadas de contacto puede llevar al accidentado a la muerte.

Contacto directo con un conductor activo de línea y masa o tierra.

Se produce cuando una persona toca una fase con la mano y los pies tocan tierra, siempre y cuando el neutro del sistema de distribución esté puesto a tierra, como suele ser habitual (Figura 21.8).

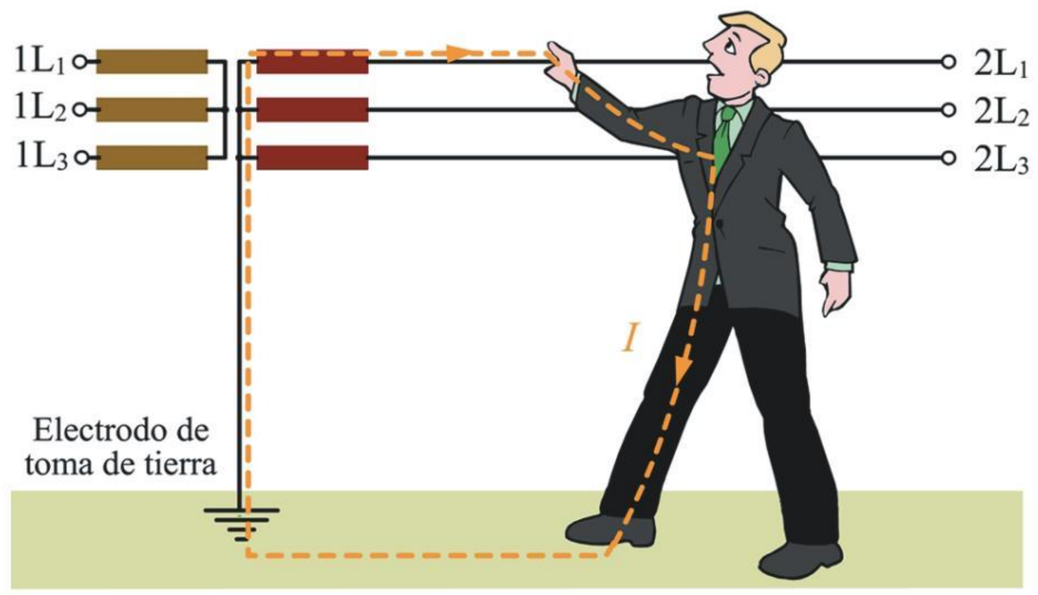


Figura 21.8. Contacto directo entre una fase y tierra.

En este caso el circuito se cierra entre la mano que toca la fase y los pies que tocan tierra hasta el neutro del transformador de distribución que está puesto a tierra. La tensión de contacto dependerá de la resistencia del calzado y de la del suelo conductor, siendo casi siempre inferior a los 230 V, por lo que el riesgo es algo inferior al del contacto con dos conductores activos. La trayectoria de la corriente resulta peligrosa ya que puede producir un paro cardiaco.

© Ediciones Paraninfo

Contacto directo por descarga disruptiva

Este accidente se suele dar en redes en las que la tensión es lo suficientemente elevada para que se produzca un arco eléctrico entre la línea y la persona. En este caso la electrocución se produce antes de que se entre en contacto con la línea eléctrica y cuando la distancia entre la persona u objeto conductor se reduce hasta que el nivel de aislamiento del aire no sea suficiente para evitar que salte el arco eléctrico (Figura 21.9).

21.4.2. Sistemas de protección para evitar los contactos directos

Los accidentes por contactos directos presentan una frecuencia menor que los indirectos pero, sin embargo, suelen tener consecuencias más graves.

El 75 % de los accidentes mortales son debidos a contactos directos.

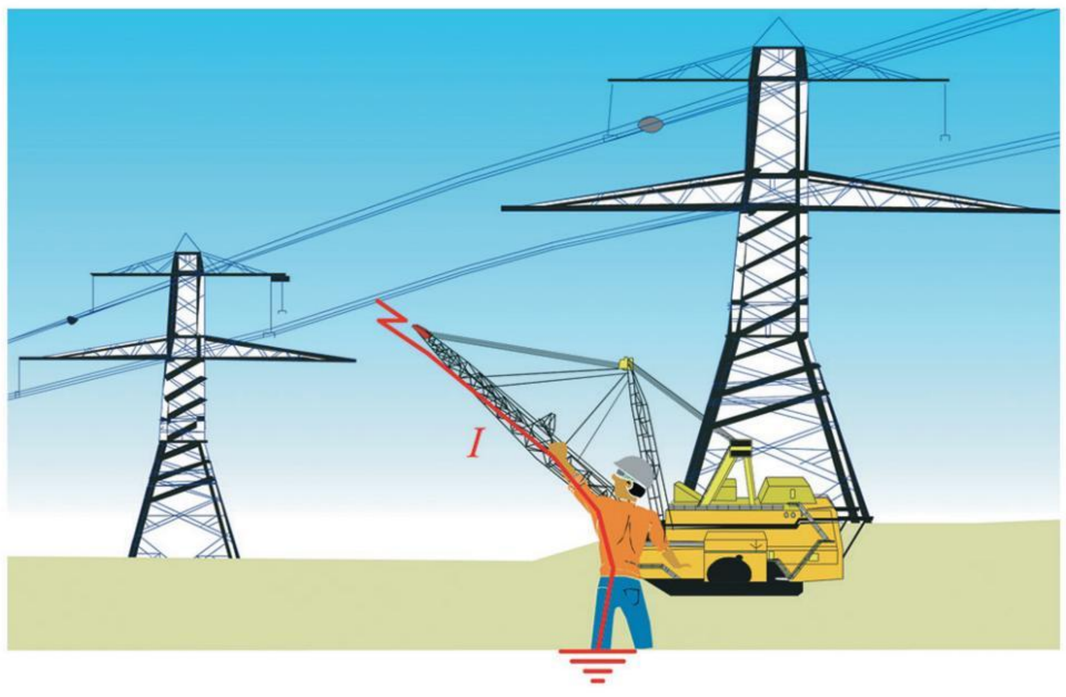


Figura 21.9. Contacto directo por descarga disruptiva.

Los contactos directos con la corriente eléctrica se pueden producir por:

- Realizar trabajos con tensión y sin tener en cuenta las protecciones adecuadas.
- No prestar la atención suficiente en el trabajo que se realiza y no tener en cuenta las normas de seguridad establecidas.
- Aislamiento insuficiente de los conductores de línea y de los receptores.
- Utilizar tensiones más altas a las prescritas en la normativa vigente.
- Sistemas de protección inadecuados en las instalaciones eléctricas.

El REBT en la instrucción ITC-BT 24 nos indica que los medios a utilizar para evitar los contactos directos vienen expuestos y definidos en la Norma UNE 20460-4-41, que son habitualmente:

- Protección por aislamiento de las partes activas.
- Protección por medio de barreras o envolventes.
- Protección por medio de obstáculos.
- Protección por puesta fuera de alcance por alejamiento.
- Protección complementaria por dispositivos de corriente diferencial residual.

Protección por aislamiento de las partes activas

Las partes activas deberán estar recubiertas de un aislamiento que no pueda ser eliminado más que destruyéndolo. Las pinturas, barnices, lacas y productos similares no se considera que constituyan un aislamiento suficiente en el marco de la protección contra los contactos directos.

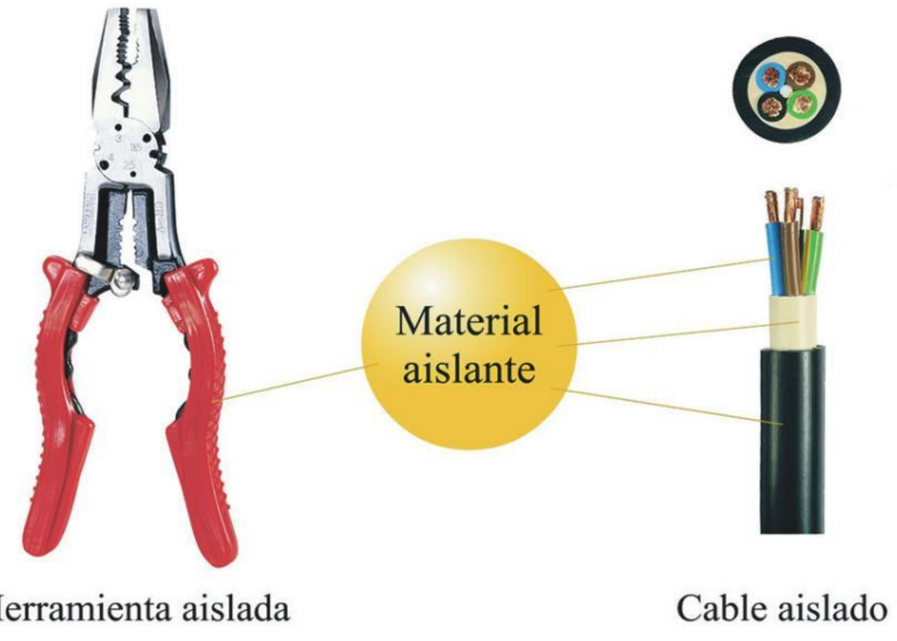


Figura 21.10. Aislamiento de las partes activas.

Este tipo de protección es el que se utiliza cuando se aísla los conductores eléctricos con materiales adecuados o se recubre de material aislante las herramientas de trabajo. El material aislante evita que se pueda tocar directamente las partes de la instalación que están bajo tensión.

Protección por medio de barreras o envolventes

Las partes activas deben estar situadas en el interior de las envolventes o detrás de barreras que posean, como mínimo, el grado de protección IP XXB, según UNE 20324.

Este tipo de protección es el que se utiliza en las cajas de interruptores, tomas de corriente, cajas de derivación, armarios con automatismos, carcasas de motores, etcétera.

En el MATERIAL WEB que se ha elaborado para este texto se ha incluido un documento con el nombre «Grados IP-IK» donde se recoge el significado y la explicación de los códigos IP, IK.

© Ediciones Paraninfo

Las superficies superiores de las barreras o envolventes horizontales que son fácilmente accesibles deben responder como mínimo al grado de protección IP4X o IP XXD.

Las barreras o envolventes deben fijarse de manera segura y ser de una robustez y durabilidad suficientes para mantener los grados de protección exigidos, con una separación suficiente de las partes activas en las condiciones normales de servicio, teniendo en cuenta las influencias externas.

Cuando sea necesario suprimir las barreras, abrir las envolventes o quitar partes de estas, esto no debe ser posible más que:

- Con la ayuda de una llave o de una herramienta.
- Después de quitar la tensión de las partes activas protegidas por estas barreras o estas envolventes, no pudiendo ser restablecida la tensión hasta después de volver a colocar las barreras o las envolventes.
- Si hay interpuesta una segunda barrera que posee como mínimo el grado de protección IP2X o IP XXB, que no pueda ser quitada más que con la ayuda de una llave o de una herramienta y que impida todo contacto con las partes activas.

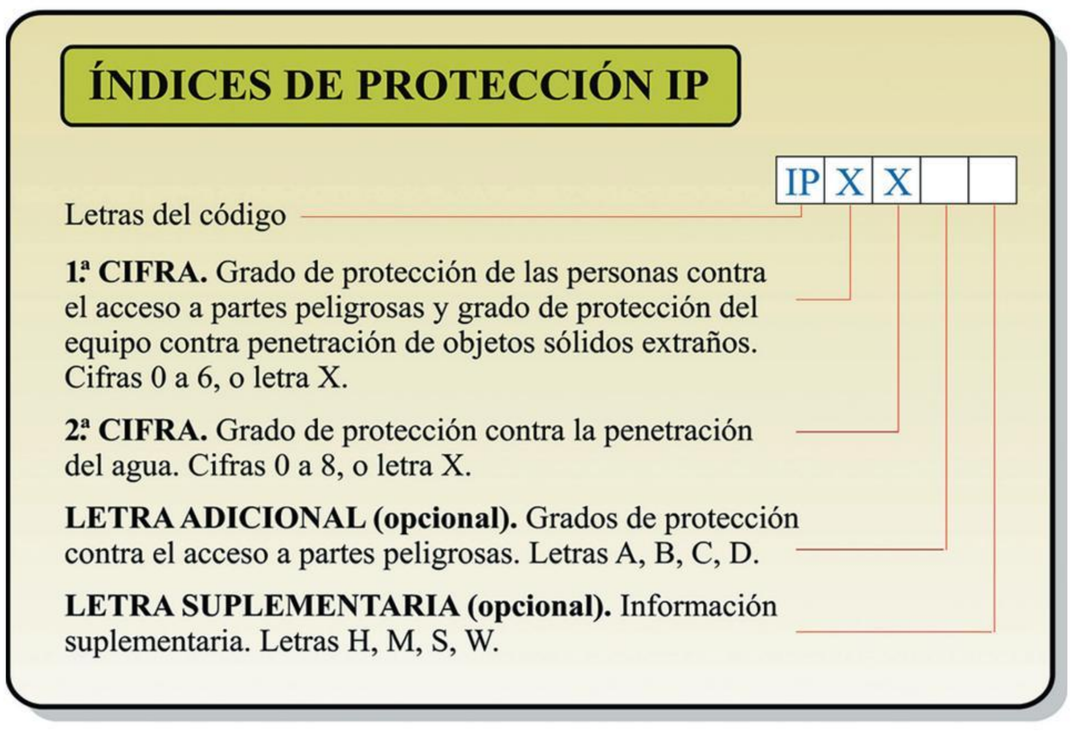


Figura 21.11. Grados de protección IP.

Protección por medio de obstáculos

Esta medida no garantiza una protección completa y su aplicación se limita, en la práctica, a los locales de servicio eléctrico solo accesibles al personal autorizado.

Los obstáculos están destinados a impedir los contactos fortuitos con las partes activas y deben impedir:

- Un acercamiento físico no intencionado a las partes activas.
- Los contactos no intencionados con las partes activas en el caso de intervenciones en equipos bajo tensión durante el servicio.

Los obstáculos pueden ser desmontables sin la ayuda de una herramienta o de una llave; no obstante, deben estar fijados de manera que se impida todo desmontaje involuntario.

Protección por puesta fuera de alcance por alejamiento

Esta medida no garantiza una protección completa y su aplicación se limita, en la práctica, a los locales de servicio eléctrico solo accesibles al personal autorizado.

La puesta fuera de alcance por alejamiento está destinada solamente a impedir los contactos fortuitos con las partes activas.

Las partes accesibles simultáneamente, que se encuentran a tensiones diferentes, no deben encontrarse dentro del volumen de accesibilidad.

El volumen de accesibilidad de las personas se define como el situado alrededor de los emplazamientos en los que pueden permanecer o circular personas, y cuyos límites no pueden ser alcanzados por una mano sin medios auxiliares. Por convenio, este volumen está limitado conforme a la Figura 21.12, entendiendo que la altura que limita el volumen es de 2,5 m.

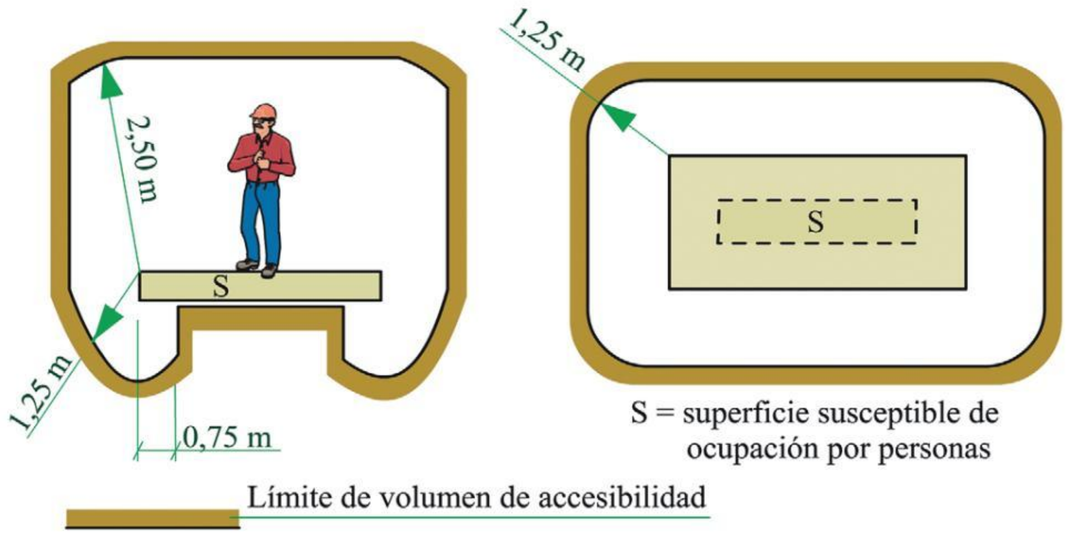


Figura 21.12. Volumen de accesibilidad de las partes activas de la instalación eléctrica.

Cuando el espacio en el que permanecen y circulan normalmente personas está limitado por un obstáculo (por ejemplo, listón de protección, barandillas, panel enrejado) que presenta un grado de protección inferior al IP2X o IP XXB, según UNE 20324, el volumen de accesibilidad comienza a partir de este obstáculo.

En los emplazamientos en que se manipulen corrientemente objetos conductores de gran longitud o voluminosos, las distancias prescritas anteriormente deben aumentarse teniendo en cuenta las dimensiones de estos objetos.

Protección complementaria por dispositivos de corriente diferencial residual

Esta medida de protección está destinada solamente a complementar otras medidas de protección contra los contactos directos.

© Ediciones Paraninfo

El empleo de dispositivos de corriente diferencial-residual, cuyo valor de corriente diferencial asignada de funcionamiento sea inferior o igual a 30 mA, se reconoce como medida de protección complementaria en caso de fallo de otra medida de protección contra los contactos directos o en caso de imprudencia de los usuarios.

La utilización de tales dispositivos no constituye por sí misma una medida de protección completa y requiere el empleo de una de las medidas de protección enunciadas en los apartados anteriores.

21.4.3. Contacto eléctrico indirecto

El contacto indirecto se produce cuando la persona entra en contacto con una masa que se ha puesto en tensión de forma accidental por un fallo de aislamiento de los conductores eléctricos.

Como ya es sabido, por medida de seguridad se suele conectar el neutro del transformador a tierra; de esta forma la tierra es como si fuese un conductor eléctrico más del sistema trifásico.

En estas condiciones, veamos qué ocurre cuando, por cualquier causa, falla un aislamiento (por ejemplo, un conductor que se queda sin su funda aislante) y un conductor eléctrico entra en contacto directo con una masa metálica accesible a las personas. Supongamos que dicha masa es el chasis de una máquina herramienta (Figura 21.13).

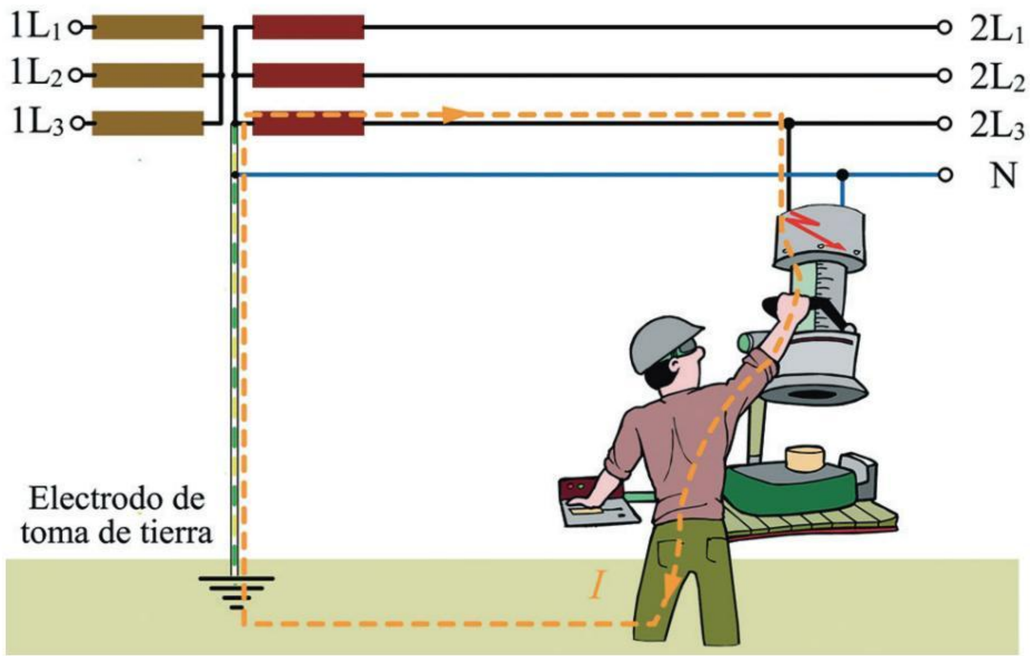


Figura 21.13. Contacto eléctrico indirecto.

Al ponerse en contacto un conductor activo con el chasis de la máquina herramienta, toda su masa queda sometida a una cierta tensión respecto al suelo (tierra). Si en estas condiciones una persona toca el chasis, someterá a su cuerpo a dicha tensión. Un punto de contacto será el de la mano con el chasis y el otro contacto se establecerá al tocar con los pies el suelo. Esto origina un paso de corriente eléctrica, a través del cuerpo humano, muy peligrosa, que puede llegar a ocasionar accidentes mortales.

¿Cómo se pueden eliminar los contactos indirectos?

Para evitar que la corriente atraviese el cuerpo de la persona, se conecta el chasis a tierra mediante el conductor de protección o de tierra (Figura 21.14).

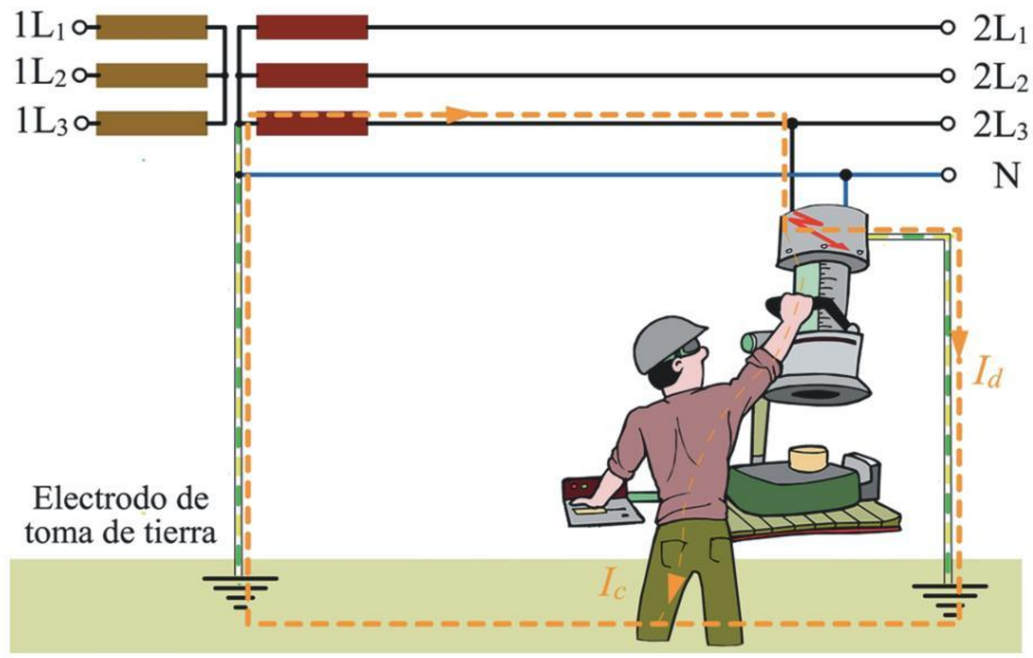


Figura 21.14. Protección contra los contactos indirectos mediante la puesta a tierra de las masas.

Al ser mucho menor la resistencia del conductor de protección que la del cuerpo humano, la corriente tiende a desviarse en su mayor parte por dicho conductor, lo que hace que *la tensión de contacto indirecto* quede reducida a valores menos peligrosos. De esta forma, quedan protegidas las personas de estos defectos de aislamiento.

Instalación de puesta a tierra

En el REBT en la instrucción ITC-BT 18 se define la puesta o conexión a tierra como la unión eléctrica directa, sin fusibles ni protección alguna, de una parte del circuito eléctrico o de una parte conductora no perteneciente al mismo mediante una toma de tierra con un electrodo o grupos de electrodos enterrados en el suelo.

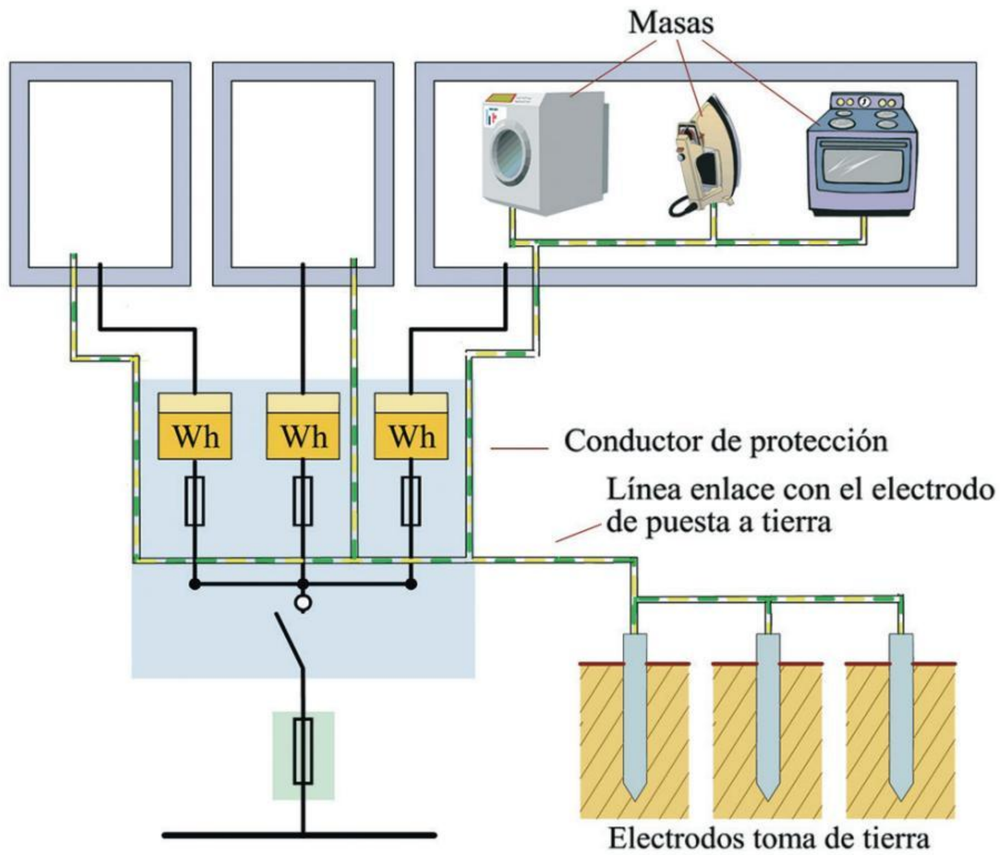


Figura 21.15. Circuito de puesta a tierra.

© Ediciones Paraninfo

En la Figura 21.15 se puede apreciar en qué consiste la instalación de puesta a tierra de un edificio de viviendas.

El conductor de protección une todas las masas metálicas de los aparatos eléctricos de forma directa o a través de las tomas de corriente con toma a tierra.

Para ampliar información sobre las puestas a tierra, consulta en el REBT la Instrucción Técnica ITC-BT 18 (Instalaciones de puesta a tierra).

Dispositivo de corte por intensidad de defecto. El interruptor diferencial

El interruptor diferencial es un dispositivo que interrumpe el circuito en el caso de que exista un fallo de aislamiento. Así, por ejemplo, en el caso que estudiamos de fallo de aislamiento de la máquina herramienta, de haber existido un interruptor diferencial, este hubiera detectado rápidamente el fallo, desconectando el circuito general. De esta forma se elimina el peligro de electrocución para las personas.

¿Cómo actúa el interruptor diferencial? (Figura 21.16).

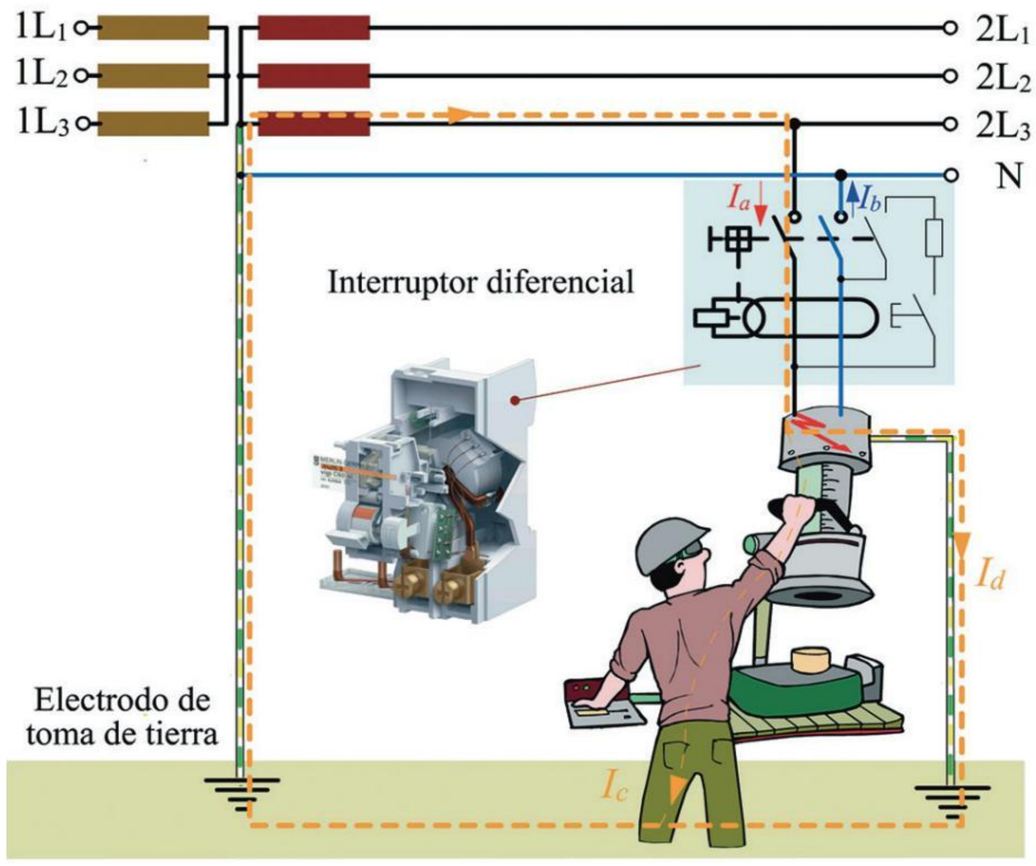


Figura 21.16. Protección a los contactos indirectos mediante interruptor diferencial.

En condiciones normales, la corriente que entra por uno de los conductores es igual a la que sale por el otro ($I_a = I_b$). Mientras se cumpla esta condición el interruptor diferencial permanecerá con sus contactos cerrados. Ahora bien, cuando aparece un defecto de aislamiento, existe una parte de la corriente eléctrica que se deriva por tierra (corriente de fuga o corriente de defecto), lo que hace que la intensidad de entrada sea diferente a la de salida ($I_a \neq I_b$). El interruptor diferencial está dotado de un sistema de detección que capta la diferencia: $I_{defecto} = I_a - I_b$ y produce la apertura de sus contactos. De esta forma, en el momento en que aparece una corriente de derivación, el interruptor desconecta el circuito, evitando los posibles peligros de la corriente de defecto.

¿Qué es la sensibilidad del interruptor diferencial?

Para que el interruptor diferencial se dispare, se necesita de una determinada intensidad de defecto. Así, por ejemplo, existen interruptores de alta sensibilidad que actúan para una intensidad de defecto de 30 mA (por debajo de 30 mA el interruptor permanecerá cerrado y por encima cortará la alimentación).

Los valores de la sensibilidad más utilizados son los siguientes:

- Alta sensibilidad ($I_d = 30$ mA).
- Media sensibilidad ($I_d = 300$ mA, 500 mA).
- Baja sensibilidad ($I_d = 1$ A, 2 A, 3 A).

En las viviendas se recomienda utilizar interruptores diferenciales de alta sensibilidad ($I_d = 30$ mA). ¿Por qué se hace esta recomendación?

En el caso de que una persona toque un conductor sin aislamiento (por ejemplo, un niño que mete los dedos en un enchufe), es decir, se ponga en contacto directo con una parte activa de la instalación mientras toca con los pies el suelo, inevitablemente, por su cuerpo atravesará una corriente eléctrica de fuga hacia tierra (Figura 21.17). Esta corriente puede llegar a ser muy peligrosa si el interruptor diferencial no corta la corriente de forma rápida.

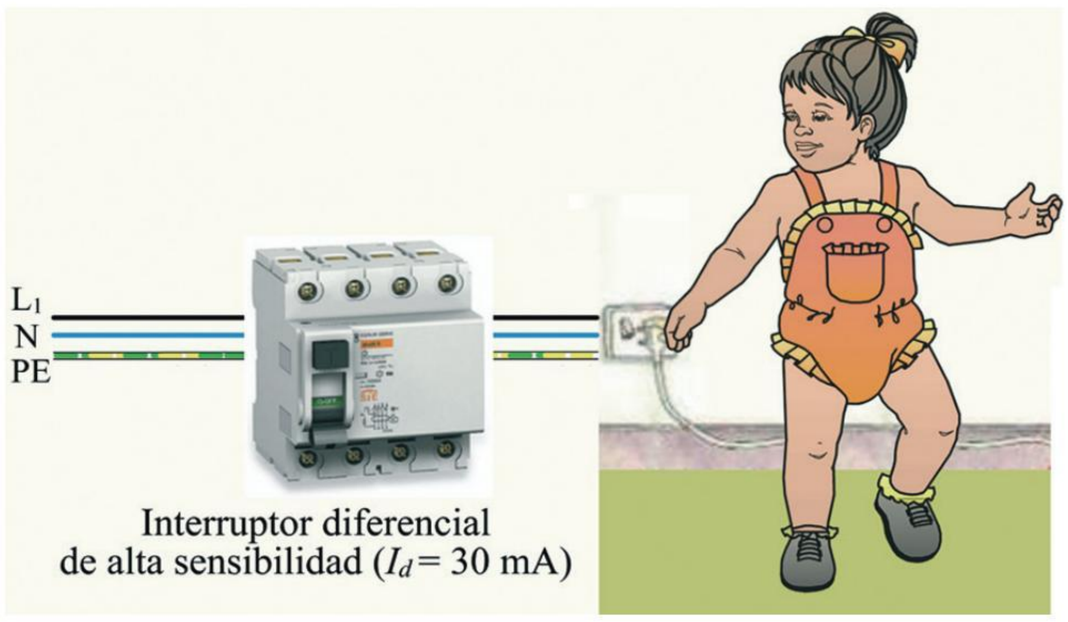


Figura 21.17. El interruptor diferencial de alta sensibilidad puede salvar la vida.

Para instalaciones de alumbrado la sensibilidad del interruptor diferencial será de 30 mA, mientras que para los circuitos de fuerza la sensibilidad se fijará entre 0,1 y 3 A.

21.4.4. Sistemas de protección contra contactos indirectos

El REBT en la instrucción ITC-BT 24 nos indica los diferentes sistemas de protección para eliminar los riesgos derivados de los contactos eléctricos indirectos. Existen dos tipos de protección fundamental:

© Ediciones Paraninfo

- **Sistemas activos que protegen por corte automático de la alimentación.** Estos sistemas se basan en la detección de tensiones de contacto respecto a tierra de las masas y en la desconexión automática de la alimentación en el caso de que estas supongan un peligro para las personas. Un claro ejemplo de estos sistemas sería la protección mediante interruptor diferencial en combinación con la puesta a tierra de las masas.
- **Sistemas pasivos que suprimen el riesgo.** Estos sistemas se basan en acondicionar las instalaciones eléctricas y los locales o emplazamientos de las mismas, para conseguir que los contactos no sean peligrosos. Como, por ejemplo: utilizar material eléctrico con doble aislamiento (clase II), aislar eléctricamente los locales para conseguir que no sean conductores, utilizar conexiones equipotenciales en las masas que eliminen la posibilidad de que aparezcan tensiones peligrosas entre las mismas, y utilizar transformadores de separación eléctrica o de aislamiento.

Protección por corte automático de la alimentación

Este sistema se basa en el corte automático de la alimentación eléctrica por medio de un dispositivo de protección adecuado al tipo de instalación (interruptor diferencial, interruptor automático, fusibles, etc.), de tal forma que, cuando se produzca un fallo de aislamiento en la instalación, se evite que aparezca en las masas una tensión de contacto de valor suficiente y que se mantenga un tiempo tal que pueda dar como resultado un riesgo de electrocución.

En la norma UNE 204060-4-41 se describen los aspectos más significativos que deben reunir los sistemas de protección en función de los distintos esquemas de conexión de la instalación. Según la misma se tienen en cuenta los siguientes esquemas de conexión de puesta a tierra:

- Esquema TT.
- Esquema TN.
- Esquema IT.

Los esquemas más utilizados son el TT y el TN, dejando el IT para instalaciones eléctricas especiales. En este texto estudiaremos las dos primeras, pudiendo consultarse el esquema IT en la ITC-BT 24.

Esquema TT

Este es el esquema de distribución que más se emplea en las redes de distribución pública de baja tensión y es básicamente el que ya hemos explicado anteriormente, consistente en la combinación de la puesta a tierra de las masas y el uso del interruptor diferencial como elemento de corte ante un fallo (Figura 21.18).

El REBT en la instrucción ITC-BT 24 nos indica que, para este sistema, todas las masas de los equipos eléctricos protegidos por un mismo dispositivo de protección deben ser interconectadas y unidas por un conductor de protección a una misma toma de tierra. Si varios dispositivos de protección van montados en serie, esta prescripción se aplica por separado a las masas protegidas por cada dispositivo.

El punto neutro de cada generador o transformador, o si no existe, un conductor de fase de cada generador o transformador, debe ponerse a tierra.

En el esquema TT, se utilizan los dispositivos de protección siguientes:

- Dispositivos de protección de corriente diferencial-residual.
- Dispositivos de protección de máxima corriente, tales como fusibles, interruptores automáticos.
- **Dispositivos de protección de corriente diferencial-residual.** Cuando se produce un fallo de aislamiento, aparece una corriente de defecto I_d por el conductor de protección hacia tierra. Dado que la toma de tierra de la masa y los conductores de protección poseen una cierta resistencia R_A, aparece una tensión de contacto U_c entre la masa y el suelo (Figura 21.18). Esta tensión deberá mantenerse dentro de unos límites que no resulten peligrosos para las personas que puedan llegar a tocar la masa bajo tensión. Para el cálculo de la tensión de contacto se aplica la ley de Ohm:

$$U_c = R_A \cdot I_d$$

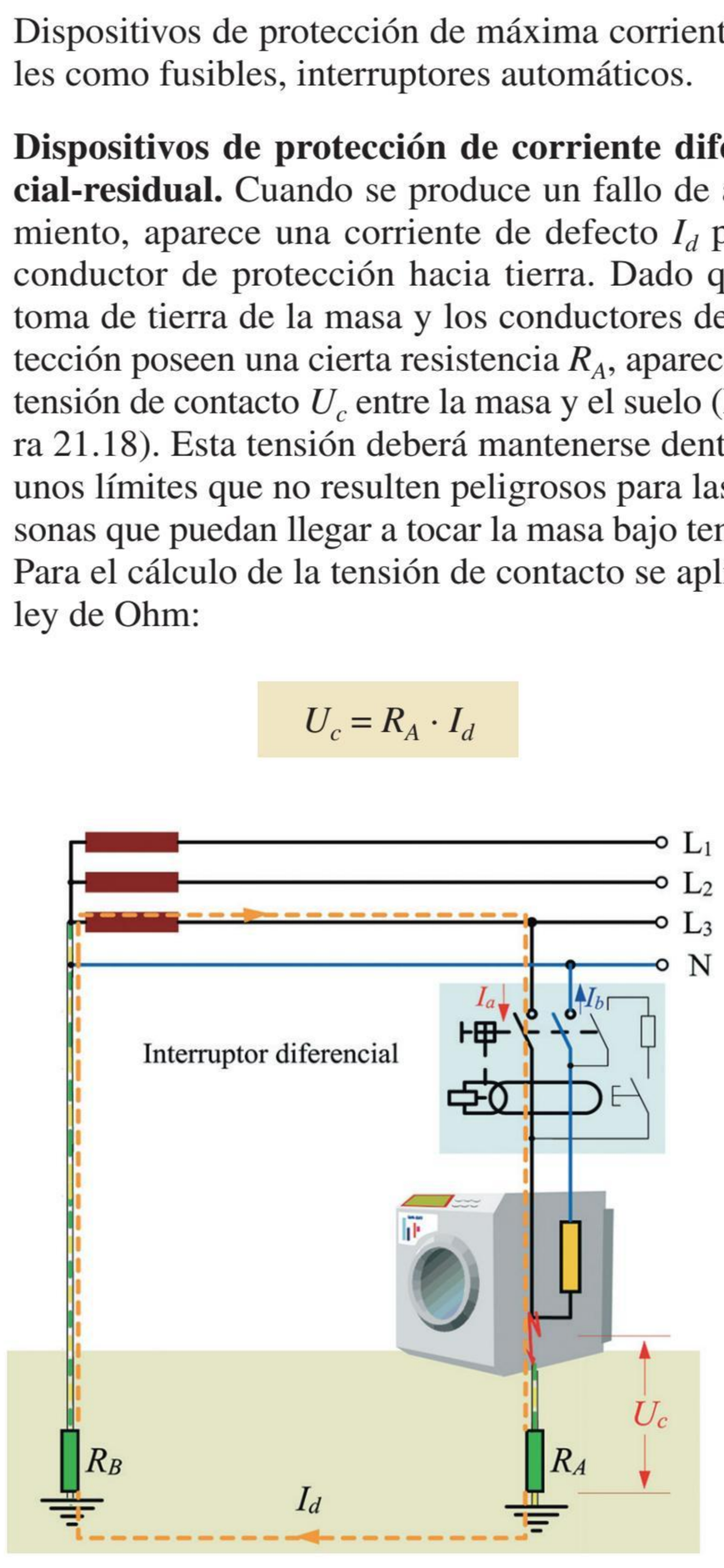


Figura 21.18. Esquema TT con dispositivo de protección de corriente diferencial-residual.

© Ediciones Paraninfo

En cualquier caso, si la corriente de defecto supera la de la sensibilidad del interruptor diferencial, este cortará automáticamente la alimentación en un tiempo no superior a 1 segundo, eliminando definitivamente la tensión peligrosa de defecto.

Actividad resuelta 21.2

En una instalación eléctrica con esquema TT, la resistencia de la toma de tierra y los conductores de protección de las masas es de 100 Ω. Calcula la tensión de contacto máxima que aparecerá en el chasis de una cocina eléctrica si se produce un fallo de aislamiento en una de las fases de conexión. El circuito está protegido mediante un interruptor diferencial de 30 mA de sensibilidad.

Solución:

$$U_c = R_A \cdot I_d = 100 \cdot 0{,}030 = 3 \text{ V}$$

Además de lo expuesto, en la ITC-BT 24 se indica lo siguiente:

Se cumplirá la siguiente condición:

$$R_A \cdot I_a \leq U_c$$

donde:

R_A = Suma de las resistencias de la toma de tierra y de los conductores de protección de masas.

I_d = Corriente que asegura el funcionamiento automático del dispositivo de protección. Cuando el dispositivo de protección es un dispositivo de corriente diferencial-residual es la corriente diferencial-residual asignada.

U_c = Tensión de contacto límite convencional (50 V, 24 V u otras, según los casos).

La selección de la sensibilidad del interruptor diferencial que ha de emplearse en cada caso vendrá delimitada por el valor de la resistencia a tierra de las masas y por la tensión de contacto límite en función del local:

- Locales o emplazamientos secos: $U_c = 50$ V.
- Locales o emplazamientos húmedos o mojados: $U_c = 24$ V.

Según esto la resistencia de la toma de tierra no deberá superar en ningún caso la siguiente relación:

$$R_A \leq \frac{U_c}{I_d}$$

Actividad resuelta 21.3

Calcula los valores máximos que deberá poseer la resistencia de la toma de tierra en función de la corriente que asegura el funcionamiento del interruptor diferencial (sensibilidad) y del tipo de local donde irá ubicada la instalación.

Solución:

Aplicando la expresión mencionada anteriormente se han obtenido los resultados de la Tabla 21.6.

Para un interruptor diferencial de 30 mA de sensibilidad que protege un local seco donde la tensión de contacto máximo es de 50 V:

$$R_A \leq \frac{U_c}{I_d} \leq \frac{50}{0{,}03} = 1.666\ \Omega$$

Tabla 21.6. Resistencia máxima de la toma de tierra de las masas

Sensibilidad del ID	I_d (A)	U_c (V)	R_A (Ω)
Alta sensibilidad	0,03	50	1.666
	0,03	24	800
Media sensibilidad	0,3	50	166
	0,3	24	80
	0,5	50	100
	0,5	24	48
Baja sensibilidad	1	50	50
	1	24	24
	2	50	25
	2	24	12
	3	50	16
	3	24	8

Actividad resuelta 21.4

Un local destinado al sector industrial posee una instalación de puesta a tierra con una resistencia de 125 Ω.

¿Cuál será la sensibilidad del interruptor diferencial asociado a esta toma de tierra para la protección contra contactos eléctricos indirectos para que su funcionamiento sea eficaz?

Solución:

Dado que se puede considerar al local como seco, la tensión máxima de contacto permitida es de 50 V. La corriente

© Ediciones Paraninfo

que asegura el funcionamiento automático del dispositivo de protección será, por tanto:

$$I_d \leq \frac{U_c}{R_A} \leq \frac{50}{125} \leq 0{,}4 \text{ A} = 400 \text{ mA}$$

Por lo que sería suficiente para la protección con un interruptor diferencial comercial de media sensibilidad de 300 mA. Por supuesto, el uso de un interruptor de alta sensibilidad de 30 mA también garantizaría la protección.

- **Dispositivos de protección de máxima corriente, tales como fusibles, interruptores automáticos.** Estos dispositivos solamente son aplicables cuando la resistencia de la toma de tierra de las masas R_A tiene un valor muy bajo. Además, deben poseer una característica de funcionamiento de tiempo inverso e I_d debe ser la corriente que asegure el funcionamiento automático en 5 s como máximo.

  Este sistema de protección es muy poco utilizado, ya que es la propia corriente de defecto la que debe provocar el disparo del interruptor automático. Dado que la tensión de contacto no puede superar los 50 V para locales secos y 24 V para húmedos, para que se alcance una intensidad de defecto lo suficientemente alta para que dispare el interruptor automático la resistencia de la toma de tierra de las masas deberá ser muy pequeña (inferior a 2 Ω). Estos valores tan bajos de la resistencia de la toma de tierra son muy difíciles de conseguir en la práctica, ya que para ello deberíamos contar con un terreno de muy baja resistencia e instalar en la red un gran número de tomas de tierra.

Esquema TN

En la práctica, este esquema queda reducido a aquellos casos en los que el usuario posea un transformador de distribución para uso exclusivo, por lo que su aplicación no está muy extendida.

En el esquema TN se elimina la puesta a tierra de las masas distinto al de la alimentación, es decir, en edificio o local donde se ubican las instalaciones eléctricas desaparece la instalación de toma de tierra y solo se mantiene la puesta a tierra en el neutro del transformador de distribución. Para evitar que aparezcan tensiones de contacto peligrosas en las masas, estas se pueden conectar directamente al neutro N de la instalación o a un conductor de protección CP que irá conectado directamente al punto de conexión de toma de tierra del transformador de distribución. Según esta última consideración se pueden obtener dos tipos de esquemas básicos:

- **Esquema TN-S.** El conductor neutro y el de protección son distintos en todo el esquema (Figura 21.19).

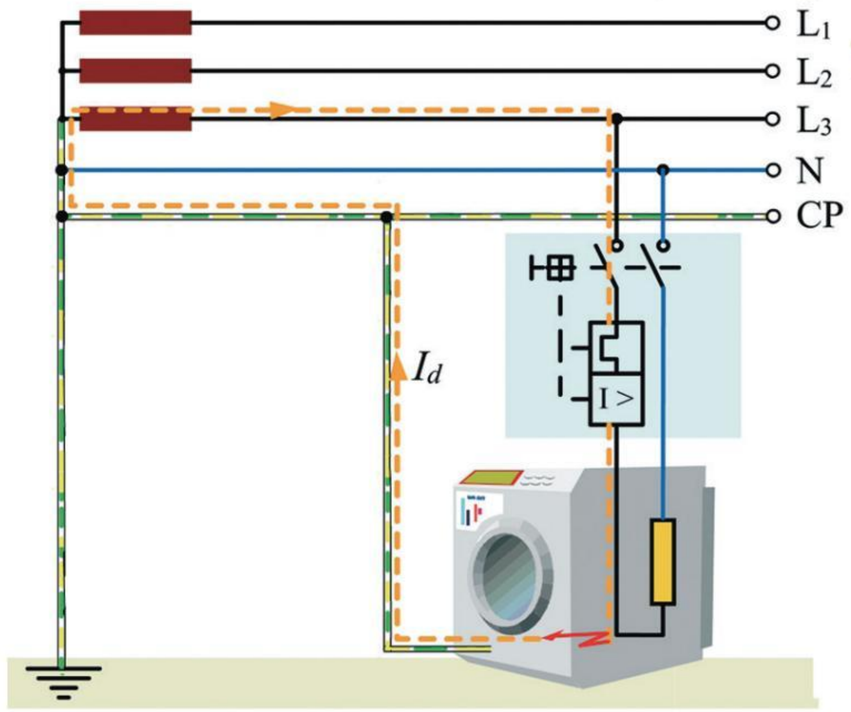


Figura 21.19. Esquema TN-S.

En este caso el conductor de protección que une las masas de la instalación está conectado directamente al punto neutro del transformador de distribución y a la toma de tierra del mismo. En estas condiciones, en el caso de que se produzca un fallo de aislamiento en una de las fases, provocará un cortocircuito entre la fase y el conductor de protección que está unido al neutro. La corriente de defecto que aparece, por tanto, será muy alta y suficiente para hacer que el interruptor automático de protección corte la alimentación en un tiempo muy corto y elimine la tensión de contacto elevada (tensión entre fase y neutro).

La ventaja que posee este sistema frente al TT es que no sería necesaria la instalación de interruptores diferenciales para la protección de contactos indirectos, ya que en caso de defecto serían los propios dispositivos de corte contra cortocircuitos (fusibles e interruptores automáticos) usados en la línea los que cortarían la alimentación.

Para dar más seguridad al sistema, la ITC-BT 24 también admite la utilización de dispositivos de protección de corriente diferencial-residual, como el interruptor diferencial.

- **Esquema TN-C.** El conductor neutro y el de protección forman un solo conductor en todo el esquema (Figura 21.20).

  En este caso es el propio neutro el que hace las veces de conductor de protección y se conecta directamente a las masas. Aquí es importante que no exista la posibilidad de que el conductor neutro pueda adquirir tensiones peligrosas respecto al suelo del local. Además, es necesario asegurarse de que no se interrumpa en ningún momento el conductor neutro mientras se mantiene la tensión en las fases, ya que de esta forma desaparecería la conexión de las masas con la toma de tierra de la alimentación, con el consiguiente peligro que ello conlleva.

© Ediciones Paraninfo

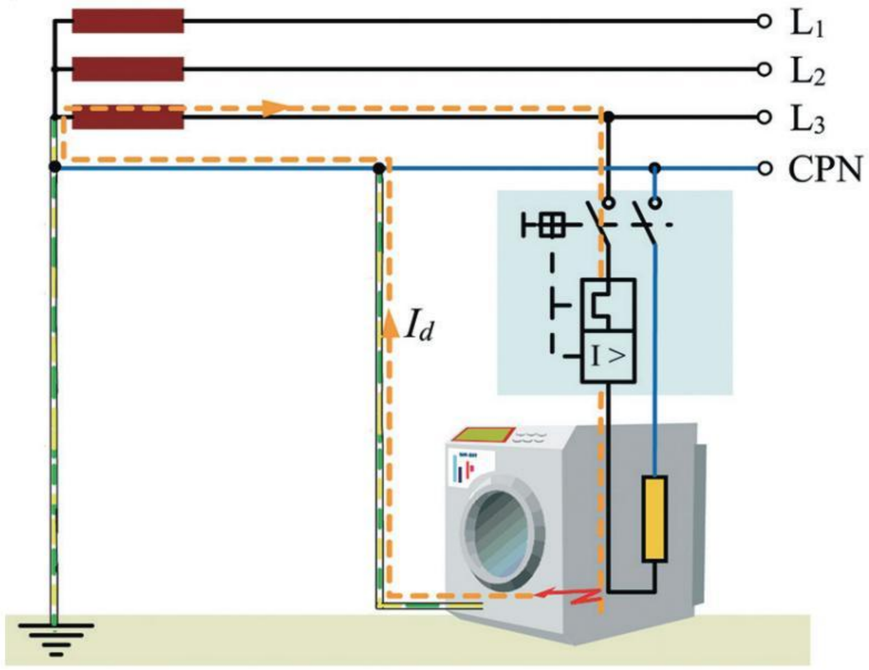


Figura 21.20. Esquema TN-C.

Para este tipo de esquema no se admite el uso de dispositivos de protección de corriente diferencial-residual, quedando la protección contra contactos indirectos solamente a cargo de los dispositivos de corte por máxima corriente, tales como interruptores automáticos y fusibles.

Tanto para el esquema TN-S como para el TN-C el REBT en la ITC-BT 24 tiene en cuenta las siguientes consideraciones:

Las características de los dispositivos de protección y las secciones de los conductores se eligen de manera que, si se produce en un lugar cualquiera un fallo, de impedancia despreciable, entre un conductor de fase y el conductor de protección o una masa, el corte automático se efectúe en un tiempo igual, como máximo, al valor especificado, y se cumpla la condición siguiente:

$$Z_s \cdot I_d \leq U_0$$

Z_s = Impedancia del bucle de defecto, incluyendo la de la fuente, la del conductor activo hasta el punto de defecto y la del conductor de protección, desde el punto de defecto hasta la fuente.

I_a = Es la corriente que asegura el funcionamiento del dispositivo de corte automático en un tiempo como máximo igual al definido en la Tabla 21.7 para tensión nominal igual a U_0. En caso de utilización de un dispositivo de corriente diferencial-residual, I_d es la corriente diferencial asignada y U_0 es la tensión nominal entre fase y tierra, valor eficaz en corriente alterna.

Tabla 21.7. Tiempos de interrupción de los dispositivos de corte automático

U_0 (V)	Tiempos de interrupción (s)
230	0,4
400	0,2
>400	0,1

Utilización de material de clase II

El REBT en la instrucción ITC-BT 43 realiza una clasificación de los receptores en lo relativo a la protección contra los choques eléctricos tal como se muestra en la Tabla 21.8.

Así, por ejemplo, las herramientas eléctricas portátiles manuales utilizadas en obras o en emplazamientos muy conductores (húmedos, mojados, etc.), deben ser de clase II o III (Figura 21.21).

Para la clase II se excluye la conexión a tierra de las masas de los aparatos, con lo que se elimina la posibilidad de que aparezcan tensiones peligrosas respecto al suelo en los chasis de este tipo de receptores por un defecto de aislamiento. Como contrapartida se dota a los mismos de un doble aislamiento que evita la posibilidad de que los usuarios de los receptores queden en contacto con la posible tensión de defecto.

Protección en los locales o emplazamientos no conductores

Este tipo de protección solo es posible en locales que estén perfectamente aislados en relación a tierra y se fundamenta en que las personas están eficazmente protegidas mediante aislamiento eléctrico del puesto de trabajo. Si lo comparamos con el sistema de protección basado en la utilización de material de clase II, mientras en este último se reforzaba el aislamiento de pequeños aparatos eléctricos, aquí se trata de realizarlo en el entorno de instalaciones de mediano tamaño.

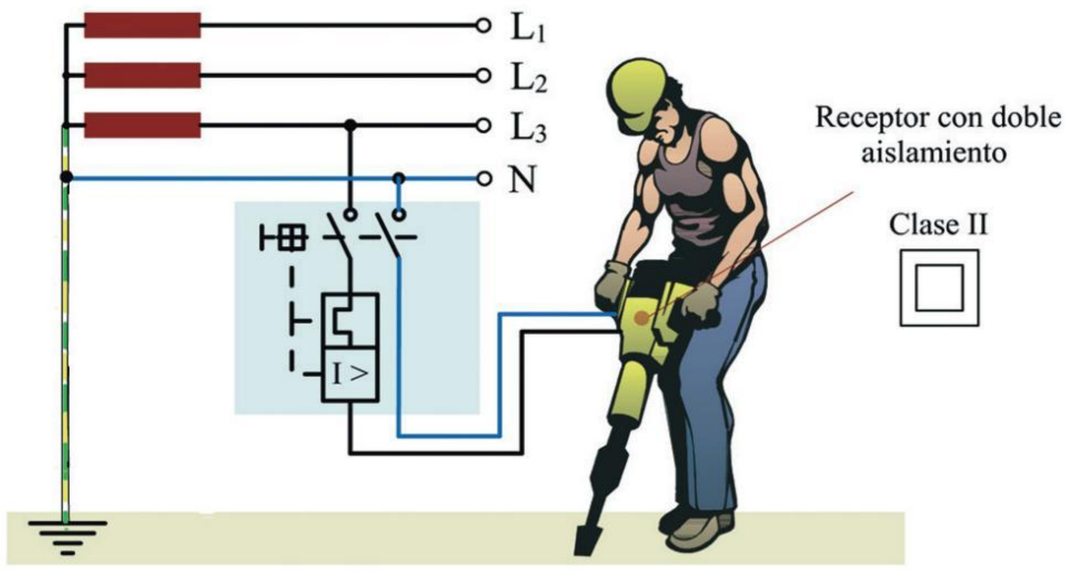


Figura 21.21. Protección mediante empleo de material de clase II.

Para llevar a cabo esta medida de protección se aísla eléctricamente el suelo con materiales adecuados, incluido el punto de fijación de las máquinas al suelo.

A este respecto, en la ITC-BT 24 se indica lo siguiente: esta medida de protección está destinada a impedir en caso de fallo del aislamiento principal de las partes activas, el contacto simultáneo con partes que pueden ser puestas a tensiones diferentes.

© Ediciones Paraninfo

Tabla 21.8. Clasificación de los receptores en lo relativo a la protección contra los choques eléctricos

	Clase 0	Clase I	Clase II	Clase III
Características principales de los aparatos	Sin medios de protección por puesta a tierra	Previstos medios de conexión a tierra	Aislamiento suplementario pero sin medios de protección por puesta a tierra	Previstos para ser alimentados con baja tensión de seguridad (MBTS)
Precauciones de seguridad	Entorno aislado de tierra	Conexión a la toma de tierra de protección	No es necesaria ninguna protección	Conexión a muy baja tensión de seguridad
Indicaciones en la placa de características	***Clase 0*** o sin indicación	***Clase I*** o el símbolo de puesta a tierra	***Clase II*** o el símbolo 	***Clase III*** o valor de la tensión nominal

Se admite la utilización de materiales de la clase 0 a condición de que las masas estén dispuestas de manera que, en condiciones normales, las personas no hagan contacto simultáneo: bien con dos masas, bien con una masa y cualquier elemento conductor, si estos elementos pueden encontrarse a tensiones diferentes en caso de un fallo del aislamiento principal de las partes activas.

En estos locales (o emplazamientos), no debe estar previsto ningún conductor de protección.

Las prescripciones del apartado anterior se consideran satisfechas si el emplazamiento posee paredes aislantes y si se cumplen una o varias de las condiciones siguientes:

- Alejamiento respectivo de las masas y de los elementos conductores, así como de las masas entre sí. Este alejamiento se considera suficiente si la distancia entre dos elementos es de 2 m como mínimo, pudiendo ser reducida esta distancia a 1,25 m por fuera del volumen de accesibilidad.
- Interposición de obstáculos eficaces entre las masas o entre las masas y los elementos conductores. Estos obstáculos son considerados como suficientemente eficaces si dejan la distancia a franquear en los valores indicados en el punto anterior.
- No deben conectarse ni a tierra ni a las masas y, en la medida de lo posible, deben ser de material aislante.
- Aislamiento o disposición aislada de los elementos conductores. El aislamiento debe tener una rigidez mecánica suficiente y poder soportar una tensión de ensayo de un mínimo de 2.000 V. La corriente de fuga no debe ser superior a 1 mA en las condiciones normales de empleo.

Las Figuras 21.22 y 21.23 contienen ejemplos explicativos de las disposiciones anteriores.

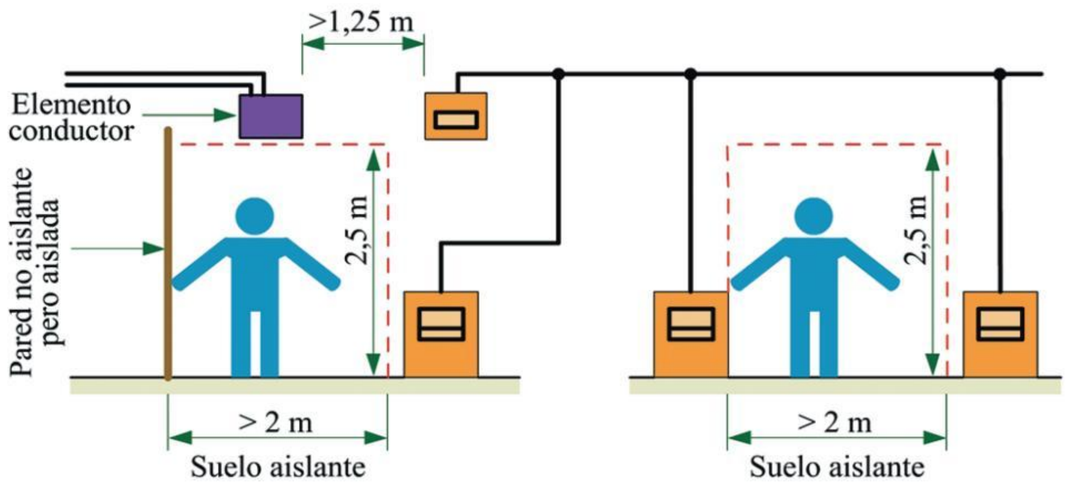


Figura 21.22. Ejemplos de protección en los locales no conductores (a).

Figura 21.23. Ejemplos de protección en los locales no conductores (b).

Las paredes y suelos aislantes deben presentar una resistencia no inferior a:

- 50 kΩ, si la tensión nominal de la instalación no es superior a 500 V.
- 100 kΩ, si la tensión nominal de la instalación es superior a 500 V.

Protección mediante conexiones equipotenciales locales no conectadas a tierra

La aplicación de este sistema de protección queda limitado para instalaciones de poca extensión, o para factorías con sistema de generación propio de energía eléctrica o transformador propio.

© Ediciones Paraninfo

Este sistema de protección consiste en unir eléctricamente las masas de una instalación mediante un conductor de protección, con el fin de evitar que pueda aparecer una diferencia de potencial entre dos masas. De esta forma, la conexión equipotencial lo que consigue, en todo momento, es que las tensiones que pudieran aparecer entre dos masas accesibles para una persona, debido a un defecto de aislamiento, sea igualada, lo que elimina el riesgo de electrocución aunque se toquen las masas.

A este respecto, en la ITC-BT 24 se indica lo siguiente: los conductores de equipotencialidad deben conectar todas las masas y todos los elementos conductores que sean simultáneamente accesibles.

La conexión equipotencial local así realizada no debe estar conectada a tierra, ni directamente ni a través de masas o de elementos conductores.

Deben adoptarse disposiciones para asegurar el acceso de personas al emplazamiento considerado sin que estas puedan ser sometidas a una diferencia de potencial peligrosa. Esto se aplica concretamente en el caso en que un suelo conductor, aunque aislado del terreno, está conectado a la conexión equipotencial local.

Protección por separación eléctrica

Este sistema consiste en separar eléctricamente el circuito de la instalación eléctrica del local o emplazamiento de la alimentación eléctrica del sistema de distribución pública. Para ello se pueden utilizar transformadores de aislamiento, tal como se muestra en la Figura 21.24.

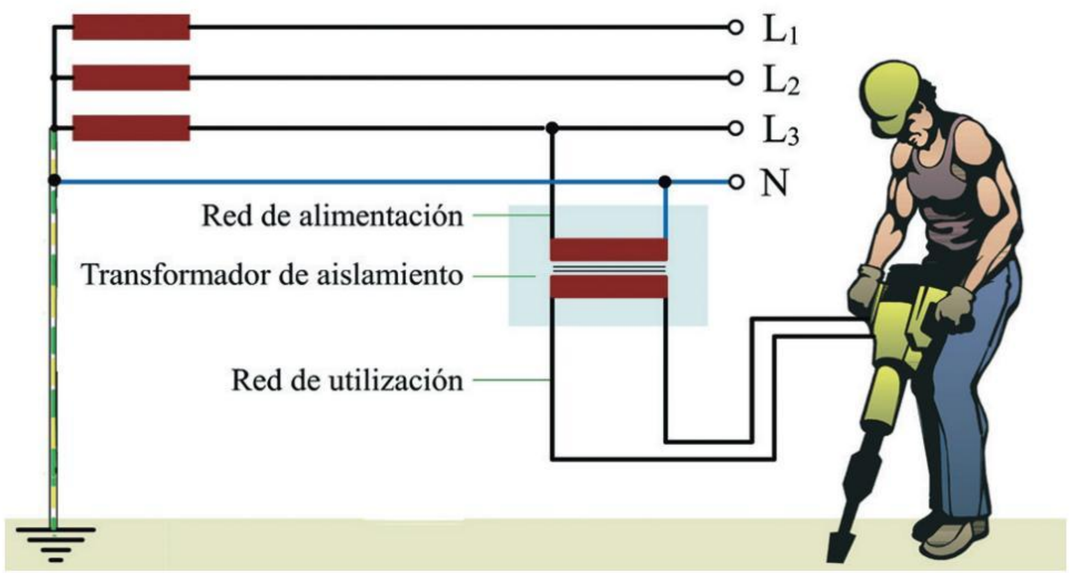


Figura 21.24. Protección por separación eléctrica.

En el caso de que se produjese un fallo de aislamiento en uno de los conductores de la red de utilización, la masa quedaría unida eléctricamente con él; sin embargo no aparecería ninguna tensión respecto al suelo gracias a la separación del circuito proporcionado por el transformador, evitando así el riesgo de contacto indirecto.

Con este sistema solo quedamos protegidos ante el primer defecto que se produzca en una masa, ya que si se produjese otro defecto en una masa próxima y este entrara en contacto con un conductor activo diferente al de la otra masa, aparecería entre las dos masas toda la tensión de la alimentación. Si en estas condiciones, una persona toca simultáneamente las dos masas, existe un riesgo elevado de electrocución con una tensión de contacto igual a la de alimentación.

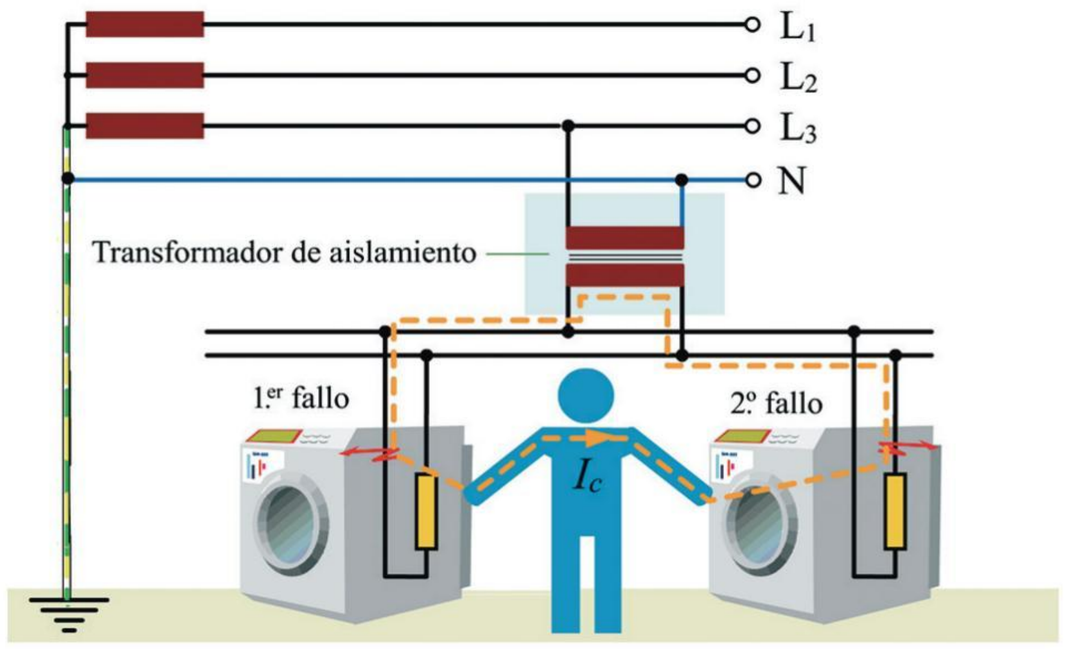


Figura 21.25. Riesgo de electrocución en la protección por separación de defectos simultáneos.

Para evitar este peligro se deben conectar las masas de la red de utilización mediante conductores de equipotencialidad no conectados a tierra (Figura 21.26). De esta manera, si de forma fortuita se produjese un fallo de aislamiento simultáneo en dos masas de la misma instalación, el conductor de equipotencialidad cortocircuitaría cualquier tensión que pudiera aparecer entre las masas, siendo los interruptores automáticos o fusibles los que corten la alimentación en un tiempo como máximo igual al indicado en la Tabla 21.7.

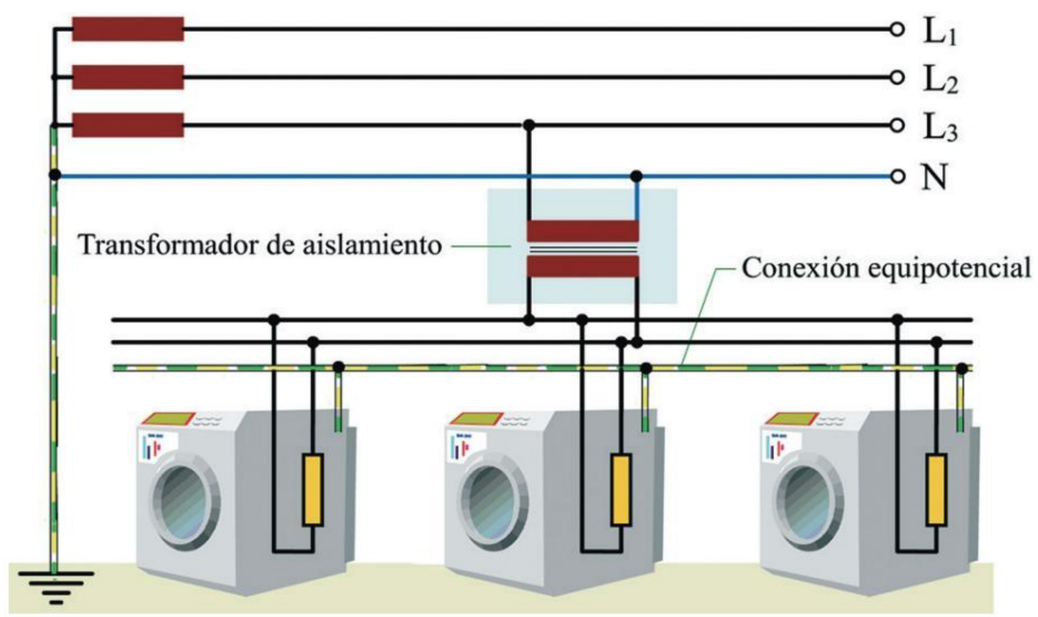


Figura 21.26. Conexión equipotencial para evitar el peligro de defectos simultáneos.

El sistema de protección se puede aplicar a cualquier tipo de locales y su utilización evita el corte de la alimentación cuando aparece un solo defecto de aislamiento. Sobre todo está indicado como sistema de protección para locales muy conductores, húmedos y mojados, siendo imprescindible ubicar el transformador separador fuera del local.

© Ediciones Paraninfo

A este respecto, en la ITC-BT 24 se indica lo siguiente: el circuito debe alimentarse a través de una fuente de separación, es decir:

- Un transformador de aislamiento.
- Una fuente que asegure un grado de seguridad equivalente al transformador de aislamiento anterior, por ejemplo un grupo motor generador que posea una separación equivalente.

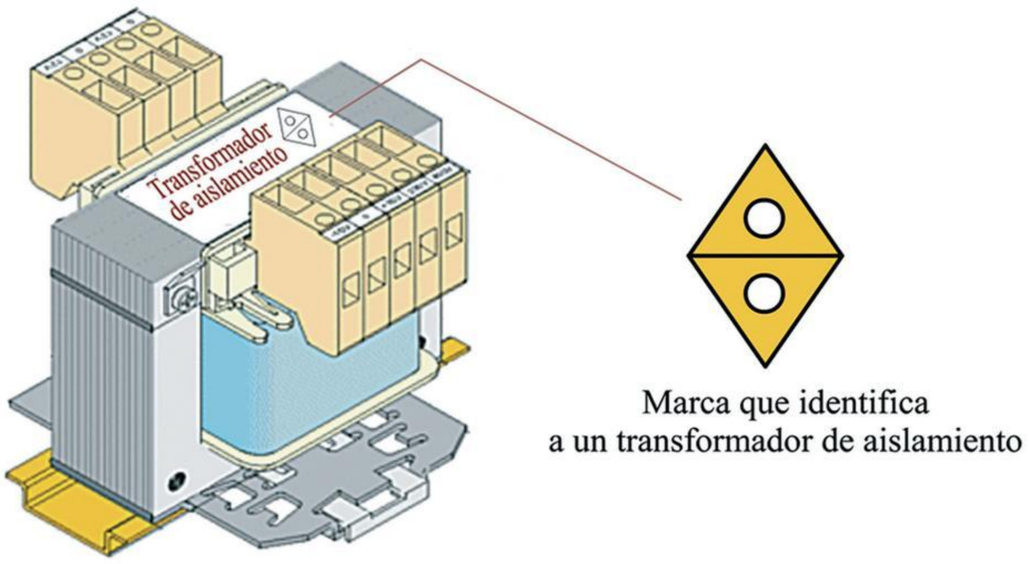


Figura 21.27. Trasformador de aislamiento.

En el caso de que el circuito separado no alimente más que un solo aparato, las masas del circuito no deben ser conectadas a un conductor de protección.

En el caso de un circuito separado que alimente muchos aparatos, se satisfarán las siguientes prescripciones:

- Las masas del circuito separado deben conectarse entre sí mediante conductores de equipotencialidad aislados, no conectados a tierra. Tales conductores no deben conectarse ni a conductores de protección, ni a masas de otros circuitos ni a elementos conductores.
- Todas las bases de tomas de corriente deben estar provistas de un contacto de tierra que debe estar conectado al conductor de equipotencialidad descrito en el apartado anterior.
- Todos los cables flexibles de equipos que no sean de clase II deben tener un conductor de protección utilizado como conductor de equipotencialidad.

21.5. Riesgos de la electricidad sobre los materiales

Las instalaciones eléctricas pueden producir fallos que den lugar a un exceso de la intensidad de corriente que fluye por los conductores o receptores eléctricos. Si estos fallos no se detectan y eliminan con rapidez y eficacia, pueden provocar incendios o deterioro del material aislante de los elementos eléctricos. Esto puede ocasionar quemaduras o la electrocución de las personas al quedar las partes de la instalación sin su debida protección aislante.

Además, los conductores eléctricos de las instalaciones deberán poseer una sección adecuada, según la intensidad máxima, intensidad de cortocircuito, caída de tensión máxima admisible y que respete la normativa vigente, para evitar que se produzca sobrecalentamiento por efecto Joule. También es importante observar que los niveles de aislamiento de los conductores y de los diferentes elementos de la instalación sean apropiados para la tensión nominal del circuito y también respeten la normativa vigente.

Los fallos que pueden dar lugar a un exceso de corriente son debidos a sobreintensidades y sobretensiones.

21.5.1. Protección contra sobreintensidades

Las sobreintensidades son debidas fundamentalmente a sobrecargas y cortocircuitos. Los elementos de protección más comúnmente utilizados para estos fallos son los interruptores automáticos, los fusibles y los relés térmicos.

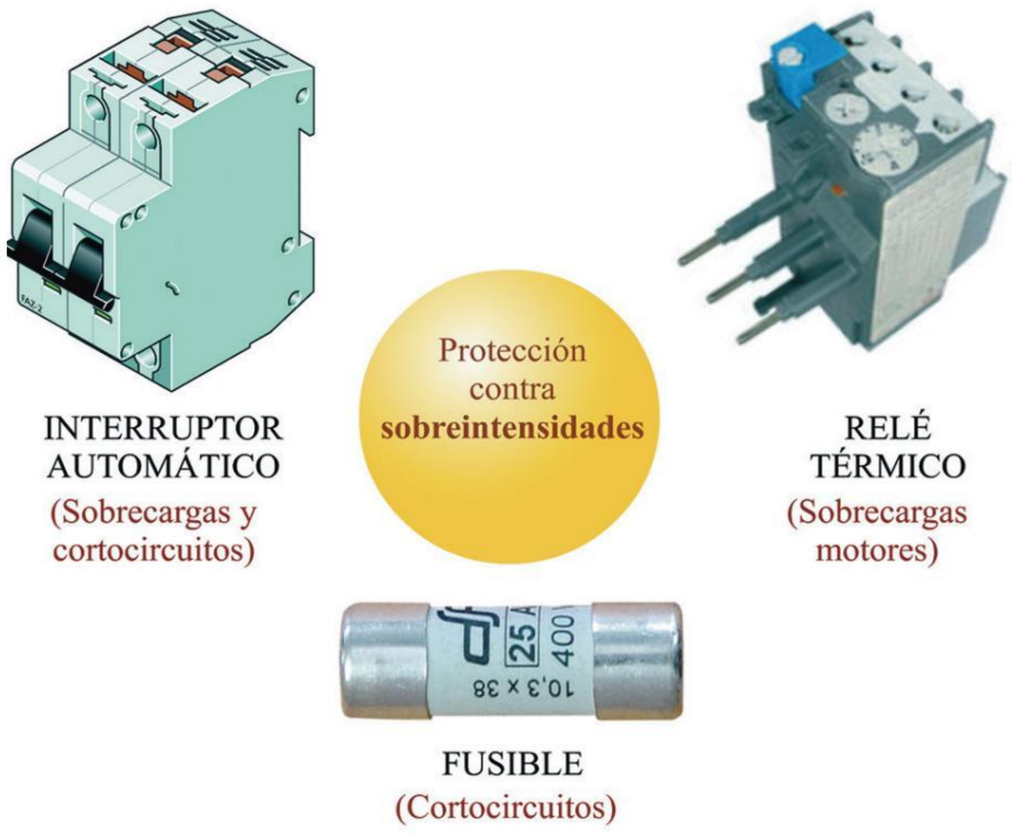


Figura 21.28. Sistemas de protección contra sobreintensidades.

A este respecto, en la ITC-BT 22 se indica lo siguiente:

Todo circuito estará protegido contra los efectos de las sobreintensidades que puedan presentarse en el mismo, para lo cual la interrupción de este circuito se realizará en un tiempo conveniente o estará dimensionado para las sobreintensidades previsibles.

Protección contra sobrecargas. El límite de intensidad de corriente admisible en un conductor ha de quedar en todo caso garantizada por el dispositivo de protección utilizado.

El dispositivo de protección podrá estar constituido por un interruptor automático de corte omnipolar con curva térmica de corte, o por cortacircuitos fusibles calibrados de características de funcionamiento adecuadas.

© Ediciones Paraninfo

Protección contra cortocircuitos. En el origen de todo circuito se establecerá un dispositivo de protección contra cortocircuitos cuya capacidad de corte estará de acuerdo con la intensidad de cortocircuito que pueda presentarse en el punto de su conexión. Se admite, no obstante, que cuando se trate de circuitos derivados de uno principal, cada uno de estos circuitos derivados disponga de protección contra sobrecargas, mientras que un solo dispositivo general pueda asegurar la protección contra cortocircuitos para todos los circuitos derivados.

Se admiten como dispositivos de protección contra cortocircuitos los fusibles calibrados de características de funcionamiento adecuadas y los interruptores automáticos con sistema de corte omnipolar.

21.5.2. Protección contra sobretensiones

Una sobretensión es una elevación de la tensión nominal de la instalación, que suele tener muy corta duración, pero que puede producir un gran daño en los elementos de la instalación eléctrica.

La causa más habitual de sobretensiones suele ser la provocada por los rayos provenientes de descargas de origen atmosférico. También pueden ser originadas por una variación excesiva de intensidad de corriente por los conductores de la red, desconexión de transformadores, conmutación de redes, etcétera.

A este respecto, en la ITC-BT 23 se indica lo siguiente: la incidencia que la sobretensión puede tener en la seguridad de las personas, instalaciones y equipos, así como su repercusión en la continuidad del servicio es función de:

- La coordinación del aislamiento de los equipos.
- Las características de los dispositivos de protección contra sobretensiones, su instalación y su ubicación.
- La existencia de una adecuada red de tierras.



Relé de sobretensión de baja tensión



Pararrayos para protección de descargas atmosféricas en edificios



Autoválvula para la protección de descargas atmosféricas en líneas de alta tensión

Figura 21.29. Sistemas de protección contra sobretensiones.

21.6. Normativa sobre seguridad

Dada la importancia que tiene la seguridad de las personas en los entornos de trabajo y en concreto en el sector eléctrico, la Administración en conjunto con la Unión Europea ha impulsado la adopción de normas reglamentarias específicas en distintos ámbitos con el fin de promover la mejora de la seguridad y de la salud en el trabajo.

21.6.1. Ley de Prevención de Riesgos Laborales

La ley 31/1995, de 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales constituye el elemento de referencia sobre la que se fundamenta la normativa sobre la seguridad y salud en el trabajo. La finalidad de esta ley se resume en los siguientes aspectos:

- **Prevención** para evitar riesgos en la actividad laboral.
- **Reducción o eliminación de los riesgos** del trabajo.
- **Formación** de los trabajadores en temas de prevención y seguridad en el trabajo.
- **Planificación de la prevención.**

El MATERIAL WEB que se ha elaborado para este texto contiene el texto íntegro de la Ley de Prevención de Riesgos Laborales.

Actividad propuesta 21.1

Lee la Ley de Prevención de Riesgo Laborales y realiza un extracto con la relación de capítulos y artículos de esta Ley.

21.6.2. Normativa sobre seguridad en el sector eléctrico

Hay una gran cantidad de leyes, reales decretos, reglamentos, guías técnicas y normas en relación con la seguridad y salud en el sector eléctrico. En la Tabla 21.9 se expone un resumen de las que se han considerado más importantes:

Tabla 21.9. Normativa sobre seguridad en el sector eléctrico

Normativa sobre seguridad en el sector eléctrico
R.D. 614/2001, de 8 de junio, sobre disposiciones mínimas para la protección de la salud y seguridad de los trabajadores frente al riesgo eléctrico.
Guía Técnica de Aplicación del R.D. 614/2001.
R.D. 842/2002, de 2 agosto, en el que se aprueba el Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión.

© Ediciones Paraninfo

Normativa sobre seguridad en el sector eléctrico
Guía Técnica de Aplicación del R.D. 842/2002.
R.D. 1215/1997, de 18 de julio, por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud para la utilización por los trabajadores de los equipos de trabajo.
R.D. 773/1997, de 30 de mayo, sobre disposiciones mínimas de seguridad y salud relativas a la utilización por los trabajadores de equipos de protección individual.
R.D. 485/1997, de 14 de abril, sobre disposiciones mínimas en materia de señalización de seguridad y salud en el trabajo.
R.D. 1627/1997, de 24 de octubre, por el que se establecen disposiciones mínimas de seguridad y de salud en las obras de construcción.
R.D. 486/1997, de 14 de abril, por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud en los lugares de trabajo.
R.D. 487/1997, de 14 de abril, sobre disposiciones mínimas de seguridad y salud relativas a la manipulación manual de cargas que entrañe riesgos, en particular dorsolumbares, para los trabajadores.
R.D. 1435/1992, de 27 de noviembre, por el que se dictan las disposiciones de aplicación de la Directiva del Consejo 89/392/CEE, relativa a la aproximación de las legislaciones de los Estados miembros sobre máquinas.
R.D. 208/2005, de 25 de febrero, sobre aparatos eléctricos y electrónicos y la gestión de sus residuos.

En el MATERIAL WEB que se ha elaborado para este texto podrás consultar algunos de los textos legales relativos a la normativa que figuran en la Tabla 21.9.

En las siguientes direcciones de internet podrás encontrar cualquier texto legal que necesites:
http://www.boe.es
http://www.mtas.es/Insht/legislation

Además de la normativa mencionada, AENOR (Asociación Española de Normalización y Certificación) se dedica a la redacción y aprobación de las normas de origen español, designadas con las siglas UNE (Una Norma Española). AENOR tiene publicada una amplia colección de normas UNE relativas a la seguridad. Dada su extensión hemos incluido un listado resumido de ellas en el MATERIAL WEB.

El MATERIAL WEB que se ha elaborado para este texto contiene un documento con el listado de las normas UNE relativas a la seguridad.

Debido a que las normas UNE están protegidas por la normativa de propiedad intelectual, para poder consultarlas deberás adquirirlas en:

http://www.aenor.es

Actividad propuesta 21.2

Consulta en el MATERIAL WEB los documentos con el contenido del R.D. 614/2001, de 8 de junio, sobre disposiciones mínimas para la protección de la salud y seguridad de los trabajadores frente al riesgo eléctrico y de su Guía Técnica de Aplicación.

Realiza un índice con los contenidos de las diferentes disposiciones que aparecen en este Real Decreto e incluye un extracto de los mismos.

La solución a esta Actividad propuesta la puedes encontrar dentro del MATERIAL WEB elaborado para este texto.

21.7. Normas de seguridad para la realización de trabajos eléctricos

En la actualidad está vigente el R.D. 614/2001 sobre disposiciones mínimas para la protección de la salud y seguridad de los trabajadores frente al riesgo eléctrico. En él se obliga al empresario a «que adopte las medidas necesarias para que de la utilización o presencia de la energía eléctrica en los lugares de trabajo no se deriven riesgos para la salud y la seguridad de los trabajadores». Asimismo, delimita el campo de trabajo ante una línea eléctrica, porque dependiendo de la tensión, el riesgo es mayor o menor y, por tanto, el trabajo debe realizarse a más o menos distancia.

Las normas de seguridad a tener en cuenta para la realización de trabajos eléctricos dependerán, por tanto, de la tensión nominal de la instalación y de si dichos trabajos se ejecutan en ausencia de tensión o con tensión. Por supuesto, las normas de seguridad deberán extremarse más en los casos de trabajos con tensiones elevadas y en aquellas operaciones en las que no es posible suprimir la tensión de alimentación.

21.7.1. Normas generales

- Las personas que trabajan en las instalaciones eléctricas de baja o alta tensión tienen que ser debidamente formadas en los métodos de trabajo adecuados y siguiendo las normas de prevención y seguridad.
- Se debe hacer un uso correcto del equipo de trabajo y del equipo de protección individual.
- Un emplazamiento en el que hay que trabajar, no puede ser considerado sin tensión si no ha sido verificada la ausencia de tensión.
- Queda terminantemente prohibido tocar y efectuar trabajos en instalaciones de alta tensión, aunque se haga con guantes o herramientas aislantes, a no ser

© Ediciones Paraninfo

que se realicen con las medidas de protección adecuadas a *trabajos en tensión*. Esta prohibición no limita el uso de pértigas de maniobra, dispositivos de verificación de ausencia de tensión o dispositivos de control de tensión, siempre y cuando se realicen según las prescripciones reglamentarias.

- Para la realización de maniobras sobre aparatos de corte serán necesarias al menos dos de las siguientes protecciones: banqueta o alfombra aislante, pértiga aislante, guantes aislantes o conexión equipotencial. En caso de que el mando del aparato esté al alcance del público, debe quedar siempre enclavado después de cada maniobra.
- Mientras duran los trabajos en tensión no se deben llevar elementos o accesorios metálicos de cualquier tipo.
- Los operadores de instalaciones eléctricas de baja o alta tensión irán vestidos con ropa de trabajo adecuada a la instalación. Se recomienda la ropa de algodón o fibras artificiales resistentes al fuego. La ropa con fibras acrílicas no es aconsejable.
- Antes de utilizar aparatos o máquinas eléctricas, es necesario informarse sobre las precauciones que hay que tomar para su uso y respetarlas escrupulosamente.
- No tirar de los cables eléctricos para mover o desplazar los aparatos o máquinas eléctricas.
- Respetar las señales de advertencia y las protecciones, cuya misión es evitar el contacto de partes del cuerpo con piezas bajo tensión.
- Prestar especial atención a las medidas de seguridad específicas si se realizan trabajos eléctricos en zonas húmedas o mojadas.

21.7.2. Trabajos en ausencia de tensión

El primer principio que se establece es que, siempre que sea posible, los trabajos que se efectúen en una instalación eléctrica o su proximidad han de realizarse en ausencia de tensión. Este requisito es el más importante, ya que gran parte de los accidentes graves son debidos a su incumplimiento.

La definición de trabajos sin tensión es la de «trabajos en instalaciones eléctricas que se realizan después de haber tomado todas las medidas necesarias para mantener sin tensión la instalación».

Es importante destacar que los trabajos de supresión de la tensión y los de reposición de la misma una vez finalizado el trabajo en ausencia de tensión, han de ser realizados por «trabajadores autorizados» y en el caso de instalaciones de alta tensión deberán ser «trabajadores cualificados». Los trabajos de supresión y reposición de la tensión tienen, por definición, consideración de trabajos en tensión.

El proceso para suprimir la tensión antes de realizar los trabajos requeridos sin tensión es conocido como las **cinco reglas de oro,** que son las que se indican en la Tabla 21.10.

Tabla 21.10. Cinco reglas de oro para trabajos sin tensión

Procedimiento para suprimir la tensión		
Cinco reglas de oro	1.ª	Desconectar todas las fuentes de tensión mediante interruptores o seccionadores que aseguren que sea imposible su cierre inesperado.
	2.ª	Prevenir posibles realimentaciones de la tensión durante la realización de los trabajos, o antes de dar estos por finalizados.
	3.ª	Verificación de la ausencia de tensión antes de comenzar los trabajos.
	4.ª	Poner a tierra y en cortocircuito todas las fuentes de tensión.
	5.ª	Proteger frente a elementos próximos en tensión, en su caso, y establecer una señalización de seguridad para delimitar la zona de trabajo.



Figura 21.30. Cinco reglas de oro para trabajos sin tensión.

1.ª regla. Desconectar

Con el fin de aislar la parte de la instalación donde se va a realizar el trabajo sin tensión, se deben abrir todos los interruptores o interruptores automáticos y seccionadores, mediante los cuales dicha instalación se pueda conectar a las fuentes de alimentación conocidas. También puede utilizarse para ello la extracción de fusibles y la apertura

© Ediciones Paraninfo

de los puentes empleados para unir distintos tramos de una línea o instalación eléctrica.

La apertura debe comenzar accionando los aparatos preparados para abrir con carga (interruptores o interruptores automáticos). Después se abrirán los seccionadores. Lo anterior se puede complementar con la retirada de los fusibles y, en su caso, la apertura de los puentes, extracción de carretones, etc., con el fin de aumentar las garantías de mantener aislada la instalación en la que va a realizarse el trabajo.

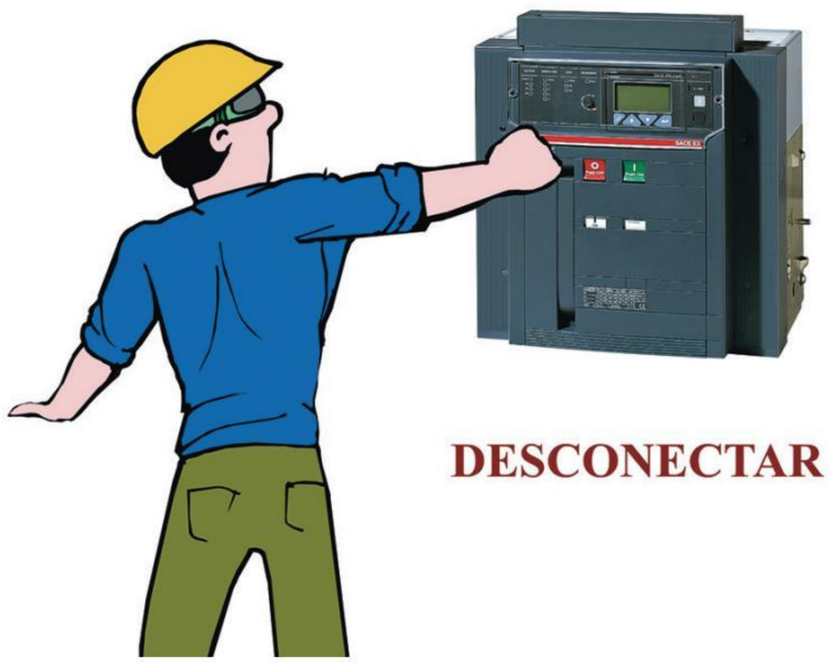


Figura 21.31. Desconexión de todas las fuentes de tensión.

Los condensadores u otros elementos de la instalación que mantengan tensión después de la desconexión deberán descargarse mediante dispositivos adecuados.

Para realizar la desconexión en condiciones seguras, es necesario tener en cuenta las características y limitaciones intrínsecas de cada tipo de aparato. Así, para los aparatos más corrientes deben tenerse en cuenta las indicaciones de la Tabla 21.11.

Tabla 21.11. Característica y limitaciones de los dispositivos de desconexión

Seccionadores	Pueden abrir y cerrar un circuito cuando es despreciable la corriente a interrumpir o establecer, es decir, cuando no hay carga conectada.
Interruptores	Son capaces de establecer e interrumpir corriente, en las condiciones normales del circuito, comprendidas circunstancialmente las condiciones específicas de sobrecarga en servicio.
Interruptores automáticos, (disyuntores)	Son capaces de establecer e interrumpir corriente, en las condiciones normales del circuito, así como corrientes en condiciones anormales, específicas del circuito, tales como las de cortocircuito.

La desconexión debe incluir el conductor neutro cuando exista. En este caso, que suele ser habitual en las instalaciones de baja tensión, si es posible, la desconexión del conductor neutro debe ser la última en realizarse (y cuando se efectúe la conexión, la primera en ser efectuada).

2.ª regla. Prevenir cualquier posible realimentación

Después de la realización de la desconexión se ha de proceder al bloqueo de los dispositivos utilizados en esta primera etapa, de tal forma que se impida una realimentación accidental de la instalación.

Los dispositivos de maniobra utilizados para desconectar la instalación deben asegurarse contra cualquier posible reconexión, preferentemente por bloqueo del mecanismo de maniobra, y deberá colocarse, cuando sea necesario, una señalización para prohibir la maniobra. En ausencia de bloqueo mecánico, se adoptarán medidas de protección equivalentes. Cuando se utilicen dispositivos telemandados deberá impedirse la maniobra errónea de los mismos desde el telemando.

En el caso de utilizar el bloqueo o enclavamiento mecánico del mecanismo de maniobra, este se puede efectuar mediante el empleo de candados o cerraduras, combinados, en su caso, con cadenas, pasadores u otros elementos destinados a conseguir la inmovilización del órgano de accionamiento del aparato de maniobra (Figura 21.32).



Figura 21.32. Ejemplo de sistemas de enclavamiento y señal de prohibido maniobrar.

Junto al dispositivo de bloqueo, se recomienda colocar una señal que indique la prohibición de maniobrar el aparato, sobre todo si no se ha podido realizar el bloqueo mecánico del mismo.

En todo caso, el órgano de accionamiento del dispositivo de desconexión debería tener un diseño apropiado para realizar su bloqueo. También es aconsejable que facilite la colocación de señales de «prohibido maniobrar»

© Ediciones Paraninfo

complementadas, en caso necesario, con los datos que permitan la identificación del responsable de la desconexión, la fecha y hora de su ejecución y el teléfono de contacto (Figura 21.33).



Figura 21.33. Señales de prohibido maniobrar aparatos de corte.

Muchos de los aparatos de maniobra, sobre todo los utilizados en las instalaciones de alta tensión, emplean fuentes de energía auxiliar para su accionamiento, motores eléctricos, aire comprimido o energía acumulada mediante resortes. Todas estas fuentes auxiliares y de energía deben desactivarse.

En el caso de los seccionadores, otra forma de prevenir su reconexión consiste en el bloqueo físico, que se logra intercalando una placa de material aislante, con las características de aislamiento adecuadas, y diseñada especialmente para tal fin (Figura 21.34).

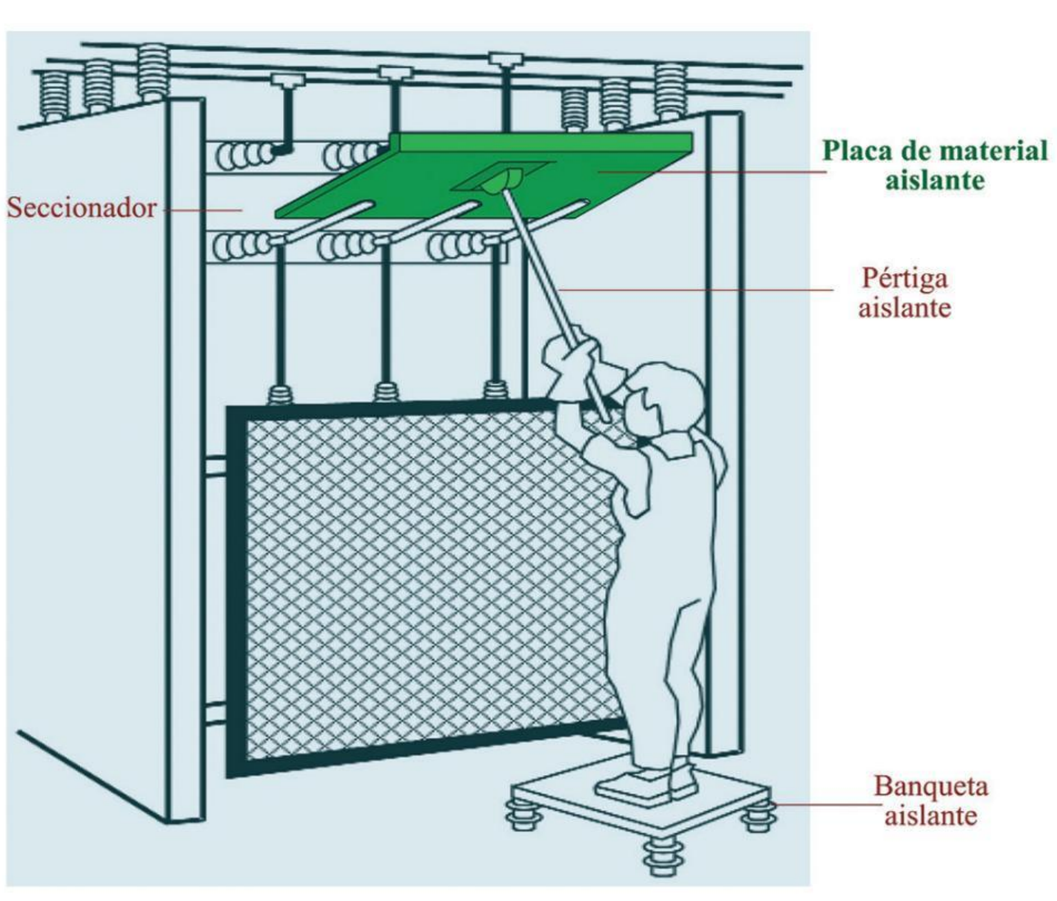


Figura 21.34. Bloqueo físico de un seccionador con placa aislante.

Un ejemplo de bloqueo eléctrico para realizar trabajos a baja tensión en las líneas de enlace de un edificio de viviendas sería el retirar y guardar los fusibles generales, que se alojan en la caja general de protección (CGP), mientras duren los trabajos eléctricos.

3.ª regla. Verificar la ausencia de tensión

La ausencia de tensión deberá verificarse en todos los elementos activos de la instalación eléctrica en, o lo más cerca posible de, la zona de trabajo. En el caso de alta tensión, el correcto funcionamiento de los dispositivos de verificación de ausencia de tensión deberá comprobarse antes y después de dicha verificación.

Para verificar la ausencia de tensión en cables o conductores aislados que puedan confundirse con otros existentes en la zona de trabajo, se utilizarán dispositivos que actúen directamente en los conductores (pinchacables o similares), o se emplearán otros métodos, siguiéndose un procedimiento que asegure, en cualquier caso, la protección del trabajador frente al riesgo eléctrico.

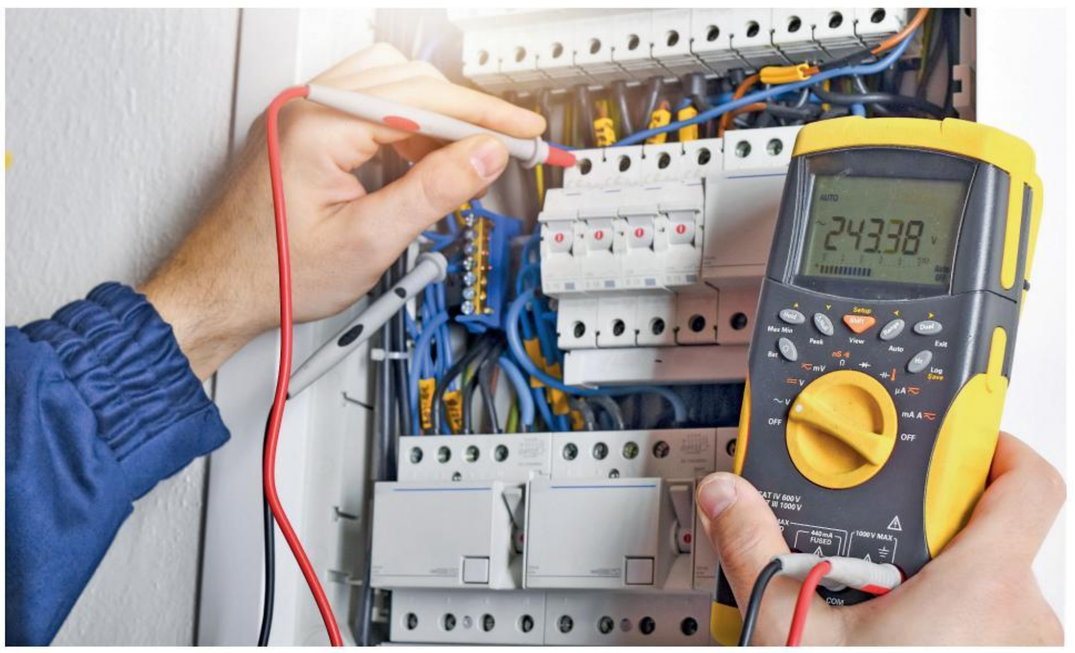


Figura 21.35. Verificación de la ausencia de tensión.

La verificación de la ausencia de tensión debe hacerse en cada una de las fases y en el conductor neutro, en caso de existir. También se recomienda verificar la ausencia de tensión en todas las masas accesibles susceptibles de quedar eventualmente en tensión.

Se pueden utilizar discriminadores que permiten comprobar si existe tensión y, en caso de existir, a qué valor corresponde en la gama de tensiones normalizadas de 230 o 400 voltios, sin necesidad de indicar el valor exacto.

4.ª regla. Poner a tierra y en cortocircuito

La etapa de puesta a tierra y en cortocircuito, de los elementos que pudieran ponerse accidentalmente en tensión, es la que verdaderamente va a garantizar la situación de seguridad de los trabajadores/as durante la realización de los trabajos.

© Ediciones Paraninfo

Las partes de la instalación donde se vaya a trabajar deben ponerse a tierra y en cortocircuito:

- En las instalaciones de alta tensión.
- En las instalaciones de baja tensión que, por inducción, o por otras razones, puedan ponerse accidentalmente en tensión.

Este riesgo ha de ser evaluado previamente en función de las circunstancias que concurran y, en general, se deberá proceder a la puesta a tierra y en cortocircuito cuando se presenten riesgos similares a los que pueden afectar a las instalaciones de alta tensión. Esto puede ocurrir, por ejemplo, en los trabajos realizados en líneas aéreas de baja tensión, sobre todo las construidas con conductores desnudos. Estas líneas podrían entrar accidentalmente en tensión debido a diferentes causas:

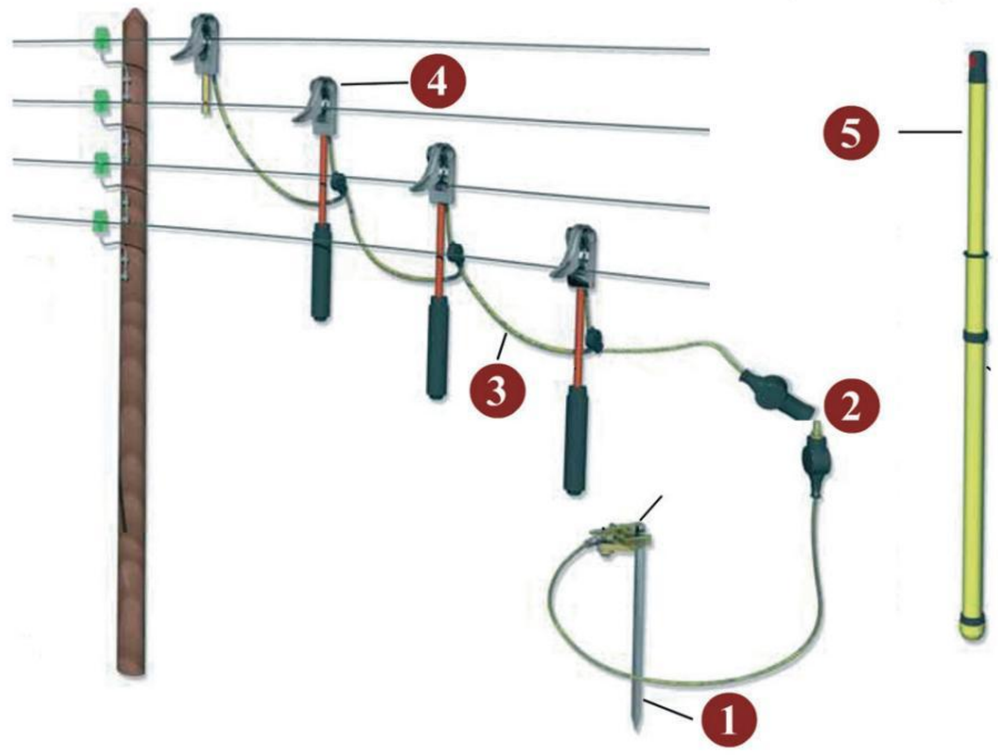
- Por inducción debida a los campos electromagnéticos producidos por otras líneas aéreas, de alta o baja tensión, que discurran en las inmediaciones.
- Por inducción debida a campos electromagnéticos de alta frecuencia producidos por antenas radioemisoras cercanas.
- Por descargas atmosféricas en forma de rayo.
- Por contacto fortuito de la línea en la que se trabaja con un conductor de otra línea o instalación en tensión, etcétera.

Por el contrario, en las instalaciones de baja tensión que no puedan ponerse accidentalmente en tensión no es necesario colocar la puesta a tierra y el cortocircuito en la zona de trabajo.

Una puesta a tierra y en cortocircuito de la instalación colocada correctamente constituye una medida preventiva de gran eficacia para proteger a los trabajadores de la exposición a diferencias de potencial peligrosas, originadas por averías, errores o situaciones que puedan transmitir o inducir en la instalación tensiones imprevistas. Esta medida es la que garantiza el mantenimiento de la situación de seguridad durante todo el tiempo que duran los trabajos en la instalación. Sin embargo, para que la protección sea efectiva es necesario garantizar que la puesta a tierra esté correctamente instalada.

Los equipos o dispositivos de puesta a tierra y en cortocircuito deben conectarse en primer lugar a la toma de tierra y a continuación a los elementos a poner a tierra, y deben ser visibles desde la zona de trabajo.

Los conductores utilizados para efectuar la puesta a tierra, el cortocircuito y, en su caso, el puente, deberán ser adecuados y tener la sección suficiente para la corriente de cortocircuito de la instalación en la que se colocan.



1. Piqueta o electrodo de toma de tierra.
2. Pinza o grapa de conexión a la toma de tierra.
3. Conductores de puesta a tierra y en cortocircuito.
4. Pinzas para conectar a los conductores de la instalación.
5. Pértiga aislante.

Figura 21.36. Ejemplo de equipo portátil de puesta a tierra y en cortocircuito (CATU).

La secuencia de operaciones para colocar una puesta a tierra y en cortocircuito en baja tensión podría ser la siguiente:

- Comprobar el verificador de ausencia de tensión.
- Comprobación visual del buen estado del equipo de puesta a tierra y cortocircuito.
- Comprobación visual del buen estado del equipo de protección individual, especialmente de los guantes aislantes para baja tensión.
- Ponerse los guantes aislantes, las gafas inactínicas, la pantalla facial, el casco de seguridad y, si procede, el arnés o cinturón de seguridad (si la pantalla facial es inactínica, no son necesarias las gafas).
- Situarse sobre la banqueta, tarima o alfombra aislante, cuando proceda.
- Verificar la ausencia de tensión entre fases y entre cada fase y neutro, mediante un verificador de tensión o un voltímetro (comprobar antes su funcionamiento).
- Conectar la pinza de puesta a tierra en el conductor de protección o en la toma de tierra del cuadro de baja tensión.
- Conectar las pinzas del equipo al neutro y a cada una de las tres fases mediante las pértigas adecuadas para baja tensión, si se trata de líneas aéreas, o bien mediante los terminales adecuados si se trata de cuadros de baja tensión (en este último caso, también se puede realizar la conexión mediante cartuchos diseñados para insertar en los portafusibles, una vez retirados los fusibles del cuadro).

© Ediciones Paraninfo

En las Figuras 21.37 y 21.38 se muestra el equipo de protección individual requerido para la colocación y la retirada de la puesta a tierra en baja tensión.

EQUIPO DE PROTECCIÓN INDIVIDUAL

- GUANTES AISLANTES
- GAFAS O PANTALLAS FACIALES (Riesgo de arco eléctrico)
- ARNÉS O CINTURÓN DE SEGURIDAD (Riesgo de caída en altura)
- CASCO DE SEGURIDAD AISLANTE
- GUANTES DE PROTECCIÓN (Riesgo mecánico y arco eléctrico)
- ROPA Y CALZADO DE TRABAJO ADECUADA

Figura 21.37. Equipo de protección individual para trabajos eléctricos.



Figura 21.38. Equipo de protección individual (CATU).

5.ª regla. Proteger frente a los elementos próximos en tensión y establecer una señalización de seguridad para delimitar la zona de trabajo

Una vez realizadas todas la etapas anteriores, se debe comprobar si en las proximidades a la zona de trabajo existen elementos que tengan que permanecer en tensión durante la realización del trabajo. En este caso cabe optar por tres posibles soluciones: considerar los trabajos como:

- Trabajos en proximidad.
- Trabajos en tensión.
- Bien colocando barreras protectoras para aislar la zona de trabajo de los elementos en tensión (Figura 21.39).

En lo concerniente a la señalización destinada a delimitar la zona de trabajo, aun siendo un trabajo sin tensión, resultará necesaria cuando se precise realizar una separación entre la zona segura donde se realizan los trabajos sin tensión y la zona de proximidad, en la cual no se debe entrar salvo que se tomen las medidas correspondientes a los trabajos en proximidad. También puede servir para delimitar la zona a la cual solo pueden acceder las personas con permiso para realizar los trabajos.

La señalización y delimitación se pueden efectuar utilizando vallas, cintas o cadenas aislantes diseñadas al efecto, así como señales de peligro, prohibición u obligación, que cumplan lo establecido en el Real Decreto 485/1997, de 14 de abril, sobre señalización de seguridad y salud en el trabajo (Figura 21.40).

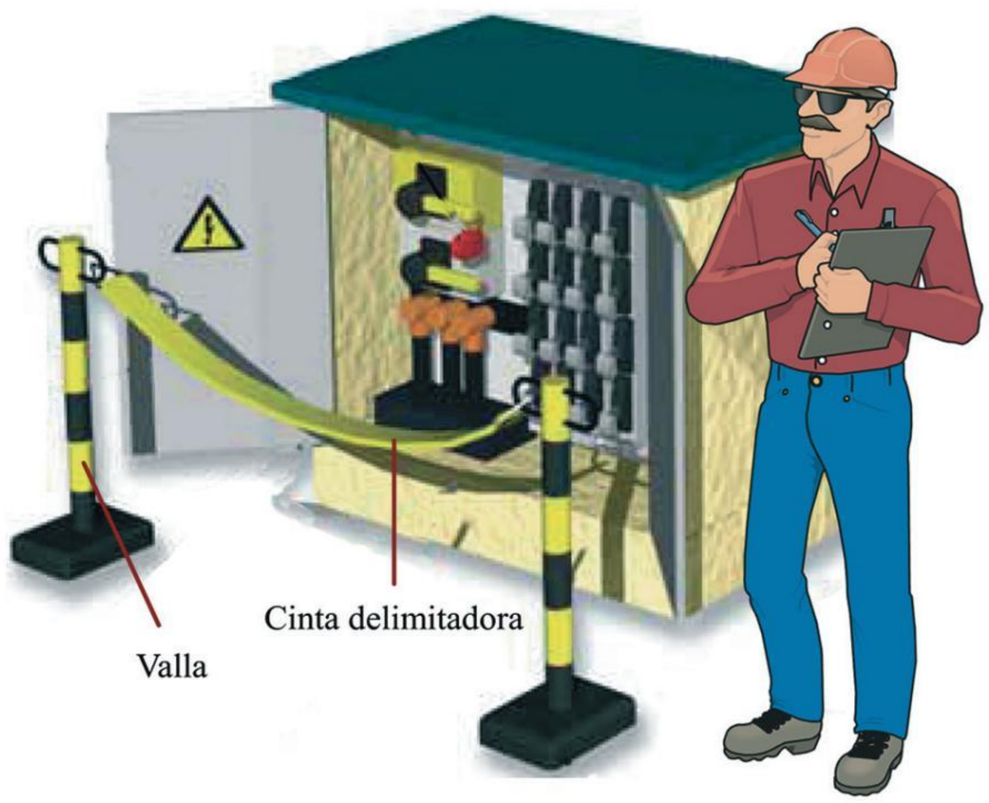


Figura 21.39. Ejemplo de delimitación de la zona de trabajo mediante barrera protectora.

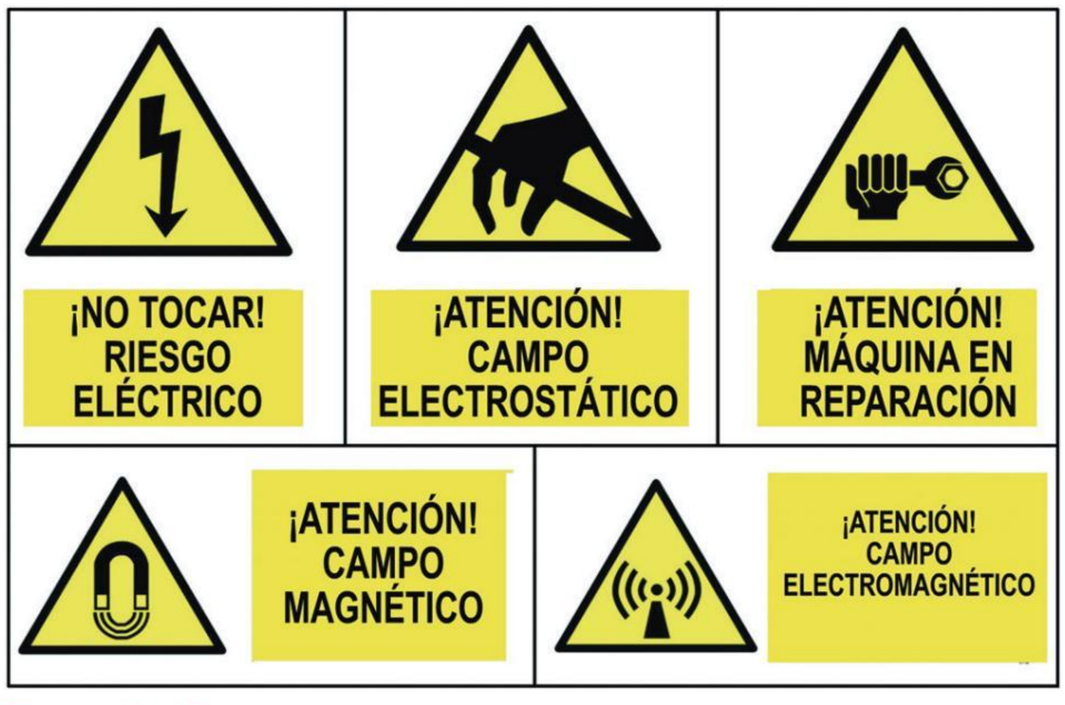


Figura 21.40. Ejemplo de señales de advertencia.

Los trabajos en proximidad son aquellos que se realizan cerca de elementos en tensión. Para más información sobre los procedimientos de actuación de este tipo de trabajos consulta el R.D. 614/2001, de 8 de junio, sobre disposiciones mínimas para la protección de la salud y seguridad de los trabajadores frente al riesgo eléctrico y su Guía Técnica de Aplicación que podrás encontrar en el MATERIAL WEB que se ha elaborado para este texto.

© Ediciones Paraninfo

Reposición de la tensión

La reposición de la tensión solo comenzará, una vez finalizado el trabajo, después de que se hayan retirado todos los trabajadores que no resulten indispensables y que se hayan recogido de la zona de trabajo las herramientas y los equipos utilizados.

El proceso de reposición de la tensión comprenderá:

1.º La retirada, si las hubiera, de las protecciones adicionales y de la señalización que indica los límites de la zona de trabajo.

2.º La retirada, si la hubiera, de la puesta a tierra y en cortocircuito.

3.º El desbloqueo y/o la retirada de la señalización de los dispositivos de corte.

4.º El cierre de los circuitos para reponer la tensión.

Desde el momento en que se suprima una de las medidas inicialmente adoptadas para realizar el trabajo sin tensión en condiciones de seguridad, se considerará en tensión la parte de la instalación afectada.

Los equipos de protección individual (EPI) utilizados en los trabajos de reposición de la tensión han de cumplir los mismos requisitos que los utilizados en la desconexión de la instalación.

21.7.3. Trabajos en tensión

Los trabajos en tensión representan una elevada probabilidad de sufrir un choque eléctrico. La estadística de accidentes nos indica que un 40 % de los accidentes de origen eléctrico se originan mientras se realizan trabajos en tensión, por lo que dichos trabajos solo podrán ser realizados por trabajadores cualificados (Tabla 21.12), siguiendo un procedimiento previamente estudiado y, cuando su complejidad o novedad lo requiera, ensayado sin tensión.

Los trabajos en lugares donde la comunicación sea difícil, por su orografía, confinamiento u otras circunstancias, deberán realizarse estando presentes, al menos, dos trabajadores con formación en materia de primeros auxilios.

El método de trabajo empleado y los equipos y materiales utilizados deberán asegurar la protección del trabajador frente al riesgo eléctrico, garantizando, en particular, que el trabajador no pueda contactar accidentalmente con cualquier otro elemento a potencial distinto al suyo.



Figura 21.41. Ejemplos de señales de obligación para trabajos eléctricos.

Entre los equipos y materiales citados se encuentran:

- Los accesorios aislantes (pantallas, cubiertas, vainas, etc.) para el recubrimiento de partes activas o masas.
- Los útiles aislantes o aislados (herramientas, pinzas, puntas de prueba, etc.).
- Las pértigas aislantes.
- Los dispositivos aislantes o aislados (banquetas, alfombras, plataformas de trabajo, etc.).
- Los equipos de protección individual frente a riesgos eléctricos (guantes, gafas, cascos, etc.).

Tabla 21.12. Cuadro resumen de la formación/capacitación mínima de los trabajadores

	Trabajos sin tensión		Trabajos en tensión	
	Supresión y reposición de la tensión	Ejecución de trabajos sin tensión	Realización	Reponer fusibles
Baja tensión	**A**	**T**	**C**	**A**
Alta tensión	**C**	**T**	**C + AE** (con vigilancia de un jefe de trabajo)	**C** (a distancia)

T = Cualquier trabajador A = Autorizado
C = Cualificado
C + AE = Cualificado y autorizado por escrito
* Los trabajos con riesgos eléctricos en AT no podrán ser realizados por trabajadores de una empresa de trabajo temporal (RD 616/1999).

© Ediciones Paraninfo

21.8. Primeros auxilios en los accidentes eléctricos

Por lo general, la vida de una persona que ha sufrido un accidente eléctrico depende de la rapidez con que le sean aplicados los primeros auxilios en el lugar del accidente.

Las tensiones por encima de 50 voltios pueden ser peligrosas y alcanzando los 100 voltios pueden ser mortales, según las circunstancias.



Figura 21.42. Ejemplos de señales relativas a los equipos de salvamento o socorro.

En estos casos, lo primero que hay que hacer es interrumpir el circuito eléctrico y procurar separar al accidentado del contacto eléctrico lo más rápido posible, tomando las debidas medidas de precaución personal para evitar la electrocución del propio socorrista. En caso de peligro, se puede retirar al accidentado con un objeto aislante y perfectamente seco, como un palo, una cuerda, etc. Esto se hace todavía más necesario en los caso de ALTA TENSIÓN, donde hay que aislarse perfectamente los pies y las manos con calzado y guantes aislantes, utilizando pértigas aislantes, banquetas, etcétera.

El siguiente paso a llevar cabo si el accidentado no respira es aplicar con rapidez la respiración artificial y el masaje cardiaco si fuese necesario. Además, se debe avisar rápidamente a un médico. En el caso de que el pulso y la respiración fuesen normales después del accidente, es necesario colocar al accidentado de costado, retirándole las prótesis dentales y la sangre que pudiera existir en la boca, y procurando dejar libres las vías respiratorias.

En el caso de tener que aplicar la respiración artificial, se coloca al accidentado en el suelo y boca arriba. Se aflojan las vestiduras y se inspecciona la cavidad bucal con el objeto de eliminar aquellos objetos que pudieran impedir nuestra tarea. Seguidamente, el socorrista se arrodilla al lado del accidentado, le tapa la nariz, aspira profundamente e insufla aire con fuerza en la boca de dicho accidentado, procurando sujetar, al mismo tiempo, la cabeza hacia atrás del mismo. Una vez hecho esto, se le ayuda a expulsar el aire de los pulmones oprimiéndole el pecho. Esta operación se debe repetir unas quince veces por minuto, hasta que respire por sí solo.

Estos primeros auxilios pueden salvar la vida de una persona, aun después de transcurridos varios minutos, incluso horas de aplicación ininterrumpida. Por eso es muy importante saber que aunque un accidentado no respire no significa su muerte y, por supuesto, conocer la técnica de la respiración artificial (Figura 21.43).



Figura 21.43. Técnica de reanimación mediante respiración artificial.

Tabla 21.13. Recomendaciones a seguir en caso de electrocución

	Cualquiera que sea la causa del accidente eléctrico, nunca toques al accidentado con las manos al desnudo a menos que estés absolutamente seguro de que no existe peligro para ti	
Tratamiento		1. Desconecta el aparato eléctrico supuestamente causante de la electrocución o extrae el fusible.
		2. Retira al accidentado del contacto eléctrico usando materiales no conductores tales como palos de madera, ropa seca, etcétera.
		3. Pide ayuda.
		4. Si la respiración y el pulso se han detenido, se DEBEN COMENZAR LAS TÉCNICAS DE REANIMACIÓN.

© Ediciones Paraninfo

Comprobación práctica en el laboratorio

21.1. **Realización práctica de las cinco reglas de oro.** Consigue los elementos necesarios para la aplicación de las cinco reglas de oro para realizar trabajos en ausencia de tensión (incluido el equipo de protección individual) y realiza una práctica de trabajo sin tensión, consistente en la revisión de uno de los cuadros del aula-taller, siguiendo dichas reglas. Elabora un procedimiento escrito para llevar a cabo dichos trabajos sin tensión.

21.2. **Seguridad en el aula-taller.** Determina los riesgos eléctricos que representan las actividades prácticas que realizas en el aula-taller. Además, analiza los sistemas de protección para la prevención de accidentes eléctricos en dicha aula y comprueba si cumplen la normativa vigente. Para terminar, elabora un informe detallado con las instrucciones de su utilización en el aula con el fin de que los trabajos realizados sean seguros.

21.3. **Equipo de protección individual.** Señala si es aconsejable llevar a cabo trabajos en tensión en tu aula-taller. En el caso de que fuese inevitable realizarlos, indica de qué constaría el equipo de protección individual para realizar los trabajos de forma segura.

Al finalizar cada una de estas actividades deberás elaborar un informe-memoria sobre la actividad desarrollada, indicando los resultados obtenidos y estructurándolos en los apartados necesarios para una adecuada documentación de las mismas (descripción del proceso seguido, medios utilizados, esquemas y planos utilizados, cálculos, medidas, etc.).

© Ediciones Paraninfo

Actividades de comprobación

21.1. ¿A partir de qué intensidad de corriente por el cuerpo humano se puede producir la fibrilación cardiaca?

a) 10 mA.

b) 30 mA.

c) 50 mA.

21.2. ¿Cuáles de las trayectorias de la corriente eléctrica por el cuerpo humano son las más peligrosas?

a) Mano izquierda – pie derecho.

b) Mano derecha – mano izquierda.

c) Mano izquierda – codo izquierdo.

21.3. ¿Cuál de los tipos de corriente siguientes supone más riesgo de sufrir fibrilación ventricular?

a) C.A. de 50 Hz.

b) C.A. de 20 kHz.

c) C.C.

21.4. La impedancia del cuerpo humano:

a) Aumenta con la tensión de contacto.

b) Disminuye con la tensión de contacto.

c) Permanece constante con la tensión de contacto.

21.5. Un receptor que posee un aislamiento suplementario pero sin medios de protección por puesta a tierra es de clase:

a) I.

b) II.

c) III.

21.6. ¿Cuál será el índice de protección IP de la envolvente de un aparato eléctrico, si está fabricado para ser protegido totalmente contra la entrada de polvo y contra el lanzamiento de agua en todas las direcciones.

a) IP25.

b) IP66.

c) IP65.

21.7. ¿En cuál de estos sistemas no hay que poner las masas a tierra?

a) Protección mediante material eléctrico de clase II.

b) Protección mediante separación eléctrica.

c) Esquema TT.

21.8. La protección por medio de obstáculos es una medida de protección contra:

a) Contactos directos.

b) Contactos indirectos.

c) Contactos directos e indirectos.

21.9. Las tensiones de contacto máximas admitidas, como medida de protección, para que la corriente que pueda circular por una persona, en caso de accidente, no sean peligrosas son:

a) 50 V en locales húmedos y 24 V en locales secos.

b) 24 V en locales húmedos y 50 V en locales secos.

c) 50 V para todo tipo de locales.

21.10. Un contacto indirecto se produce:

a) Al tocar el chasis de un electrodoméstico en el que existe un fallo de aislamiento.

b) Al tocar dos fases activas de una instalación.

c) Al tocar con la mano una fase y la tierra con los pies.

21.11. En un local comercial que posea servicios públicos (baños), ¿cuál sería la sensibilidad mínima que debería poseer el interruptor diferencial para la protección de contactos indirectos?

a) 300 mA.

b) 10 mA.

c) 30 mA.

21.12. En una instalación con puesta a tierra de las masas, es recomendable que la resistencia de la puesta a tierra sea:

a) Alta.

b) Baja.

c) Por encima de 1.000 Ω.

21.13. ¿En torno a qué corriente la persona que sufre un choque eléctrico todavía tiene el suficiente control muscular para poder soltarse de la fuente del contacto eléctrico?

a) Por debajo de 10 mA.

b) Por encima de 10 mA.

c) 30 mA.

© Ediciones Paraninfo

21.14. La realización de trabajos en tensión puede efectuarla solamente un trabajador:

a) Cualquier trabajador.

b) Autorizado.

c) Cualificado.

21.15. Indica el orden de operación seguro para la supresión de la tensión en «trabajos sin tensión».

a) Verificación de la ausencia de tensión antes de comenzar los trabajos.

b) Proteger frente a elementos próximos en tensión, en su caso, y establecer una señalización de seguridad para delimitar la zona de trabajo.

c) Desconectar todas las fuentes de tensión mediante interruptores o seccionadores que aseguren que sea imposible su cierre inesperado.

d) Prevenir posibles realimentaciones de la tensión durante la realización de los trabajos, o antes de dar por finalizados los mismos.

e) Poner a tierra y en cortocircuito todas las fuentes de tensión.

21.16. ¿Qué elemento no puede abrir y cerrar un circuito, si la corriente a interrumpir o establecer es la normal, es decir, cuando la carga está conectada?

a) Seccionador.

b) Interruptor automático.

c) Interruptor.

21.17. ¿Qué es lo primero que se recomienda hacer en el caso de tener que asistir a un accidentado por un choque eléctrico?

a) Aplicarle las técnicas de reanimación.

b) Comprobar que no está conectado todavía a la fuente de tensión.

c) Llamar a los servicios de urgencias.

21.18. ¿Cuál de las siguientes medidas de protección para la prevención de contactos eléctricos indirectos no es adecuada?

a) Inaccesibilidad de elementos conductores y masas.

b) Doble aislamiento.

c) Conexión equipotencial de las masas.

21.19. ¿Qué es el doble aislamiento?

a) Consiste en colocar o situar las masas y los elementos conductores de tal modo que sea imposible tocar, de manera involuntaria, un conductor y una o dos masas de modo simultáneo.

b) Consiste en separar el circuito de utilización de la fuente de energía manteniendo aislados de tierra todos los conductores del circuito.

c) Utilización de un aislamiento especial reforzado entre las partes activas y las masas accesibles.

21.20. ¿Cuál de los símbolos que se indican en la Figura 21.44 se emplea en la placa de características de un transformador de aislamiento?

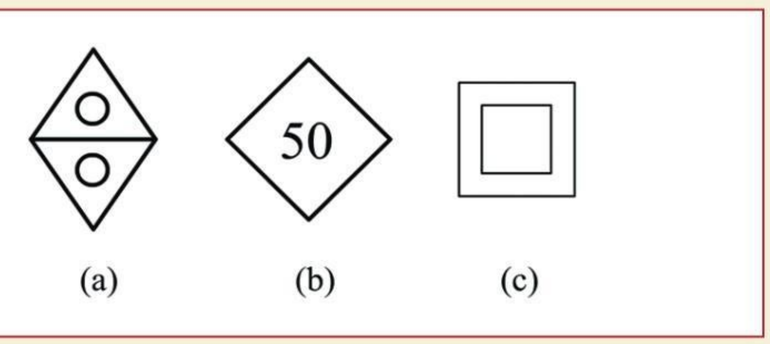


Figura 21.44.

21.21. Determina la intensidad de la corriente y los efectos que producirá el contacto de una tensión eléctrica alterna de 100 V/50 Hz en una persona si la resistencia de su cuerpo se estima en 2.000 Ω y la duración del contacto es de 1 s (consulta el cuadro de la Figura 21.5).

21.22. En una instalación eléctrica con esquema TT, la resistencia de la toma de tierra y los conductores de protección de las masas es de 400 Ω. Calcula la tensión de contacto máxima que aparecerá en el chasis de un motor eléctrico si se produce un fallo de aislamiento en una de las fases de conexión. El circuito está protegido mediante un interruptor diferencial de 300 mA de sensibilidad. ¿Es efectiva esta protección?

21.23. Un local de carácter húmedo posee una instalación de puesta a tierra con una resistencia de 600 Ω. ¿Cuál será la sensibilidad del interruptor diferencial asociado a esta toma de tierra para la protección contra contactos eléctricos indirectos para que su funcionamiento sea eficaz?

© Ediciones Paraninfo

Actividades de ampliación

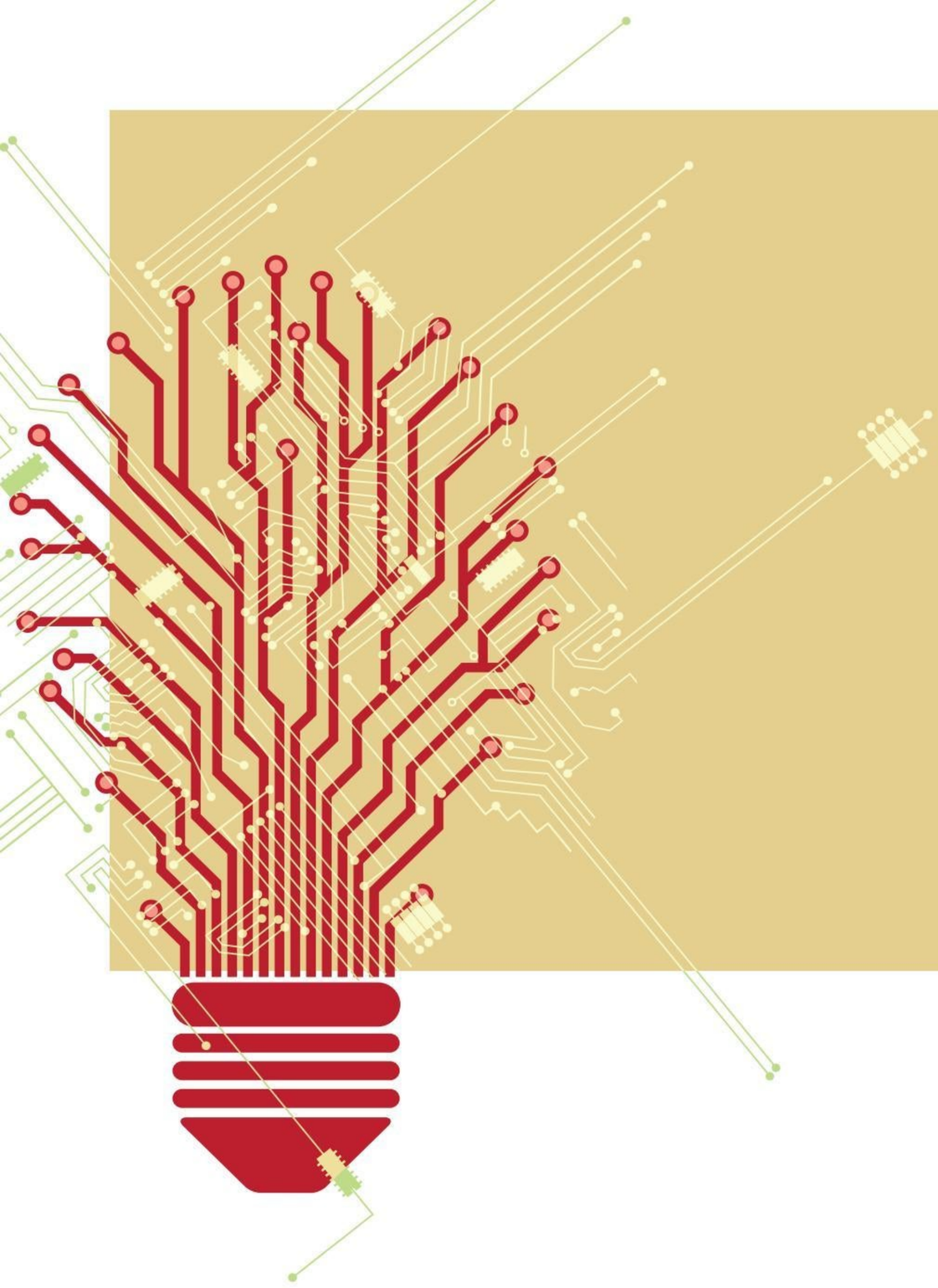
21.1. Consulta en el MATERIAL WEB que se ha elaborado para este texto los artículos 14 y 29 de la Ley de Prevención de Riesgos Laborales, e indica las obligaciones de los empresarios y trabajadores en la prevención de riesgos.

21.2. Consulta en el MATERIAL WEB que se ha elaborado para este texto el R.D. 485/1997 sobre disposiciones mínimas en materia de señalización de seguridad y salud en el trabajo, y haz un resumen en el que aparezcan las señales utilizadas de obligación, prohibición, advertencia, salvamento y socorro y contraincendios.

21.3. Consulta en el REBT las prescripciones reglamentarias relativas a los locales que contienen bañera o ducha, dentro de las instalaciones interiores para viviendas. Indica los sistemas de protección indicados para garantizar la seguridad.

21.4. Consulta en el MATERIAL WEB que se ha elaborado para este texto los documentos: «*Modelo de examen del REBT categoría básica*» y «*Modelo de examen del REBT categoría especialista*», donde podrás encontrar un modelo de examen para la obtención del Certificado de Cualificación Individual en Baja Tensión para Instaladores Autorizados en Baja Tensión en la categoría básica y otro para la categoría especialista. Aquí se incluyen dos partes: a) Preguntas tipo test sobre el REBT y b) Ejercicios prácticos sobre el REBT.

© Ediciones Paraninfo



Solución a las actividades de comprobación

1.1. b)
1.2. c)
1.3. a)
1.4. c)
1.5. b)
1.6. 21 mA
1.7. b) y c)
1.8. b)
1.9. c)
1.10. c)

2.1. a)
2.2. b)
2.3. 30 mA
2.4. 125 V
2.5. 115 Ω
2.6. b)
2.7. a)
2.8. 95 m
2.9. b)
2.10. b)
2.11. c)
2.12. 0,3 mm^2
2.13. 6,17 Ω
2.14. 66,05 Ω; 4 ºC
2.15. b)
2.16. c)

3.1. $P = 75$ W; $R = 133$ Ω
3.2. $U = 237$ V; $I = 3{,}16$ A
3.3. a) $I = 13$ A; $R = 17{,}64$ Ω; b) $P = 686$ W
3.4. 20 A
3.5. 119 W
3.6. a) 10,87 A; b) 21,16 Ω; c) 150 kWh
3.7. 19,5 m
3.8. a) 5,52 A; b) 105,98 €
3.9. a)
3.10. c)

4.1. b)
4.2. c)
4.3. 3.456 kcal
4.4. 1 hora
4.5. 88,5 %
4.6. c)
4.8. $S = 6$ mm^2; $\delta = 4{,}3$ A/mm^2
4.9. $S = 4$ mm^2; $\delta = 6{,}5$ A/mm^2
4.10. Según la Tabla 4.3: 4 mm^2; sin embargo, el Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión (REBT) nos indica que para este tipo de instalaciones, por cuestión de seguridad, la sección será como mínimo de 6 mm^2.
4.11. $S = 4$ mm^2; $\delta = 2{,}18$ A/mm^2
4.12. $S = 16$ mm^2

© Ediciones Paraninfo

5.1. a)
5.2. a)
5.3. 6 A
5.4. c. puntos de iluminación: 2,3 kW; c. tomas de corriente uso general y frigorífico: 3,68 kW; c. de cocina y horno: 5,75 kW; c. de lavadora, lavavajillas y termo eléctrico: 4,6 kW; c. de tomas de corriente de cuartos de baño y cocina: 3,68 kW.
5.5. c)
5.6. a)
5.7. b)
5.8. c)
5.9. b)
5.10. a) y b)
5.11. b), c) y d)
5.12. a) y c)
5.13. a) y b)
5.14. a)
5.15. a) 15 ms; b) 80 ms; c) 450 ms; d) 10 s; e) 1 minuto; f) 7 minutos
5.16. a) y c)
5.17. a) y b)
5.18. c)
5.19. c)

6.1. $I = 0{,}5$ A; $U_1 = 100$ V; $U_2 = 70$ V; $U_3 = 60$ V; $P_1 = 50$ W; $P_2 = 35$ W; $P_3 = 30$ W; $P_T = 115$ W; $R_T = 460\ \Omega$
6.2. 21 V
6.3. 30,9 Ω
6.4. N.º 1 (105,8 Ω; 139 V; 182,1 W), n.º 2 (70,53 Ω; 92,4 V; 121 W), total (176,33 Ω; 1,31 A; 303,1 W)
6.5. 13,5 Ω; 16,7 W
6.6. $R_T = 2\ \Omega$; $I_1 = 2$ A; $I_2 = 3$ A; $I_3 = 1$ A; $I_T = 6$ A; $P_1 = 24$ W; $P_2 = 36$ W; $P_3 = 12$ W; $P_T = 72$ W
6.7. 235 Ω; 0,98 A
6.8. 4 Ω
6.9. a) $R_T = 50\ \Omega$; b) $I = 500$ mA; $I_T = 10$ A; c) $P = 250$ W; $P_T = 5.000$ W
6.10. $R_1 = 26{,}45\ \Omega$; $R_2 = 8{,}82\ \Omega$; $R_3 = 17{,}63\ \Omega$
6.11. a) y b)
6.12. a) y c)
6.13. R_T: (27 Ω, 7,4 A; 1.480 W)
6.14. a) R_1: (3,68 A; 36,8 V; 135 W)
R_2: (5 A; 100 V; 500 W)
R_3: (2,1 A; 63,08 V; 133 W)
R_4: (1,58 A; 63,08 V; 100 W)
R_T: (8,69 A; 100 V; 869 W)
6.15. 30 V
6.16. R_1: (1 V; 0,25 A); R_2: (1 V; 0,1 A)
R_3: (1 V; 0,125 A); R_T: (1 V; 0,475 A)

7.1. $I_1 = 1{,}25$ A; $I_2 = 0{,}75$ A; $I_3 = 0{,}5$ A
7.2. 0,7 V
7.3. 16 Ω
7.4. 20 Ω
7.5. R_{L1} (0,96 A; 9,6 V); R_{L2} (198 mA; 99,2 V); R_{L3} (7,14 A; 71,43 V); R_{L4} (33 mA; 99,86 V)
7.6. $I_1 = 1{,}059$ A, $I_2 = 0{,}177$ A, $I_3 = 0{,}802$ A, $I_4 = 0{,}412$ A, $I_5 = 0{,}47$ A, $I_6 = 0{,}647$ A

8.1. b)
8.2. b)
8.3. a)
8.4. c)
8.5. c)
8.6. 66 horas
8.7. a) 20 V; b) 17,4 V; 2,17 A; c) 87 %; d) 16,7 A; e) 17,6 V
8.8. a) 2 V; b) 1,99 V; 0,25 A; c) 99 %; d) 166 A; e) 1,98 V
8.9. a) $I = 50$ A; $R = 0{,}35\ \Omega$; $P = 875$ W; b) $Pu = 87{,}5$ W
8.10. a)
8.11. b)
8.12. c)
8.13. c)
8.14. a)
8.15. b)
8.16. c)
8.17. b)

9.1. c)
9.2. a)
9.3. c)
9.4. b)
9.5. c)
9.6. 0,004 C; 0,02 C; 0,1 C
9.7. 0,49 mm
9.8. $\tau = 0{,}01$ s; $t = 0{,}05$ s
9.9. $C_1 = 27$ nF ± 5 %; 630 V
$C_2 = 12$ nF ± 1 %; 250 V
$C_3 = 2{,}5$ nF ± 10 %; 400 V
9.10. Disco (6,3 nF); Tubular (3,5 nF ± 1 %)
9.11. C_1 = Naranja, naranja, verde, negro
C_2 = Verde, violeta, azul, gris
C_3 = Marrón, verde, violeta, rojo
9.12. b)
9.13. a)
9.14. b)

© Ediciones Paraninfo

9.15. $C_T = 2\ \mu F$; $Q_T = Q_1 = Q_2 = 0{,}0002$ C; $U_1 = 33{,}33$ V; $U_2 = 66{,}67$ V

9.16. $C_T = 20\ \mu F$; $Q_T = 0{,}002$ C; $Q_1 = 0{,}0005$ C; $Q_2 = 0{,}0015$ C.

10.1. b)

10.2. a)

10.3. b)

10.4. b)

10.5. $\mu = 1{,}25 \cdot 10^{-4}$ H/m

10.6. $H = 1.000$ Av/m; $B = 1{,}3$ T; $\Phi = 390$ Wb; $\mu_r = 1.034{,}5$; $\mathcal{F} = 100$ Av; $\Re = 256.410$ Av/Wb

10.7. $\Phi = 0{,}6$ mWb; $H = 300$ Av/m; $\mathcal{F} = 75$ Av

10.8. $B = 1{,}5$ T; $\Phi = 3{,}75$ mWb; $\mathcal{F} = 5.000$ Av

10.9. 18 A

10.10. 1.886 espiras

10.11. 27 Kp

10.12. 2,4 A

11.1. a) y c)

11.2. b) y c)

11.3. b)

11.4. a)

11.5. c)

11.6. b)

11.7. 450 V

11.8. 712 mV

11.9. 978 mH

11.10. 20 N

12.1. b)

12.2. c)

12.3. a)

12.4. b)

12.5. b)

12.6. c)

12.7. a)

12.8. 141 V

12.9. 200 Hz

12.10. 311 kV

12.11. $U_{máx} = 50$ V; $U = 35{,}4$ V; $T = 0{,}05$ s; $f = 20$ Hz; $\upsilon = 29$ V

12.12. $\omega = 50\ \pi$ rad/s; $T = 0{,}04$ s; $f = 25$ Hz

12.13. a) 4,24 V; b) 0 V; c) 6,67 Hz

12.14. 96 V; 252 V; 311 V; 296 V; 0 V; –96 V; –252 V; 0 V

12.15. 127 V

12.16. $I = 6{,}3$ A; $Q_C = 314$ VAR

12.17. $I = 4{,}6$ A; $P = 1.058$ W; $E = 8{,}46$ kWh

12.18. $X_L = 151\ \Omega$; $I = 2{,}65$ A; $Q_L = 1.060$ VAR; $E = 0$ kWh

13.1. b) y c)

13.2. b)

13.3. a)

13.4. a) y c)

13.5. $Z = 93\ \Omega$; $I = 2{,}47$ A; $\varphi = 57{,}5°$; $U_R = 123{,}5$ V; $U_L = 193{,}9$ V; $P = 306{,}8$ W; $Q = 479{,}1$ VAR; $S = 568{,}1$ VA; cos $\varphi = 0{,}54$

13.6. $I = 4{,}9$ mA; cos $\varphi = 0{,}49$; $U_R = 49$ V; $U_C = 87$ V; $P = 0{,}24$ W; $Q = 0{,}43$ VAR; $S = 0{,}49$ VA

13.7. $I = 7{,}06$ A; $U_R = 70{,}6$ V; $U_C = 224{,}5$ V; $U_L = 443{,}4$ V; $P = 503{,}4$ W; $Q = 1.545{,}2$ VAR; $S = 1.623{,}8$ VA; cos $\varphi = 0{,}31$ (inductivo)

13.8. cos $\varphi = 0{,}73$

13.9. Características de batería: (10 kVAR; 230 V; 604 µF); $I_{\cos\ \varphi = 0{,}6} = 72$ A; $I_{\cos\ \varphi = 0{,}95} = 46$ A

13.10. 1 µF/230 V

13.11. 7,9 µF; 193 V

13.12. $I = 0{,}52$ A; $U_1 = 130{,}9$ V; $U_2 = 99{,}1$ V; cos $\varphi = 0{,}11$; $P = 13{,}16$ W; $Q = 118{,}9$ VAR; $S = 119{,}6$ VA; $C = 6{,}3\ \mu F$

13.13. 16 mm^2

13.14. 25 mm^2; $\delta = 1$ A/mm^2

14.1. b) $S_T = 27{,}6$ kVA; cos $\varphi_T = 0{,}88$;

c) Circuito general (120 A); circ. 1 (32,6 A); circ. 2 (64 A); circ. 3 (17,4 A); circ. 4 (15,3 A); circ. 5 (1,46 A)

d) $S = 95$ mm^2

e) $Q_C = 8{,}1$ kVAR; $C = 490\ \mu F$; $U_C = 230$ V

f) Circuito de batería de condensadores (35,4 A)

14.2. a) $P_T = 8{,}7$ kW; $S_T = 10$ kVA; cos $\varphi_T = 0{,}87$; $I_T = 44$ A

b) $I_1 = 3$ A; $I_2 = 19{,}3$ A; $I_3 = 4{,}6$ A; $I_4 = 18{,}8$ A

c) 50 mm^2

d) 3,9 kVAR; 235 µF; 230 V; 17 A

e) 50 mm^2

14.3. $R = 35{,}35\ \Omega$; $X_L = 35{,}35\ \Omega$

14.4. $I_T = 2{,}2$ A; $I_R = 2$ A; $I_L = 0{,}63$ A

14.5. $I_T = 0{,}32$ A; $I_R = 0{,}3$ A; $I_L = 2{,}4$ A; $I_C = 2{,}5$ A; cos $\varphi = 0{,}95$; $P_T = 36{,}4$ W; $Q_T = 12{,}1$ VAR; $S_T = 38{,}4$ VA

14.6. $Z_T = 6{,}9\ \Omega$; $I_T = 14{,}4$ A; $I_1 = 10$ A; $I_2 = 4{,}5$ A; $I_3 = 8{,}9$ A; $P_T = 1.200$ W; $Q_T = 800$ VAR; $S_T = 1.442$ VA; FP = 0,83 (capacitivo)

14.7. $A = 2{,}8$ A; $U = 17{,}9$ V; $P_T = 140$ W; $Q_T = 20$ VAR; $S_T = 141$ VA

© Ediciones Paraninfo

14.8. $I_T = 10$ A; $I_1 = 20$ A; $U_T = 141$ V; $P_T = 1.000$ W; $Q_T = 1.000$ VAR; $S_T = 1.414$ VA; FP = 0,7

14.9. $I = 1{,}37$ A; cos $\varphi = 0{,}62$; $P = 187$ W; $Q = 235$ VAR; $S = 301$ VA

14.10. Bobina n.º 1 (0,88 A; cos $\varphi = 0{,}3$; 60,7 W), bobina n.º 2 (1,05 A; cos $\varphi = 0{,}56$; 135,2 W), total (1,91 A; cos $\varphi = 0{,}44$; 193 W)

14.11. 200 V; 15,6 Hz

14.12. $I = 0{,}52$ A; $U_1 = 112{,}2$ V; $U_2 = 99{,}1$ V; cos $\varphi = 0{,}11$; $P = 13{,}2$ W; $Q = 118{,}9$ VAR; $S = 119{,}6$ VA; $C = 71$ µF

14.13. $R_{\text{adicional}} = 109{,}8\ \Omega$

14.14. $I_C = 0{,}14$ A; $I_L = 0{,}72$ A; $I_T = 0{,}62$ A

14.15. $S = 25$ mm^2; sección (para cos $\varphi = 0{,}95$) = 25 mm^2

14.16. 125,8 Hz; 3.162 V

14.17. 10,13 µF

15.1. b)

15.2. b)

15.3. a) y c)

15.4. c)

15.5. a)

15.6. $P = 8{,}96$ kW; $Q = 7{,}9$ kVAR; $S = 11{,}95$ kVA

15.7. a) $S = 77$ kVA; $I_{L\ \text{pri.}} = 1{,}85$ A; $I_{L\ \text{sec.}} = 111$ A;
b) $S' = 51$ kVA; $I'_{L\ \text{pri}} = 1{,}23$ A; $I'_{L\ \text{sec.}} = 73{,}6$ A

15.8. 0,95

15.9. $P = 5.298$ W; $I_L = 13{,}3$ A; $I_f = 13{,}3$ A

15.10. 15.870 W; $I_L = 39{,}8$ A; $I_f = 23$ A

15.11. $I_L = 8{,}86$ A; $I_f = 5{,}12$ A; $Q = 4.665$ VAR; $S = 6.138$ VA; $R = 50{,}7\ \Omega$; $L = 189$ mH

15.12. $I_f = 3{,}7$ A; $I_L = 6{,}4$ A; $P = 666$ W; cos $\varphi = 0{,}25$

15.13. cos $\varphi = 0{,}76$; $Q = 25{,}2$ kVAR; $S = 38{,}8$ kVA

15.14. $I_L = 20{,}5$ A; $I_N = 0$; $Q_C = 3{,}5$ kVAR

15.15. a) cos $\varphi = 0{,}81$; b) $I_L = 40{,}4$ A;
c) $Q_C = 181{,}4$ kVAR ($C = 5{,}8$ µF ; 5,8 kV)
d) 13 %

15.16. $P_T = 115$ kW; $Q_T = 67$ kVAR; $S_T = 133$ kVA; cos $\varphi_T = 0{,}86$; $I_L = 322$ A

15.17. a) $A_1 = 0{,}53$ A; $A_2 = 42$ A; $A_3 = 17{,}5$ A; $A_4 = 19$ A; $A_5 = 8{,}2$ A; $A_6 = 0$, $V_1 = 380$ V; $V_2 = 220$ V; $W = 7.186$ W;
b) 10,6 kVAR; 380 V; 77,8 µF;
c) Solo se modifican: $A_1 = 0{,}43$ A; $A_2 = 34$ A; $A_7 = 16$ A

15.18. 70 mm^2

15.19. $U\ \% = 2{,}04\ \%$; $P_{pl} = 2.083$ W. Para cos $\varphi = 0{,}95$ las pérdidas son de 1.130 W

16.1. b)

16.2. a) y b)

16.3. a), b) y c)

16.4. a)

16.5. a)

16.6. c)

16.7. b)

16.8. a) y b)

16.9. $E_{ab} = 15$ mA; $E_r = 4{,}5\ \%$

16.10. Clase = 1,5

16.11. 12,5 W

16.12. 0,01 Ω

16.13. $R_{shunt} = 0{,}1\ \Omega$; $K = 0{,}125$ A/div; K (con *shunt*) = 2,5 A/div; $I = 8{,}125$ A; I (con *shunt*) = 162,5 A

16.14. Transformador de intensidad con relación 250 /5 A; $m = 50$; $I = 219{,}6$ A

16.15. $R_s = 245\ \text{k}\Omega$; K (con R_s) = 10 V/div; $K = 0{,}2$ V/div; U (con R_s) = 220 V; $U = 4{,}4$ V

16.16. Transformador de tensión con relación 11 kV/110 V; $m = 100$; $K = 220$ V/div; $U = 9.900$ V

16.17. a) y c)

16.18. b)

16.19. c)

16.20. b)

16.21. a), b) y c)

16.22. a), b) y c)

16.23. $K_{50\ \text{V} - 5\text{A}} = 10$ W/div; $K_{150\ \text{V} - 5\text{A}} = 30$ W/div; $P = 450$ W

17.1. b)

17.2. b)

17.3. c)

17.4. b)

17.5. b)

17.6. c)

17.7. a)

17.8. a)

17.9. a)

17.10. c)

17.11. a)

17.12. Lámpara fluorescente: 62,5 lm/W; lámpara incandescente: 12,5 lm/W

17.13. 250 lux

17.14. 20.000 lm

17.15. 18 lámparas

18.1. a)

18.2. c)

18.3. b)

© Ediciones Paraninfo

18.4. a)
18.5. b)
18.6. a)
18.7. a) y c)
18.8. $m = 10$; $U_2 = 23$ V
18.9. $U_1 = 373$ V; $U_2 = 1.865$ V; $m = 0{,}2$
18.10. $I_1 = 6{,}25$ A; $I_2 = 22{,}72$ A; $m = 3{,}64$
18.11. a) $m = 25{,}12$; $P_{Fe} = 20$ W; $I_0 = 0{,}15$ A
18.12. a) $I_{1n} = 16{,}66$ A; $I_{2n} = 435$ A; b) $P_{cu} = 1.571$ W;
c) $u_{cc} = 4{,}16$ %; $u_{Rcc} = 1{,}57$ %; $u_{Xcc} = 3{,}85$ %;
d) $Z_{cc} = 15\ \Omega$; $X_{cc} = 13{,}76\ \Omega$; $R_{cc} = 5{,}98\ \Omega$;
$P_{Cu}(C = 3/4) = 884$ W
18.13. $U_2 = 220$ V; $I_{cc1} = 1.148$ A; $I_{cc2} = 9.980$ A;
$U_2(2{,}5$ kVA$) = 227{,}5$ V
18.14. $\eta = 99$ %
18.15. $U_2 = 221$ V; $\eta = 95$ %; $I_{cc1} = 625$ A; $I_{cc2} = 1.087$ A
18.16. b)
18.17. c)
18.18. a)
18.19. a) $m_f = 52$; $m_L = 30$;
b) $I_0 = 0{,}2$; c) $P_{Fe} = 400$ W
18.20. a) $P_{Cu} = 4.010$ W;
b) $u_{cc} = 4$ %; $u_{Rcc} = 1{,}6$ %; $u_{Xcc} = 3{,}66$ %;
c) $U_2 = 385$ V; d) $\eta = 97{,}8$ %; e) $I_{cc} = 119$ A

19.1. a)
19.2. b)
19.3. a) y b)
19.4. c)
19.5. b)
19.6. a) y c)
19.7. b)
19.8. a)
19.9. b)
19.10. b) y c)
19.11. b)
19.12. a)
19.13. b)
19.14. I_i (arranque directo) = 973 A;
I_i (arranque con resistencia adicional) = 80 A
19.15. $I_a = 360$ A; $R_a = 0{,}29\ \Omega$
19.16. $P = 4.135$ W; $I = 38$ A
19.17. 1.333 N
19.18. 19,4 Nm
19.19. 26 CV

20.1. b)
20.2. a) y c)
20.3. 60 Hz
20.4. 8 pares de polos
20.5. 1.200 r. p. m.
20.6. b)
20.7. a)
20.8. c)
20.9. c)
20.10. 4 pares de polos
20.11. 900 r. p. m.
20.12. 5 %
20.13. 44 Nm
20.14. a) 0,6 %; b) 7,5 A;
c) $I_a = 94$ A;
d) $M_n = 13$ Nm; $M_a = 56$ Nm; $M_m = 58{,}5$ Nm
20.15. a)
20.16. a)
20.17. b) y c)
20.18. b)

21.1. b)
21.2. a) y b)
21.3. a)
21.4. b)
21.5. b)
21.6. c)
21.7. c)
21.8. a)
21.9. b)
21.10. a)
21.11. c)
21.12. b)
21.13. a)
21.14. c)
21.15. c), a), d), e) y b)
21.16. a)
21.17. b)
21.18. a)
21.19. c)
21.20. a)
21.21. 50 mA; probabilidad de fibrilación, parada cardiaca, parada respiratoria y asfixia.
21.22. 120 V, no
21.23. Alta sensibilidad (30 mA)

© Ediciones Paraninfo

Recursos de aprendizaje en el material web

Recursos de aprendizaje en el MATERIAL WEB			
1	• Magnitudes y unidades de medida • Simbología eléctrica	13	• Solución a las Actividades propuestas: 13.1-13.2-13.3 • Solución a las Actividades de evaluación resueltas (13) • Actividades de evaluación propuestas de ampliación (13)
2	• Solución a las Actividades propuestas: 2.1-2.2-2.3 • Actividades de evaluación propuestas de ampliación (2)	14	• Solución a las Actividades propuestas: 14.1-14.2-14.3 • Solución a las Actividades de evaluación resueltas (14) • Actividades de evaluación propuestas de ampliación (14)
3	• Solución a la Actividad propuesta: 3.1	15	• Solución a las Actividades propuestas: 15.1-15.2 • Solución a las Actividades de evaluación resueltas (15) • Actividades de evaluación propuestas de ampliación (15)
4	• Solución a las Actividades propuestas: 4.2-4.3 • Solución a las Actividades de evaluación resueltas (4) • Actividades de evaluación propuestas de ampliación (4)	16	• Solución a las Actividades de evaluación resueltas (16) • Actividades de evaluación propuestas de ampliación (16)
5		17	
6	• Solución a las Actividades propuestas: 6.1-6.2-6.3 • Solución a los Actividades de evaluación resueltas (6) • Actividades de evaluación propuestas de ampliación (6)	18	• Solución a las Actividades propuestas: 18.1-18.2 • Solución a las Actividades de evaluación resueltas (18) • Actividades de evaluación propuestas de ampliación (18)
7	• Solución a las Actividades propuestas: 7.1a-7.1b-7.1c-7.2 • Resolución de sistemas de ecuaciones mediante determinantes • Hojas de cálculo para la resolución de sistemas de ecuaciones • Solución a las Actividades de evaluación resueltas (7) • Actividades de evaluación propuestas de ampliación (7)	19	• Solución a las Actividades propuestas: 19.1-19.2 • Solución a las Actividades de evaluación resueltas (19) • Actividades de evaluación propuestas de ampliación (19)
8	• Solución a las Actividades propuestas: 8.1-8.2 • Actividades de evaluación propuestas de ampliación (8)	20	• Solución a las Actividades propuestas: 20.1-20.2 • Solución a las Actividades de evaluación resueltas (20) • Actividades de evaluación propuestas de ampliación (20)
9	• Solución a las Actividades propuestas: 9.1-9.2 • Solución a las Actividades de evaluación resueltas (9) • Actividades de evaluación propuestas de ampliación (9)	21	• Grados de protección IP e IK de las envolventes • Ley 31/1995, de 8 de noviembre de Prevención de Riesgos Laborales • R.D. 614/2001 de 8 de junio, sobre disposiciones mínimas para la protección de la salud y seguridad de los trabajadores frente al riesgo eléctrico • R.D. 485/1997, de 14 de abril, sobre disposiciones mínimas en materia de señalización de seguridad y salud en el trabajo • Modelo de examen del REBT categoría básica • Modelo de examen del REBT categoría especialista
10	• Solución a las Actividades propuestas: 10.1 • Solución a las Actividades de evaluación resueltas (10) • Actividades de evaluación propuestas de ampliación (10)		
11	• Solución a las Actividades propuestas: 11.1-11.2-11.3 • Solución a las Actividades de evaluación resueltas (11) • Actividades de evaluación propuestas de ampliación (11)		
12	• Solución a las Actividades propuestas: 12.1 • Conceptos básicos de trigonometría		

Instrucciones para el acceso al MATERIAL WEB

Desde la ficha web de la obra (en www.paraninfo.es) y mediante un sencillo registro desde la sección «Recursos previo registro», que encontrarás en ella, podrás acceder a todos los recursos de aprendizaje y materiales elaborados para el texto de Electrotecnia.

© Ediciones Paraninfo

Electrotecnia

Gracias a la electrotecnia son posibles el diseño, el montaje y el mantenimiento de las instalaciones eléctricas, las instalaciones de telecomunicaciones, las máquinas eléctricas y los sistemas automatizados.

Esta obra desarrolla los contenidos del módulo profesional de Electrotecnia, del Ciclo Formativo de grado medio en Instalaciones Eléctricas y Automáticas, perteneciente a la familia profesional de Electricidad y Electrónica. Además, será de gran utilidad para todos aquellos profesionales del sector eléctrico y electrónico que deseen actualizar sus conocimientos.

En esta 7.ª edición de *Electrotecnia,* totalmente actualizada, se han incluido nuevas prácticas de laboratorio y se han aumentado las actividades resueltas. Además, se han ampliado aquellos contenidos que se han considerado más relevantes para la comprensión de la materia y que han ido cambiando con la constante evolución de la tecnología.

Se ha hecho un esfuerzo especial para que los contenidos desarrollados sean claros, didácticos, y eminentemente prácticos. Siempre que se explica algún concepto teórico se incluye una actividad resuelta que sirva de ejemplo para poder entender mejor lo que se expone. Además, todos los contenidos sin excepción vienen acompañados de multitud de actividades de tipo práctico para llevar a cabo en el laboratorio de Electrotecnia.

Además se ofrece al estudiante la posibilidad de descargar y consultar multitud de recursos adicionales y material didáctico en la sección de Material web, a través de la ficha del libro en la página web **www.paraninfo.es**.

El autor, **Pablo Alcalde San Miguel,** ha ejercido su actividad profesional como profesor de Formación Profesional en ciclos formativos de la familia de Electricidad y Electrónica. Ingeniero técnico de electricidad por la Universidad de Bilbao, cuenta con una amplia experiencia tanto docente como profesional. Colabora habitualmente en publicaciones relacionadas con la electricidad y la electrónica y es autor de otros libros de formación publicados por esta editorial.

RECURSOS PARA EL PROFESORADO

- Programación didáctica
- Solucionario
- Examina
- Presentación en PowerPoint
- Material y documentación extra
- LDP (Libro Digital Proyectable)

Estos recursos son exclusivos para el profesorado que confirme con nuestro Departamento de Promoción la adopción de este título como libro de texto en el aula.

Paraninfo
ciclos formativos
www.paraninfo.es

También en Ebook

ISBN: 978-84-1366-155-1