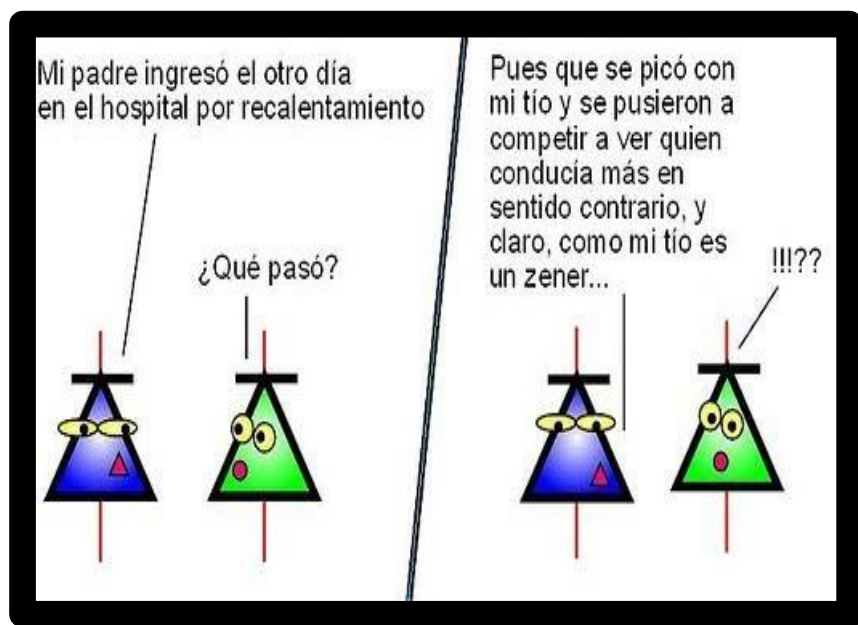


TEMA 5: O DÍODO. RECTIFICACIÓN E FONTES DE ALIMENTACIÓN

1. O DÍODO	3
1.1. POLARIZACIÓN DIRECTA DO DÍODO	4
1.2. POLARIZACIÓN INVERSA DO DÍODO	4
1.3. CURVA CARACTERÍSTICA DO DÍODO.....	5
TENSIÓN LIMIAR (V_r).	5
1.4. RECTA DE CARGA E PUNTO DE TRABALLO NUN DÍODO	6
1.5. MODELOS LINEAIS APROXIMADOS DO DÍODO.....	8
1.6. APLICACIÓNS DOS DÍODOS	12
LIMITADORES OU RECORTADORES.....	12
FIXADORES DE NIVEL	13
1.7. DÍODOS ESPECIAIS	15
DÍODO EMISOR DE LUZ LED	15
DÍODO LÁSER	15
FOTODÍODO	16
DÍODO SCHOTTKY	16
DÍODO ZENER	15
DÍODO VARICAP	16
1.8 RESOLUCIÓN CIRCUÍTOS CON DÍODOS.....	17
2. FONTES DE ALIMENTACIÓN LINEAIS.....	18
2.1. TRANSFORMADOR.....	19
2.2. RECTIFICACIÓN.....	19
RECTIFICADOR DE MEDIA ONDA	19
RECTIFICADOR DE ONDA COMPLETA CON TRANSFORMADOR DE TOMA INTERMEDIA	21

RECTIFICADOR DE ONDA COMPLETA EN PONTE DE GRAETZ	23
2.3. FILTRADO	27
FILTRADO POR CONDENSADOR.....	27
2.4. REGULACIÓN	29
REGULACIÓN CON ZENER.....	30
REGULADORES INTEGRADOS.....	32



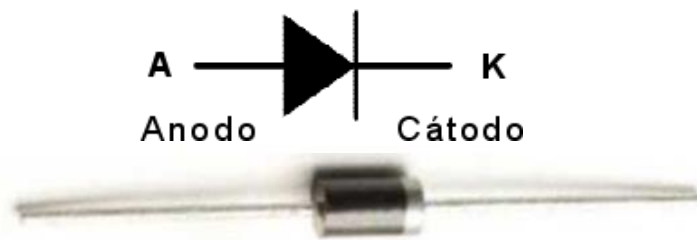
1. O DÍODO.

O díodo é un dispositivo semiconductor que “a grosso modo” actúa coma se se tratase dun interruptor (aberto/pechado), pero permitindo o paso da corrente eléctrica nunha soa dirección.



Poderíamos imaxinalo coma unha válvula que permite a circulación da corrente nun sentido pero que non deixa que se devolva.

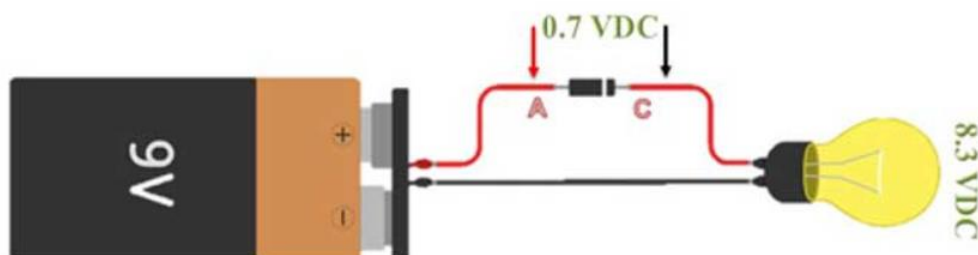
O símbolo esquemático do díodo é o que se mostra a continuación:



O terminal (+) chámase ÁNODO (A) e o terminal (-) chámase CÁTODO (K).

En electrónica, “polarizar” significa aplicar tensión eléctrica ou voltaxe a un dispositivo. Se aplicamos unha tensión externa ao díodo (por exemplo a dunha pila ou dunha batería eléctrica) podemos obter dous tipos de polarización do díodo.

1.1. POLARIZACIÓN DIRECTA DO DÍODO



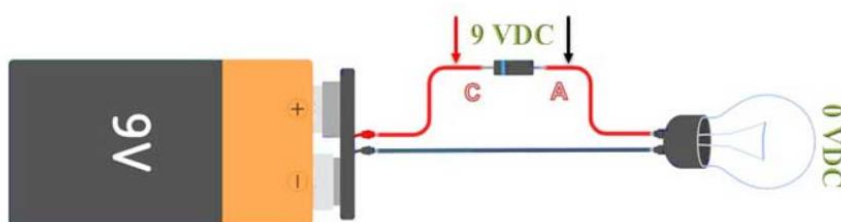
Na imaxe temos un circuío eléctrico cunha batería de 9VDC como fonte de enerxía, unha bombilla como carga eléctrica, un díodo e uns conductores eléctricos.

Cando un díodo se polariza de xeito directo, é dicir o polo positivo da fonte contra o ánodo e o negativo contra o cátodo, a partir dunha tensión determinada que chamaremos tensión limiar (0,7V no exemplo da figura) o díodo comeza a conducir.

O díodo producirá unha caída de tensión equivalente a súa barreira de potencial ou tensión limiar (no exemplo, $V_Y = 0,7V$) e comportarase como un interruptor cerrado.

A carga eléctrica do circuío tomará o resto da tensión da fonte. A lámpada é de 9V pero so lle chegarán 8,3V ($V_{\text{FONTE}} - V_Y$).

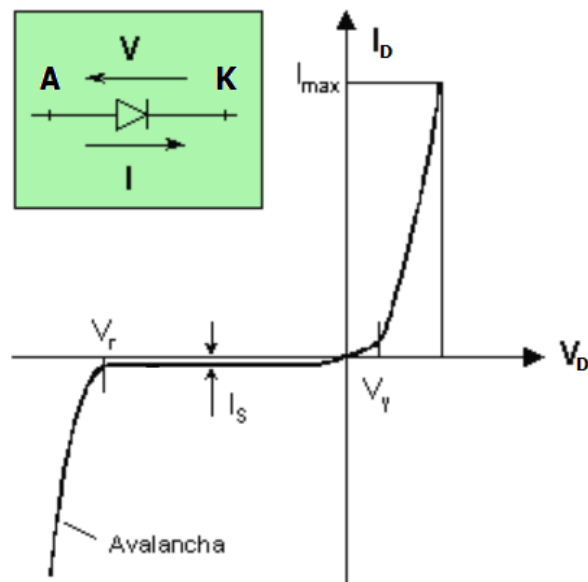
1.2 POLARIZACIÓN INVERSA DO DÍODO



Neste caso a tensión positiva da batería está conectada ao cátodo do díodo e a tensión negativa ao ánodo a través da bombilla. O díodo está polarizado inversamente e non deixa pasar a corrente. A tensión (inversa) que soporta o díodo é de 9V (V_{KA}).

1.3 CURVA CARACTERÍSTICA DO DÍODO

A curva característica do díodo é unha curva na que se representa a corrente que atravesa o díodo (I_D) en función da tensión entre os extremos do mesmo (V_D).



Curva característica do díodo REAL

A propia curva e os puntos máis importantes da mesma aparecen nas follas de características dos díodos. Algúns dos parámetros máis importantes son os seguintes.

Tensión limiar (V_V).

A tensión limiar é o valor mínimo de tensión que debe existir entre o ánodo e o cátodo para que o díodo deixe pasar a corrente. Adoita ser uns 0,6/0,7V; aínda que como veremos máis adiante, as veces utilizaremos aproximacións e tomaremos 0V como tensión limiar.

Corrente máxima (I_{max}).

É a intensidade de corrente máxima que pode conducir o díodo sen fundirse debido ao calor xerado no mesmo por efecto Joule. Dado que depende da cantidade de calor que pode disipar o díodo, depende sobre todo do deseño do mesmo.

Xeralmente danse dous valores, un medio ao que pode traballar o díodo de xeito continuado e outro de pico non repetitivo que pode alcanzarse puntualmente durante un período curto de tempo.

Nalgúns casos nas follas de características dos díodos aparece a potencia máxima disipable polo díodo que virá dada por $P_{max} = I_{max} \cdot V_{max}$

Corrente inversa de saturación (I_s).

É unha pequena corrente que se establece ao polarizar inversamente o díodo debida aos portadores minoritarios xerados debido á temperatura. Xeralmente indícase mediante unha familia de curvas I-V; unha curva para cada temperatura.

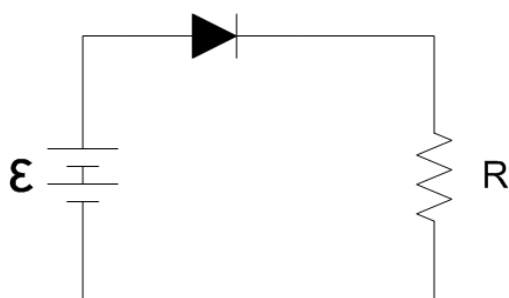
Tensión de ruptura (V_R).

É a tensión inversa máxima que o díodo pode soportar antes de darse o efecto avalancha que leva a un aumento enorme da corrente e á destrución do díodo.

1.4 RECTA DE CARGA E PUNTO DE TRABAJO NUN DÍODO

Cando cargamos un dispositivo, neste caso un díodo, cunha resistencia é posible debuxar sobre a curva característica do dispositivo a curva característica da resistencia de xeito que, como ambas deben cumprirse, o circuíto permanecerá no punto de corte de ambas curvas (punto de traballo Q).

A recta de carga é unha ferramenta fundamental para analizar o comportamento dos circuítos con transistores. Neste apartado veremos como se constrúe para un díodo. Pensemos no seguinte circuíto formado por unha fonte, un díodo e unha resistencia:



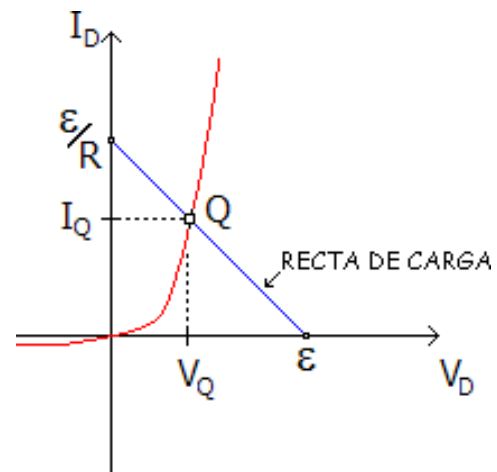
Aplicando a Lei de Ohm na resistencia, escrita en termos da corrente a través do díodo (I_D) será:

$$I_R = I_D = \frac{V_R}{R} = \frac{\varepsilon}{R} \quad (\text{Supoñendo } V_D = 0V)$$

O seguinte paso será debuxar esa recta de carga sobre a curva característica do díodo. Para debuxar unha recta so necesitamos dous puntos, por simplicidade tomaremos os cortes cos eixos de coordenadas: $I_D=0$ e $V_D=0$.

$$I_D = 0 \Rightarrow \frac{\varepsilon - V_D}{R} = 0 \rightarrow V_D = \varepsilon$$

$$V_D = 0 \Rightarrow I_D = \frac{\varepsilon}{R}$$



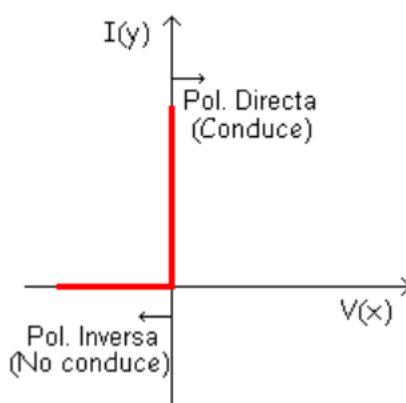
Os valores de I_Q e V_Q serán a corrente a través do díodo e a tensión entre extremos do mesmo para o circuito. Obsérvese que tanto a recta de carga como o punto de traballo dependen do valor de R como cabía esperar.

1.5 MODELOS LINEAIS APROXIMADOS DO DÍODO

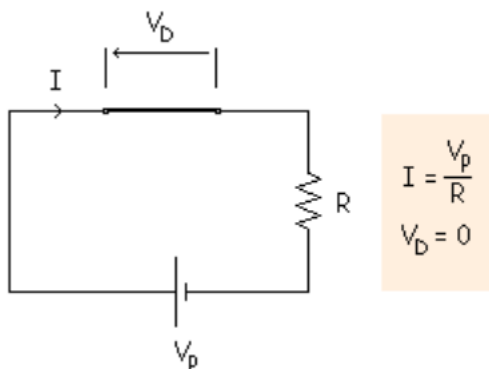
Na práctica, e co fin de simplificar a análise de circuitos con díodos, é moi común traballar con aproximacións lineais do díodo. Existen 3 modelos equivalentes lineais aproximados do díodo:

Primeira aproximación: O díodo ideal

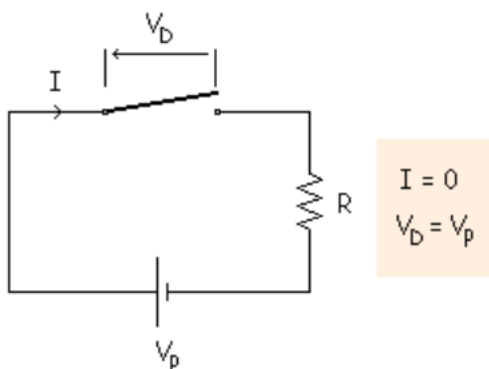
A exponencial aproxímase a unha vertical e unha horizontal que pasan polo orixe de coordenadas (A tensión limiar $V_V = 0V$). Este díodo é “ideal” (non existe na realidade) pero pode utilizarse como aproximación en moitas ocasións.



Polarización directa: É coma substituír o díodo por un interruptor cerrado:

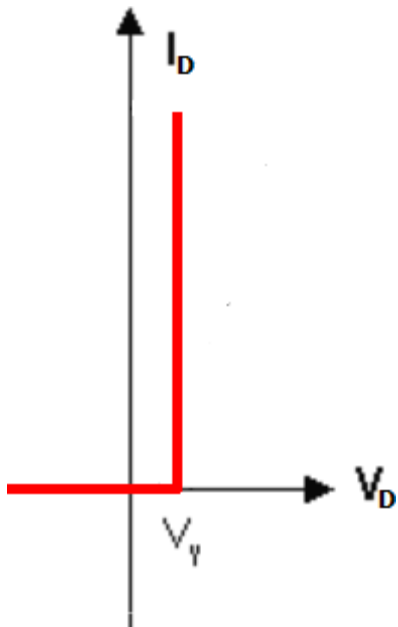


Polarización inversa: É coma substituír o díodo por un interruptor aberto.



Segunda aproximación: Aproximación lineal con tensión limiar (V_Y)

A curva aproximada do díodo resulta de supoñer que a corrente inversa de saturación (I_S) é nula e que a tensión entre extremos do díodo permanece constante no seu valor limiar (V_Y) independentemente da corrente que o atravesa.

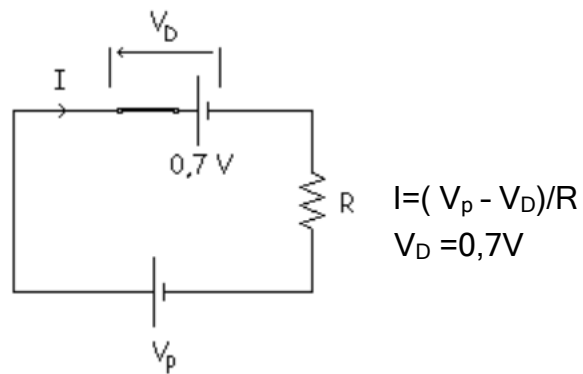


Esta curva característica aproximada resulta de máxima utilidade á hora de resolver circuítos con díodos e ademais resulta ser unha aproximación bastante boa na maior parte dos casos xa que a corrente inversa de saturación (I_S) é moi pequena e a tensión entre extremos do díodo varia moi pouco ao variar a corrente nunha marxe razoable.

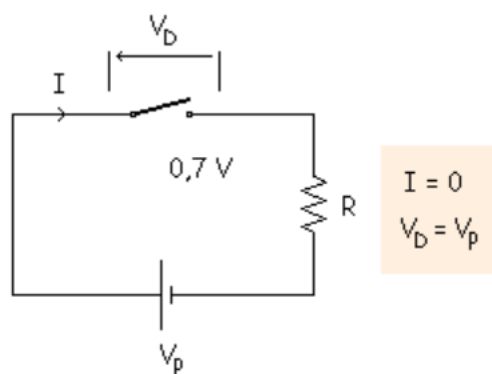
Díodo en corte $\rightarrow V_D < V_Y \rightarrow I_D = 0 \rightarrow$ Substituímos o díodo por un circuíto aberto.

Díodo en condución $\rightarrow V_D = V_Y \rightarrow I_D > 0 \rightarrow$ Substituímos o díodo por unha fonte de tensión de $\varepsilon = V_Y$ situada de xeito que se opoña ao paso de I_D .

Polarización directa:

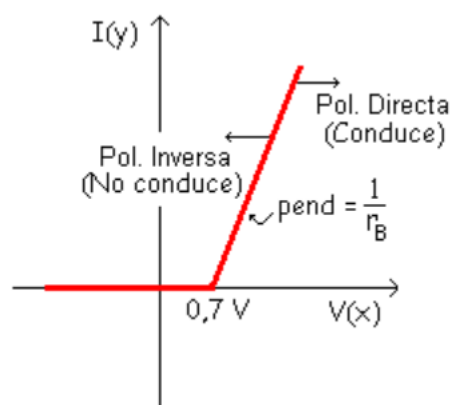


Polarización inversa:



Terceira aproximación:

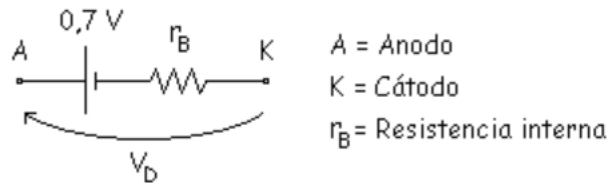
A curva do díodo aproxímase a unha recta que pasa por 0,7V e ten unha pendente de valor igual á inversa da resistencia:



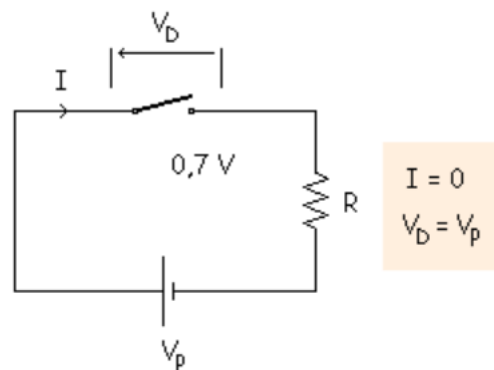
Polarización directa:

$$V_D = 0,7 + I \cdot r_B$$

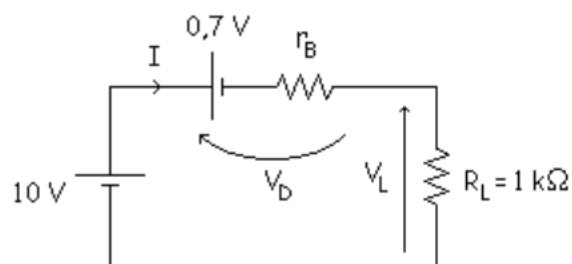
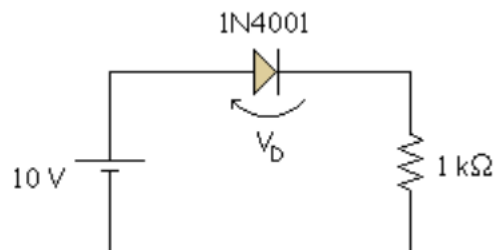
$$I = \frac{1}{r_B} \cdot V_D - \frac{0,7}{r_B}$$



Polarización inversa:



Exemplo: Resolver o seguinte circuito tomando como resistencia interna $r_B = 23\Omega$.



$$r_B = 0,23 \Omega$$

$$\text{malla: } -10 + 0,7 + (1 + 0,23 \cdot 10^{-3}) \cdot I = 0$$

$$I = \frac{10 - 0,7}{1 + 0,23 \cdot 10^{-3}} = 9,3 \text{ mA}$$

$$V_D = 0,7 + 0,23 \cdot 10^{-3} \cdot 9,3 = 0,702 \text{ V} \quad P_D = V_D \cdot I = 0,702 \cdot 9,3 = 6,5286 \text{ mW}$$

$$V_L = 10 - 0,702 = 9,298 \text{ V} \quad P_L = V_L \cdot I = 9,298 \cdot 9,3 = 86,4714 \text{ mW}$$

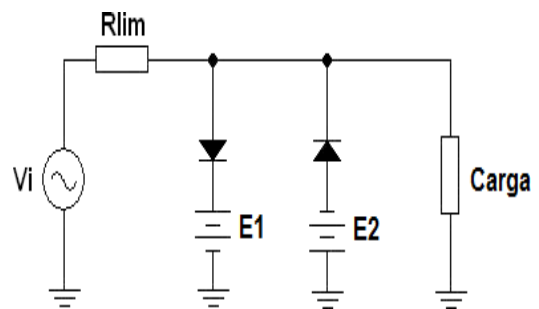
$$P_T = P_D + P_L = 6,5286 + 86,4714 = 93 \text{ mW}$$

1.6 APLICACIÓNS DOS DÍODOS

Como veremos no apartado adicado ás fontes de alimentación lineares a principal utilidade dos díodos é a rectificación. Con todo, existen outros circuítos interesantes con díodos. Neste tema falaremos dos limitadores ou recortadores e dos fixadores de nivel.

Limitadores ou Recortadores

Un limitador ou recortador é un circuíto que permite, mediante o uso de resistencias e díodos, limitar as tensións que chegan a un determinado punto dun circuíto. Mediante un limitador pódese protexer a un compoñente de tensións positivas ou negativas a partir dun determinado valor.



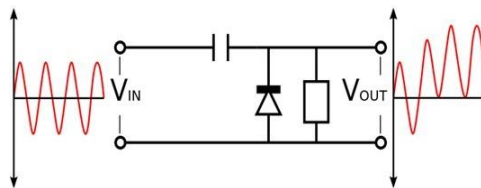
Pensemos no circuíto da figura da dereita. Imaxinemos que nos interesa protexer á carga de tensións positivas superiores a $E1+V_Y$ e de tensións negativas superiores a $E2+V_Y$. Se a tensión de entrada supera por calquera motivo o valor $E1+V_Y$ o díodo D1 quedará polarizado directamente fixando a tensión no seu ánodo ao valor $E1+V_Y$ e facendo que o resto da tensión caia en R_{lim} . Do mesmo xeito cando a tensión de entrada diminúa por debaixo de $-(E2+V_Y)$, o díodo D2 quedará polarizado directamente fixando a tensión na carga en $-(E2+V_Y)$.

A resistencia limitadora é parte imprescindible do limitador, xa que se non estivese conectada, ao polarizarse un dos díodos directamente comezaría a conducir a corrente eléctrica sen control e destruíríase. Esta resistencia ten como función limitar a corrente que atravesa os díodos, como indica o seu nome.

As fontes E1 e E2 permiten axustar as tensións máximas que o limitador permite. Sen embargo é moi habitual ver limitadores sen fontes, recortando as tensións maiores que $\pm V_Y$ nas entradas de circuítos.

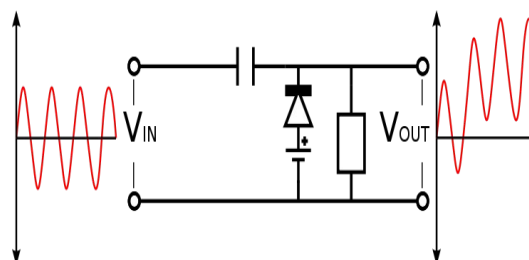
Fixadores de nivel

Un fixador é un circuío electrónico que permite engadir a un sinal electrónico unha compoñente de continua positiva ou negativa. O modelo máis básico é o que se mostra na figura da dereita.



Inicialmente, no primeiro semiciclo negativo de V_{IN} , o díodo conduce e o condensador cargase ate un valor igual $V_{IN,p}-V_Y$. Despois, durante o semiciclo positivo o díodo permanece polarizado inversamente e a tensión V_{IN} sumase ao nivel de continua almacenado no condensador. Deste xeito o valor de pico da tensión na saída do circuío será $2 \cdot V_{IN,p}-V_Y$.

Se ademais do díodo engadimos unha fonte de continua de valor E en serie con este poderemos fixar a compoñente de continua a un valor maior elevando a tensión de pico na saída ata un valor $E+2 \cdot V_{IN,p}-V_Y$.



Dando a volta ao díodo e á fonte é posible engadir ao sinal unha compoñente de continua negativa en lugar de positiva.

1.7 DÍODOS ESPECIAIS

Os díodos normais, os cales operan como se describía, fanse xeralmente de silicio ou xermanio. Ademais destes existen outros tipos de díodos, que teñen características particulares. Algúns dos mais importantes son:

Diodo emisor de luz LED



Nun díodo emítense fotóns cando se recombinan os portadores de carga na rexión de esgotamento. Construindo o díodo de xeito que se favorezan estas recombinacións e que ademais a estrutura do díodo permita a saída desa luz, o díodo emitirá luz dun xeito moi eficiente. Dependendo do material empregado, do salto enerxético entre as bandas de condución e valencia. As lonxitudes de onda que se poden xerar van dende o infravermello até o ultravioleta.

As aplicacións son moi variadas: iluminación, visualizadores, mandos a

distancia, detectores... E as súas vantaxes sobre outros emisores de luz son tamén numerosas: rendemento, peso, robustez, duración...

Díodo láser

Cando a estrutura dun LED introdúcese nunha cavidade resoante formada ao puír as caras dos extremos, pódese formar un láser. Os díodos láser úsanse frecuentemente en dispositivos de almacenamento ópticos e para a comunicación óptica de alta velocidade. Se ben non chegan a ter características tan puras coma outros láseres resultan moi económicos e de pequeno tamaño.

Fotodíodo



Todos os semicondutores están suxeitos á aparición de portadores de carga por efecto da luz. Xeralmente é un efecto non desexado, polo que moitos dos semicondutores están empacados en materiais que bloquean o paso da luz. Os fotodíodos teñen a función de ser sensibles á luz, polo que están empacados en materiais que permiten o paso da luz. O fotodíodo polarízase en inversa e a corrente inversa varía coa cantidade de luz incidente. Un fotodíodo pode usarse en celas solares, en fotometría ou en comunicación óptica.

Díodo Schottky



Os díodos Schottky están construídos como unha unión metal semiconductor. Teñen unha tensión limiar moito menor que os díodos PN, para correntes ao redor de 1mA está no rango de 0.15V a 0.45V, o cal os fai útiles en aplicacións de fixación de tensións desa orde (prevención de saturación en transistores bipolares). Ademais son capaces de pasar de condución a corte máis rápido que os díodos PN polo que se usan en circuitos de alta velocidade.

Díodo Zener



Un díodo Zener é unha clase especial de díodo. En polarización directa o Zener permite o paso de corrente eléctrica do mesmo xeito que un díodo normal. A particularidade do díodo Zener é

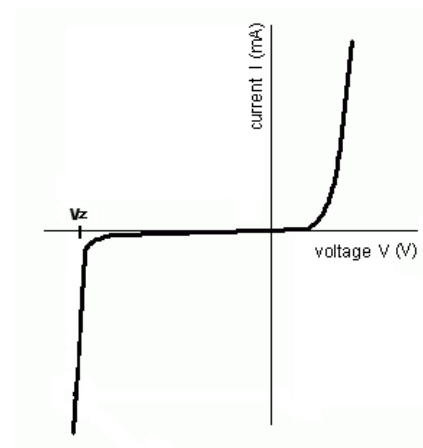


que tamén permite o paso da

corrente en polarización inversa cando a voltaxe que cae entre o cátodo e o ánodo (V_{KA}) está por riba dun valor ao que chamaremos tensión Zener (V_Z).

A tensión Zener depende do proceso de fabricación polo que é posible fabricalos para unha ampla gama de valores.

A variación da tensión inversa ao variar a corrente inversa a través do díodo é moi pequena o que fai ao díodo Zener ideal para a xeración de voltaxes de referencia, ou como estabilizador de voltaxe para aplicacións de baixa potencia.



Díodo Varicap

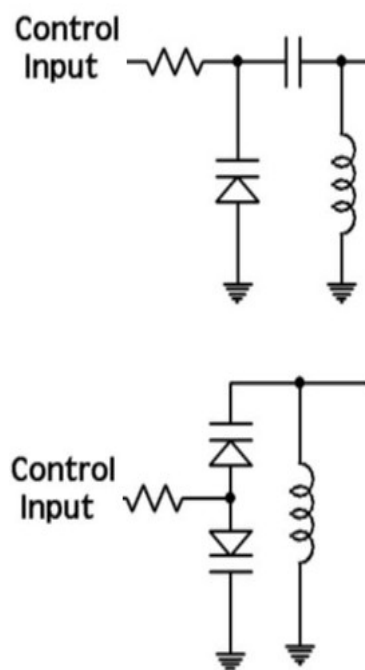


Segundo vimos anteriormente un díodo polarizado en inversa presenta unha zona libre de portadores de carga no seu interior. Esta zona libre de portadores presenta unha certa capacidade. Esta capacidade do díodo depende da anchura desta zona e esta pode modificarse aplicando ao díodo unha polarización inversa entre os seus extremos. Un aumento da tensión de polarización inversa da lugar a un ensanchamento da zona libre de portadores e, por tanto, a unha diminución da capacidade (o mesmo efecto producido ao distanciar as placas do un capacitor).

Tamén son coñecidos como díodo de capacidade variable ou varactores. As capacidades típicas de un díodo varicap, por exemplo o [BB148 de NXP](#), atópase entre os 45 pF para unha tensión inversa en torno aos 0,6V e os 7pF cunha tensión inversa en torno aos 20V.

O uso máis habitual deste tipo de díodos é substituír aos capacitores variables mecánicos en osciladores ou etapas de sintonía de todo tipo de equipos. Xeralmente conéctanse nun circuío resoante xunto con outros compoñentes. Na figura da dereita poden verse

dous exemplos de circuítos resoantes LC feitos con varicaps e deseñados para que o nivel de polarización continua do varicap non chegue ao resto dos compoñentes do circuío. No primeiro deles sitúase un condensador en serie co varicap para bloquear a continua e que esta non chegue ao resto do circuío. No segundo caso emprégase outro varicap en lugar do capacitor o que reduce a capacidade variable á metade pero tamén reduce á metade a amplitude da tensión AC que chega aos varicaps. É moi importante nestas montaxes que a amplitude da tensión AC sexa pequena para que non modifique substancialmente o punto de polarización e, por tanto, a capacidade do varicap.



1.8 RESOLUCIÓN DE CIRCUITOS CON DÍODOS

A continuación resúmese un procedemento “metódico” para a resolución dos distintos tipos de circuitos con díodos que atoparemos no boletín desta unidade (En unidades posteriores atoparemos circuitos con elementos activos que as veces estarán acompañados de díodos pero o razoamento para resolvelos será o mesmo que se describe aquí).

Circuitos con díodos, resistencias e fontes de c.c dun valor definido:

1. Supoñemos a hipótese máis coherente; algúns díodos os supoñeremos en polarización directa (conducindo) e outros en polarización inversa (circuíto aberto).
2. Substituímos os díodos polo seu modelo equivalente en P.D e en P.I respectivamente, indicando as intensidades I_i dos díodos supostos en P.D no sentido Ánodo-Cátodo e as tensións Ánodo-Cátodo V_{AK} dos supostos en inversa.
3. Resolvemos o circuíto eléctrico resultante calculando as I_i e V_{AK} .
4. Se $I_i > 0$ e $V_{AK} \leq 0 \Rightarrow$ A hipótese é correcta.
5. Se algún díodo non cumpre o anterior teremos que comezar de novo no punto 1 formulando unha nova hipótese (O díodo que non cumpre podería non ser o que está mal suposto).

Recortadores ou circuitos con díodos e resistencias e algunha fonte (ou a entrada) ten un valor sen identificar ou empregamos fontes de c.a:

1. Tomamos un valor de V_e suficientemente pequeno como para que nos permita determinar (non supoñer senón saber) o estado dos díodos; uns en polarización directa (P.D) e outros en polarización inversa (P.I). (Se temos unha tensión alterna identificada nos ceñiremos o intervalo $(-V_p, V_p)$).
2. Substituímos os díodos polo seu modelo equivalente.
3. Resolvemos o circuíto calculando a tensión de saída en función da tensión de entrada ($V_{SAL} = f(V_{ENT})$ ou, mais comunmente chamado $V_o = f(V_i)$ ou función de transferencia).
4. Damos valores crecentes a V_e e determinamos que díodo ou díodos cambian. A tensión de entrada de cambio dun determinado díodo calcularase no circuíto eléctrico equivalente que represente ao díodo en cuestión en P.I.

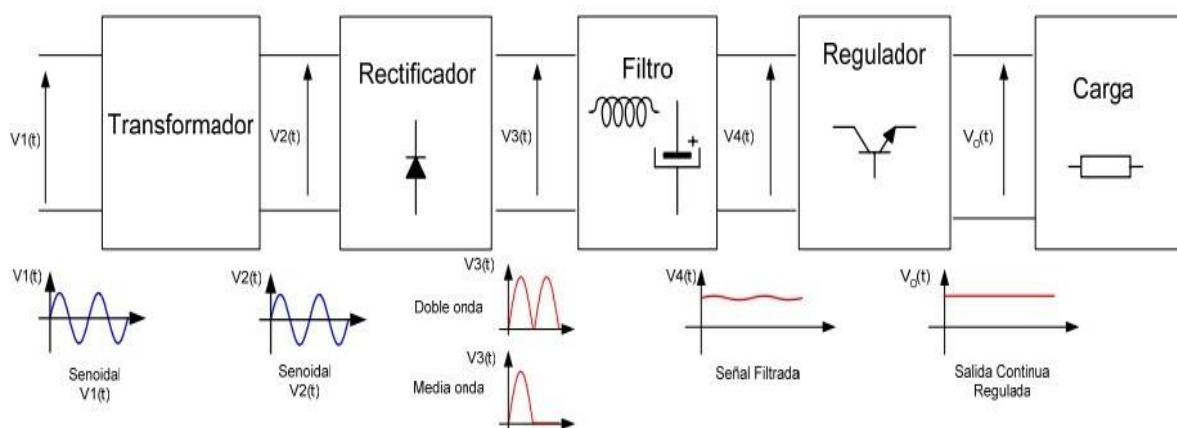
2 FONTES DE ALIMENTACIÓN LINEAIS

Tanto a xeración como a transmisión e conversión de enerxía eléctrica realízanse dunha maneira máis simple e eficiente en corrente alterna. En efecto, a xeración de corrente alterna non require contactos móbiles (colectores, escobillas) susceptibles de causar perdas enerxéticas e de sufrir desgastes.

Deixando de lado os motores, os calefactores e os sistemas de iluminación, a gran maioría dos equipos con alimentación eléctrica requiren corrente continua para o seu funcionamento. Aparece entón a necesidade de converter a corrente alterna en continua, o cal se logra por medio das fontes de alimentación.

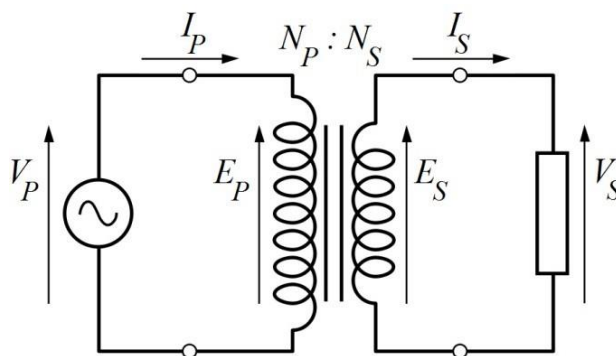
Unha fonte de alimentación lineal (que serán as que estudaremos mais profundamente) está composta basicamente por tres etapas: transformación, rectificación e filtrado. Os transformadores permitíranos controlar a amplitude da tensión xerada, o rectificador é a etapa que converte a corrente alterna á saída do transformador en corrente continua e, por último, o filtrado permítenos obter unha corrente continua de maior calidade (continua e constante).

A estas tres etapas pode engadirse unha cuarta, a de regulación ou estabilización, que permitirá que a corrente continua xerada permaneza nun valor constante e concreto. Ademais a etapa de regulación mantén a saída constante independentemente das fluctuacións que se produzan nas demais etapas; na corrente alterna coa que se alimenta a fonte de alimentación (regulación de liña) ou na carga que esta debe alimentar (regulación de carga).



2.1 TRANSFORMADOR

Como xa vimos no tema 3 un transformador é un núcleo de material ferromagnético sobre o que se devanan dous arroiamentos, o devanado primario de N_P voltas e o secundario de N_S voltas:



Segundo razoamos no tema 3 as expresións que relacionan as correntes e tensións en ambos devanados son:

$$\frac{V_P}{V_S} = \frac{N_P}{N_S} = m \quad \text{e} \quad \frac{I_P}{I_S} = \frac{N_S}{N_P} = \frac{1}{m}$$

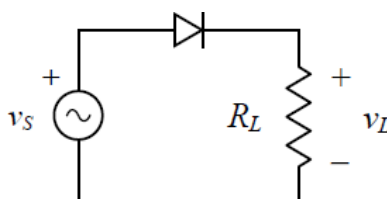
Onde a m chamámoslle relación de transformación.

2.2 RECTIFICACIÓN

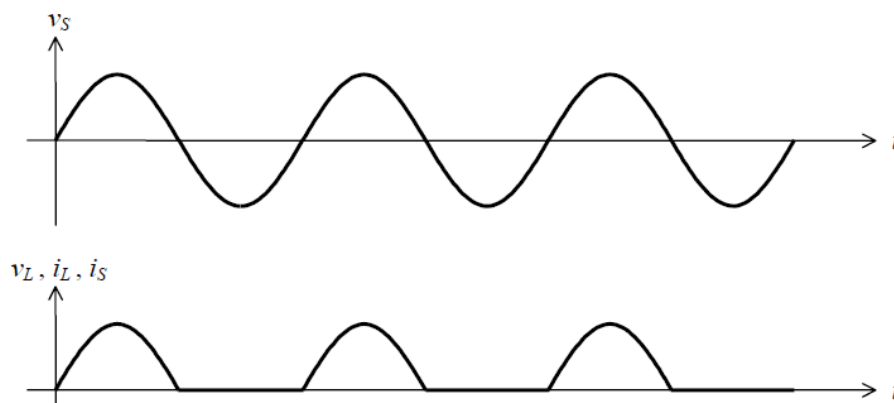
Como xa se comentou, a rectificación consiste en transformar a corrente alterna á saída do transformador en corrente continua mediante unha serie de díodos. Analizaremos neste apartado algúns dos circuítos rectificadores máis importantes.

Rectificador de media onda

Na seguinte figura represéntase esquematicamente un rectificador de media onda no cal un díodo interponse entre a fonte e a carga. Cando a tensión v_S da fonte é maior que v_Y , o sentido da corrente é favorable e prodúcese a circulación, polo cal $v_L = v_S - v_Y$.



Cando, en cambio, $v_s < v_y$, o díodo non conduce e entón $v_L = 0$. Isto ilústrase na seguinte figura 2 para un típico sinal sinusoidal. Indícase tanto a tensión na carga como a corrente que circula por ela e pola fonte (a tensión e as correntes neste caso teñen a mesma forma). Invertendo o díodo lograríase unha tensión negativa.



Valor medio da tensión na saída ($V_{L,med}$)

Este sería o valor que mediríamos cun voltímetro *en continua* conectado á saída do rectificador.

$$V_{L,med} = \frac{V_{L,p}}{\pi} = \frac{V_{S,p} - V_y}{\pi} \cong \frac{V_{S,p}}{\pi}$$

Intensidade de corrente na carga e nos díodos ($I_{L,med}$, $I_{D,med}$ e $I_{D,p}$)

A corrente que pasa polos díodos é un parámetro fundamental á hora de elixilos. Neste rectificador, tanto a media como a de pico serán idénticas na carga e nos díodos.

$$I_{D,med} = I_{L,med} = \frac{V_{L,med}}{R_L} \quad I_{D,p} = I_{L,p} = \frac{V_{L,p}}{R_L} = \frac{V_{S,p} - V_y}{R_L} \cong \frac{V_{S,p}}{R_L}$$

Tensión inversa máxima nos díodos ($V_{R,p}$)

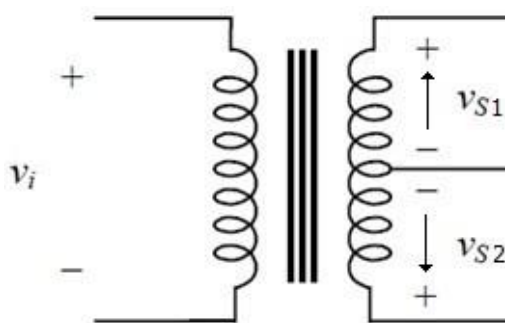
Este é outro parámetro fundamental á hora de elixilos.

Neste caso coincidirá co valor da tensión de pico á saída do transformador.

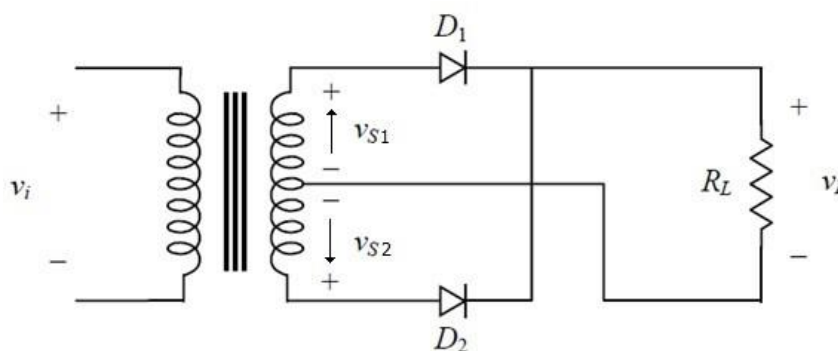
$$V_{R,p} = V_{S,p}$$

Rectificador de onda completa con transformador de toma intermedia

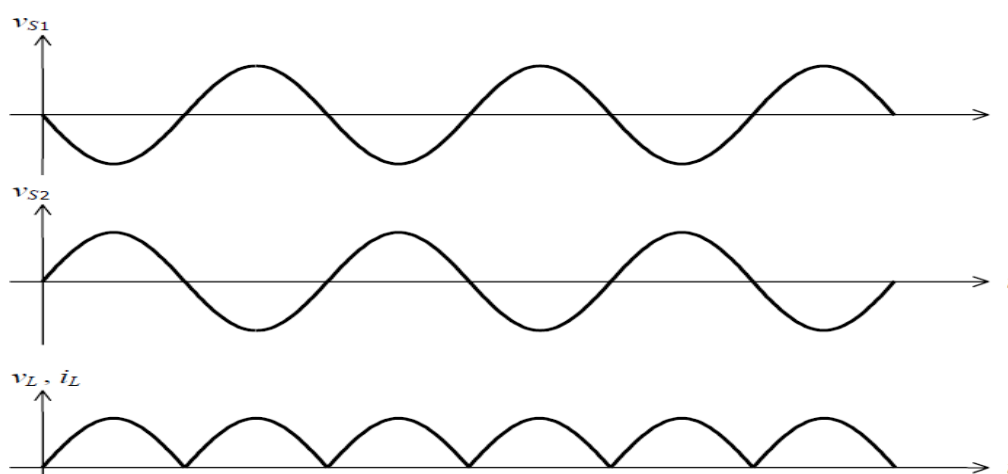
Nun transformador con toma intermedia a metade da tensión aparece entre cada un dos contactos extremos e o central. Se tomamos as tensións de saída como indica a seguinte figura teremos dúas tensións v_{S1} e v_{S2} idénticas en amplitude e opostas en fase.



Na seguinte figura represéntase esquematicamente un rectificador de onda completa con transformador de toma intermedia. O funcionamento do circuito e como o de dous rectificadores de media onda coas súas saídas conectadas entre si e alimentados por tensións en oposición de fase.



Na saída obteremos unha tensión completamente rectificadas onde cada semiperíodo é rectificadado por un dos díodos.



Valor medio da tensión na saída ($V_{L,med}$)

Será o dobre que para un rectificador de media onda.

$$V_{L,med} = 2 \cdot \frac{V_{L,p}}{\pi} = 2 \cdot \frac{V_{S,p} - V_\gamma}{\pi} \cong 2 \cdot \frac{V_{S,p}}{\pi}$$

Intensidade de corrente na carga e nos díodos ($I_{L,med}$, $I_{D,med}$ e $I_{D,p}$)

A corrente media na carga tomara o valor:

$$I_{L,med} = \frac{V_{L,med}}{R_L}$$

Sen embargo so a metade pasara por cada un dos díodos é, polo tanto:

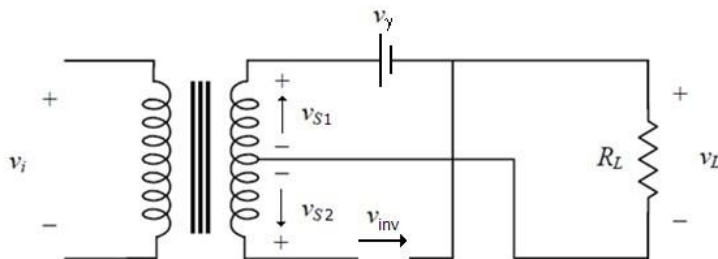
$$I_{D,med} = \frac{V_{L,med}}{2 \cdot R_L}$$

Pola súa banda a corrente de pico será a mesma que nun rectificador de media onda, ademais é a mesma no díodo e na carga.

$$I_{D,p} = I_{L,p} = \frac{V_{L,p}}{R_L} = \frac{V_{S,p} - V_\gamma}{R_L} \cong \frac{V_{S,p}}{R_L}$$

Tensión inversa máxima nos díodos ($V_{R,p}$)

Observemos o circuíto equivalente cando so o díodo D1 conduce:

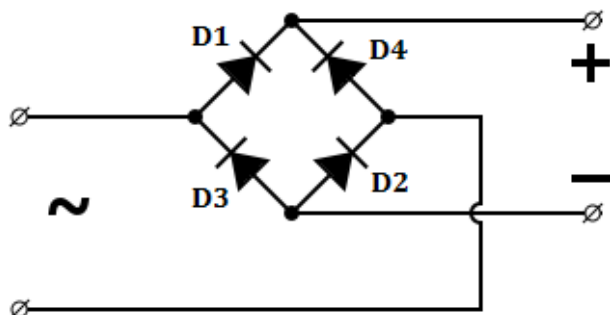


No momento no que a tensión v_{S1} toma o valor de pico tamén o fai v_{S2} aínda que no senso contrario. De xeito que a tensión no cátodo de D2 é de $V_P - V_\gamma$ e no ánodo é de $-V_P$, a tensión inversa que soporta o díodo será a diferenza entre a tensión no cátodo e a tensión no ánodo como indica a figura:

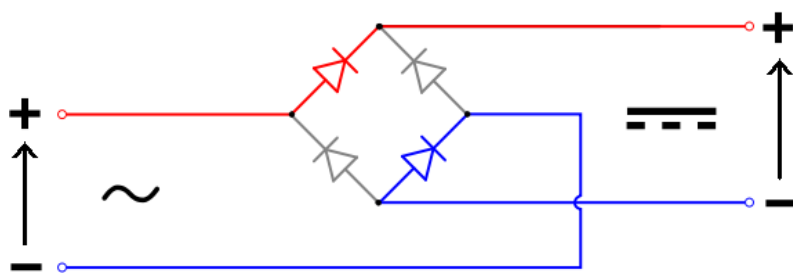
$$V_{R,p} = 2 \cdot V_{S,p} - V_\gamma \cong 2 \cdot V_{S,p}$$

Rectificador de onda completa en ponte de Graetz

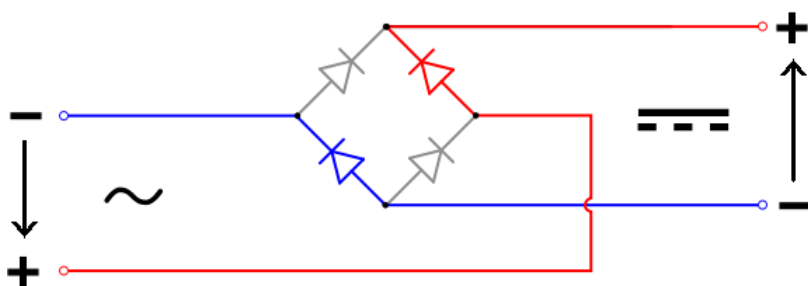
Na seguinte figura represéntase esquematicamente un rectificador de onda completa en ponte de Graetz.



Cando $v_S > 0$, os díodos D_1 e D_2 están polarizados en forma directa e polo tanto conducen, en tanto que D_3 e D_4 non conducen. Teremos entón $v_L = v_S - 2 \cdot v_Y$.



Cando a fase da entrada se inverte, pasando a ser $v_S < 0$, serán D_3 y D_4 os que estarán en condicións de conducir, mentres que D_1 e D_2 cortaranse. O resultado é que a tensión da fonte atópase agora aplicada á carga en forma oposta, de xeito que $v_L = -v_S - 2 \cdot v_Y$.



Na saída obteremos unha tensión completamente rectificadora.

Valor medio da tensión na saída ($V_{L,med}$)

Será o dobre que para un rectificador de media onda tendo en conta que agora a corrente pasa por dous díodos:

$$V_{L,med} = 2 \cdot \frac{V_{L,p}}{\pi} = 2 \cdot \frac{V_{S,p} - 2 \cdot V_{\gamma}}{\pi} \cong 2 \cdot \frac{V_{S,p}}{\pi}$$

Intensidade de corrente na carga e nos díodos ($I_{L,med}$, $I_{D,med}$ e $I_{D,p}$)

A corrente media na carga tomara o valor:

$$I_{L,med} = \frac{V_{L,med}}{R_L}$$

Sen embargo so a metade pasara por cada un dos díodos é, polo tanto:

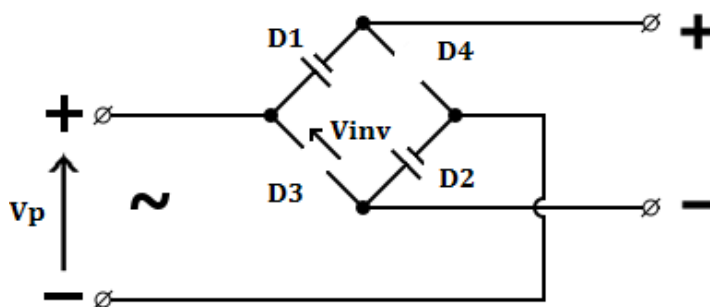
$$I_{D,med} = \frac{V_{L,med}}{2 \cdot R_L}$$

Pola súa banda a corrente de pico será a mesma na carga e nos díodos:

$$I_{D,p} = I_{L,p} = \frac{V_{L,p}}{R_L} = \frac{V_{S,p} - 2 \cdot V_{\gamma}}{R_L}$$

Tensión inversa máxima nos díodos ($V_{R,p}$)

Observemos o circuío equivalente cando D1 e D2 conducen:



Á vista de este circuío resulta evidente que a tensión inversa entre extremos de D3 é:

$$V_{R,p} = V_{S,p} - V_{\gamma} = V_{L,p} + V_{\gamma} \cong V_{S,p}$$

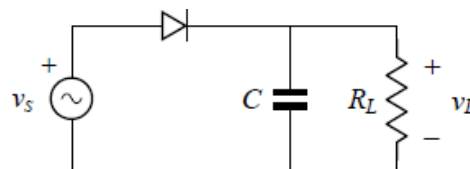
2.3 FILTRADO

A corrente proporcionada polos rectificadores, aínda que é continua, non é a corrente que nos queremos nun xerador de continua. A misión da etapa de filtrado é a de reducir ao máximo as variacións de amplitude á saída do rectificador.

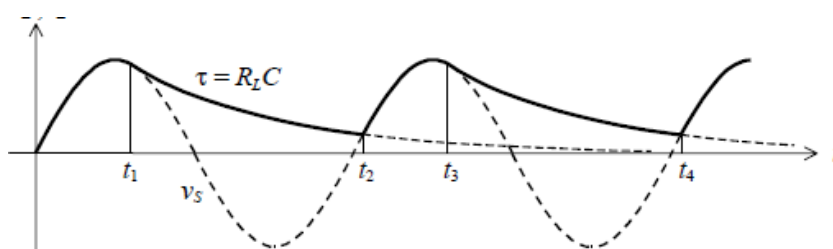
Definimos **tensión de rizado de pico a pico ($V_{RIZ,pp}$)** como a diferenza entre a máxima e a mínima tensión á saída da fonte. A misión da etapa de filtrado é a de reducir ao máximo a tensión de rizado. Nun rectificador monofásico sen filtrado a tensión de rizado será igual á tensión de pico á entrada do rectificador.

Filtrado por condensador

Se conectamos un condensador de capacidade elevada á saída do rectificador en paralelo coa carga lograremos reducir a tensión de rizado. O circuío será o seguinte para un rectificador de M.O.



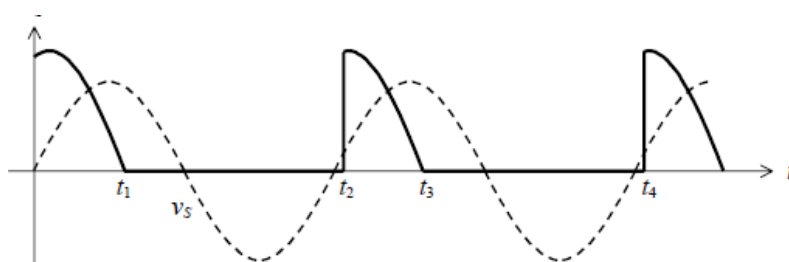
Na seguinte figura poden verse as formas de onda neste circuío, a liña sólida corresponde á tensión na carga mentres que a punteada corresponde á tensión á entrada do rectificador.



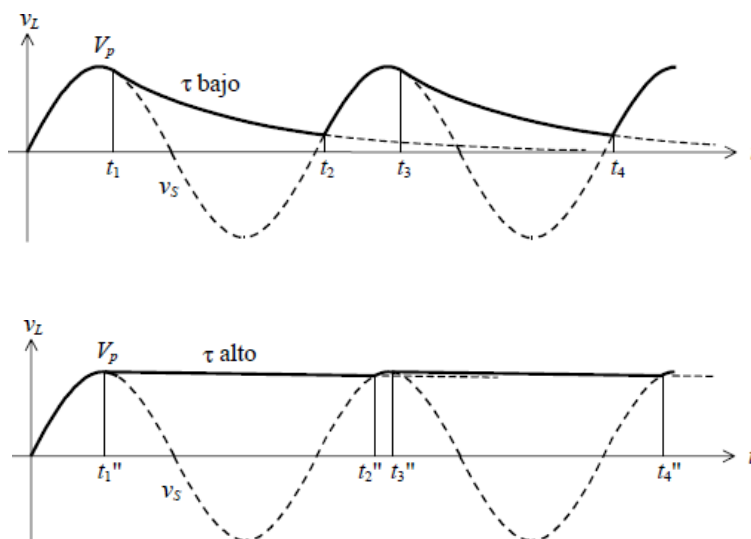
Inicialmente o capacitor está descargado, mentres v_s crece cara a valores positivos, o díodo polarízase en forma directa e conducirá. Dado que a resistencia da fonte e a do díodo son extremadamente pequenas, a tensión de saída seguirá á da entrada cargándose o condensador instantaneamente. Este proceso continuará até o instante t_1 en que a tensión de entrada diminúe máis rapidamente que a descarga de C a través de R_L , xa que nese caso o díodo pasará a estar polarizado inversamente e deixará de conducir. A partir dese

momento a tensión de saída desvincúlase da de entrada, seguindo a evolución da descarga do capacitor a través da resistencia de carga.

Mentres tanto a entrada continuará coa súa variación sinusoidal, farase negativa e logo volverá ser positiva. No instante t_2 a caída exponencial da saída cruzarase co ascenso sinusoidal da entrada, e a partir de entón o díodo volverá conducir, repetíndose o proceso anterior. Na seguinte figura pode verse a corrente que proporciona a fonte que é a mesma que atravesa o díodo.



Canto maior sexa a constante de tempo do circuíto RC formado pola resistencia de carga e o condensador de filtro menos se descargara o condensador durante o tempo de corte do díodo, efecto que se pode ver na seguinte figura:



A corrente polo díodo é a pulsos, durante os intervalos nos que a tensión aumenta. Estes pulsos teñen que achegar suficiente carga ao condensador para que poida manter a corrente de saída constante durante a non conduction do díodo. Isto quere dicir que o díodo ten que conducir nese intervalo de tempo suficiente corrente para cargar o condensador na mesma medida que se

descargou durante o resto do ciclo. É moi normal, entón, que teñamos unha corrente na carga de 1A e eses pulsos cheguen até 10A ou mais.

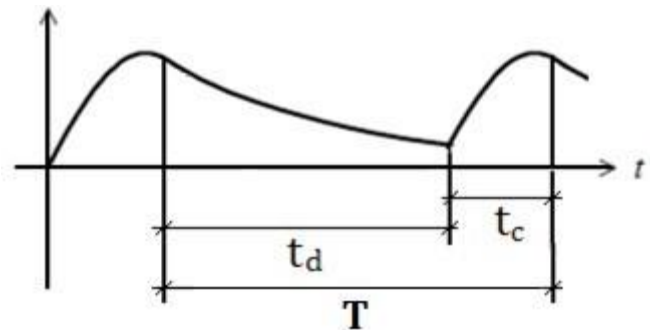
Se poñemos un condensador maior reducimos o rizado, pero ao facer isto tamén reducimos o tempo de condución do díodo. Como a corrente media que pasa pola carga será a mesma (lixeiramente maior en realidade) os pulsos de corrente fanse aínda maiores aumentando a esixencia sobre os díodos. O pico máis grande producirase no acendido da fonte, cando o condensador estea totalmente descargado. Isto tamén afectará o transformador, xa que el é quen debe fornecer esa corrente. A groso modo pode estimarse a corrente de pico nos díodos, co circuíto xa no estacionario, como:

$$\text{Rectificador de MO: } I_{D,p} = \frac{V_{L,p}}{R_L} \cdot \left(1 + 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot V_{L,p}}{V_{riz,pp}}} \right)$$

$$\text{Rectificador de OC: } I_{D,p} = \frac{V_{L,p}}{R_L} \cdot \left(1 + 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{V_{L,p}}{2 \cdot V_{riz,pp}}} \right)$$

Cálculo da tensión de rizado con rectificador de media onda

Na figura da dereita aparecen os tempos de carga e descarga do condensador xunto coa forma de onda na saída.



Nun condensador temos que:

$$V = \frac{Q}{C}$$

Polo tanto a tensión de rizado de pico a pico será:

$$V_{RIZ(pp)} = \frac{Q_1}{C} - \frac{Q_2}{C} = \frac{Q_1 - Q_2}{C}$$

Dividindo ambos lados da ecuación polo tempo de descarga do condensador:

$$\frac{V_{RIZ(pp)}}{t_d} = \frac{Q_1 - Q_2}{C \cdot t_d}$$

Lembrando que a intensidade de corrente é a variación de carga por unidade de tempo temos que a variación de carga no condensador dividida polo tempo que este pasa descargados debe ser igual a corrente media que atravesa a carga

$I_{L(med)}$

$$\frac{V_{RIZ(pp)}}{t_d} = \frac{I_{L(med)}}{C} \Rightarrow V_{RIZ(pp)} = \frac{I_{L(med)}}{C} \cdot t_d$$

Como o condensador pasa practicamente todo o período descargándose podemos aproximar o tempo de descarga como o período: $t_d = T$

$$V_{RIZ(pp)} \cong \frac{I_{L(med)}}{C} \cdot T = \frac{I_{L(med)}}{f \cdot C}$$

E a tensión media na carga poderase aproximar como:

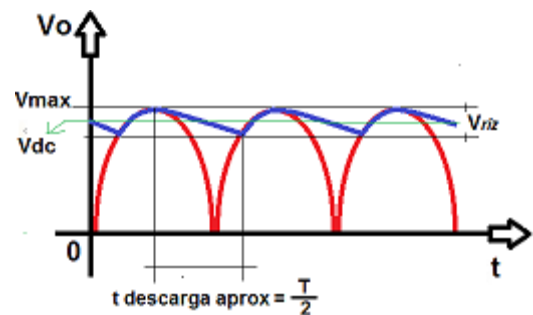
$$V_{L(med)} = V_P - \frac{V_{RIZ(pp)}}{2}$$

Cálculo da tensión de rizado con rectificador de onda completa

O razoamento é idéntico ao do caso anterior ata o punto no que se calcula:

$$V_{RIZ(pp)} = \frac{I_{L(med)}}{C} \cdot t_d$$

Como o condensador pasa practicamente medio período descargándose podemos aproximar o tempo de descarga como o período: $t_d = T/2$



$$V_{RIZ(pp)} \cong \frac{I_{L(med)}}{C} \cdot \frac{T}{2} = \frac{I_{L(med)}}{2 \cdot f \cdot C}$$

E a tensión media na carga poderase aproximar como:

$$V_{L(med)} = V_P - \frac{V_{RIZ(pp)}}{2}$$

2.4 REGULACIÓN.

A tensión continua dispoñible á saída do filtro pode non ser o suficientemente boa para a aplicación debido ao rizado, ademais o seu valor depende das variacións da tensión de entrada, da carga ou da temperatura. Se estas variacións non son aceptables ou cando se precise un valor exacto e coñecido de tensión será necesario empregar circuítos de regulación para que a tensión continua a utilizar sexa o máis constante posible e teña o valor axeitado.

Os circuítos de regulación máis habituais son o regulador con diodo zener e os reguladores integrados lineales ou conmutados.

Defínense os seguintes parámetros para analizar o comportamento dos reguladores:

Regulación de liña: É unha medida da capacidade do regulador para manter a tensión de saída constante ante as variacións da tensión na entrada do regulador. A regulación de liña (Reg_{LINE}) defínese como:

$$Reg_{LINE} = \frac{\Delta V_{OUT}}{\Delta V_{IN}} \quad (\text{mV/V}) \qquad Reg_{LINE} = \frac{\Delta V_{OUT}/V_{OUT}}{\Delta V_{IN}} \quad (\%/V)$$

Regulación de carga: É unha medida da capacidade do circuíto regulador para manter a tensión de saída constante ante as variacións da corrente demandada pola carga (I_L). Se o circuíto fose unha fonte de tensión ideal, a saída debería ser independente de I_L . A regulación de carga (Reg_{LOAD}) defínese como:

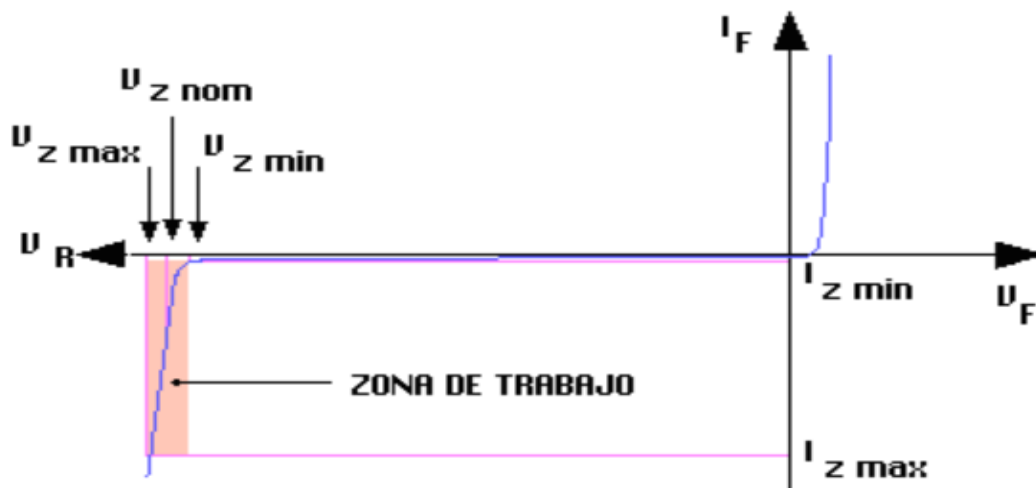
$$Reg_{LOAD} = \frac{\Delta V_{OUT}}{\Delta I_L} \quad (\text{mV/A}) \qquad Reg_{LOAD} = \frac{\Delta V_{OUT}/V_{OUT}}{\Delta I_L} \quad (\%/A)$$

Existe outra definición só a partir das tensións a plena carga (V_{FL}) e sen carga (V_{NL}), en este caso o valor proporciónase en %:

$$Reg_{LOAD} = \frac{V_{NL} - V_{FL}}{V_{FL}} \quad (\%)$$

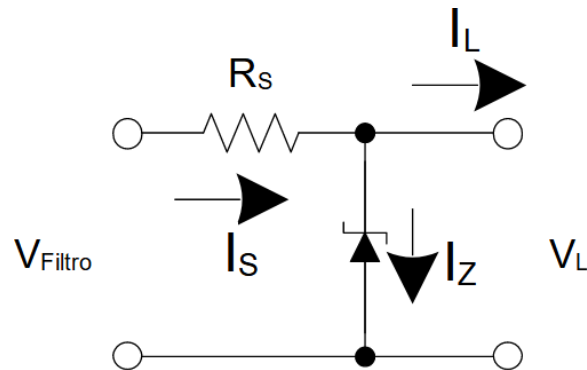
Regulación con Zener

A idea é aproveitar a característica inversa do díodo Zener que pode absorber unha ampla gama de intensidades cunha variación moi pequena de tensión.



Do filtro sae unha tensión que pode fluctuar entre dous valores, $V_{L(MAX)}$ e $V_{L(MIN)}$, a misión do regulador Zener consiste en que a tensión na carga permaneza aproximadamente constante independentemente de estas variacións á saída do filtro e tamén ante as variacións da intensidade a través da carga. Para iso a corrente a través do díodo Zener deberá permanecer entre $I_{Z(MIN)}$ e $I_{Z(MAX)}$, de xeito que o díodo permaneza sempre na zona zener e, polo tanto a tensión entre os seus extremos estea sempre en torno a V_Z .

O circuíto que se empregará é o seguinte:



Suporemos para simplificar os cálculos que $V_Z = V_{Z(\min)} = V_{Z(\max)}$. Para que a tensión na carga permaneza en torno a V_Z e o estabilizador funcione deberá cumprirse:

- Cando a tensión á entrada do estabilizador é mínima ($V_{E(\min)}$) a corrente polo díodo Zener debe ser maior que $I_{Z(\min)}$ para que estabilice.

$$I_{S(\min)} = \frac{V_{E(\min)} - V_Z}{R_S} > I_{L(\max)} + I_{Z(\min)} \Rightarrow R_S < \frac{V_{E(\min)} - V_Z}{I_{L(\max)} + I_{Z(\min)}}$$

- Cando a tensión á entrada do estabilizador é máxima ($V_{E(\max)}$) a corrente polo díodo Zener debe ser menor que $I_{Z(\max)}$ para que non se queime.

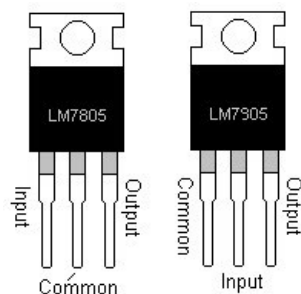
$$I_{S(\max)} = \frac{V_{E(\max)} - V_Z}{R_S} < I_{L(\min)} + I_{Z(\max)} \Rightarrow R_S > \frac{V_{E(\max)} - V_Z}{I_{L(\min)} + I_{Z(\max)}}$$

Ademais deberemos elixir a resistencia R_S de xeito que sexa capaz de disipar a potencia do peor caso.

$$P_{\max} = I_{S(\max)}^2 \cdot R_S = \left(\frac{V_{E(\max)} - V_Z}{R_S} \right)^2 \cdot R_S = \frac{(V_{E(\max)} - V_Z)^2}{R_S}$$

Reguladores integrados

A alternativa é utilizar algún regulador de tensión integrado, dispoñibles para case todas as voltaxes que poidamos necesitar, e para correntes desde unhas poucas centésimas de ampere até varios amperes.



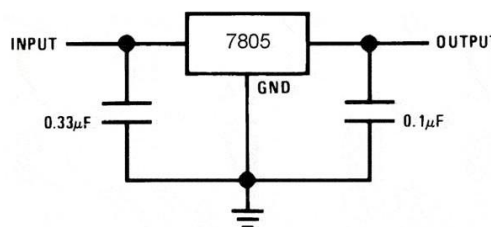
Dentro dos reguladores de voltaxe con saída fixa, atópanse os pertencentes á familia LM78xx, onde “xx” é a voltaxe da saída. Os valores normalizados son 05, 06, 08, 09, 10, 12, 15, 18 e 24V, entregan unha corrente máxima de 1 A e soportan consumos pico de até 2,2 A. Posúen protección contra sobrecargas térmicas e cortocircuitos que desconectan o regulador no caso de que a súa temperatura supere os 125°C.

Os LM78xx son reguladores de saída positiva, mentres que a familia LM79xx son para os mesmos voltaxes pero con saída negativa. Así, un LM7805 é capaz de entregar 5 voltios positivos, e un LM7912 entrega 12 voltios negativos.

A tensión de entrada é un factor moi importante, xa que debe ser superior nuns 3 voltios á tensión de saída (é o mínimo recomendado polo fabricante).

Para alcanzar correntes elevadas é necesario dotalos dun dissipador de calor adecuado, senón só obteremos unha fracción desta corrente antes de que o regulador alcance a súa temperatura máxima e se activen as proteccións.

Son dispositivos de tres pines que poden realizar algunhas funcións máis ademais de actuar como reguladores. As montaxes que se poden realizar con eles e os compoñentes adicionais que hai que usar nas diferentes montaxes poden consultarse na folla de características do dispositivo. Na figura da dereita pode verse a montaxe que debe facerse para que actúe coma regulador de tensión fixa.



Tamén existen reguladores cuxa saída non é fixa, xa que se pode axustar mediante unha resistencia variable. Este é o caso do LM317 para tensións positivas e o LM137 para tensións negativas.