

TEMA 4: CAMPO MAGNÉTICO

4.1.- MAGNETISMO: IMÃNS NATURAIS E EXPERIÊNCIA DE OERSTED.

- Hai máis de 2000 anos: gregos: Magnetita, mineral que ten a propiedade de atraer pedras de ferro
- S. XIII: P. de Maricourt: Observación exper. da existencia de dous polos nun imán: polo norte (N) e polo sur (S), onde a forza exercida polo imán ten máxima intensidade.
- A asignación dos nomes aos polos é arbitraria. Ten razóns xeográficas.
- Polos iguais de dous imáns repólese, polos distintos atráense.
- 1600: W. Gilbert descubre que a Terra é un imán natural con polos magnéticos próximos aos polos xeográficos norte e sur.
- Os polos magnéticos sempre se presentan por parellas de polos opostos. Se rompemos un imán, en cada anaco aparece de novo 2 polos opostos. Ata hoxe, non existe evidencia conclusiva sobre a existencia dun polo magnético illado.
- S. XIX: H.C. Oersted: conexión entre electricidade e magnetismo.
Experiencia de Oersted: Unha corrente eléctrica inflúe sobre a orientación da agulla dun compás (1820). Isto pon de manifesto a aparición dun Campo Magnético (C.M.) creado pola corrente eléctrica, que son carpas en movemento.
- Ampère e outros:
 - correntes eléctricas atraen limaduras de ferro
 - correntes eléctricas paralelas no mesmo sentido atráense entre si.
- Ampère: Modelo teórico do magnetismo:
 - ① A fonte fundamental do magnetismo non é o polo magnético, senón unha corrente eléctrica.
 - ② O magnetismo dun imán permanente é debido ao alivamento de espiras moleculares de corrente dentro do material.

Hoje sábase que estas espiras de corrente resultan parcialmente do mov. dos electróns dentro do átomo e parcialmente do spin electrónico, que é unha propiedade mecánico-cuántica do electrón.

- Interacción magnética: forza magnética que existe entre dúas cargas eléctricas en movemento relativo.
 - Unha carga en movemento orixina un campo magnético.
 - 1830: Faraday e Henry, independentemente: Campo magnético variable produce un campo eléctrico.
 - 1860: J.C. Maxwell: Teoría completa da electricidade e o magnetismo, que incluía a produción dun C.M. mediante un campo eléctrico variable.
- Interacción electromagnética: cargas eléctricas en movemento.

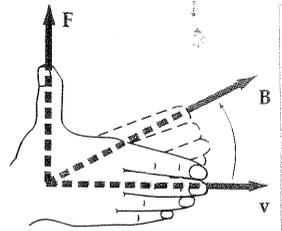
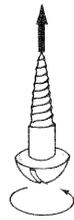
4.2. Lei de Lorente. Definición de \vec{B} .

- A existencia dun campo magnético \vec{B} nun punto do espacio pode demostrarse dun xeito directo colocando un compás nese punto e comprobando se tende a alíñarse nunha dirección particular.
- Experimentalmente, demostrase que cando unha carga Q posúe unha velocidade \vec{v} dentro dun C.M. aparece unha forza:
 - proporcional á carga Q , dependendo o seu sentido do signo de Q .
 - proporcional ao módulo da velocidade v
 - proporcional a $\sin\theta$, sendo θ o ángulo que forman \vec{v} e \vec{B}
 - perpendicular ao campo magnético e á velocidade:

$$\vec{F} = Q(\vec{v} \times \vec{B})$$

* Por razóns históricas, tamén chamado inducción magnética

- O valor do módulo é: $F = qvB \sin \theta$
- A direcção de \vec{F} : regra da man. direita
- Unidades de C.M.:



- S.I. tesla: $1T = 1 \frac{N/C}{m/s} = 1 \frac{kg}{As^2}$

- Como tesla é unha unidade grande:

- C.M. terrestre $\approx 10^{-4} T$; - Indústrias industriais $\sim 2T$

empregase tamén o gauss (cgs): $1T = 10^4 G$

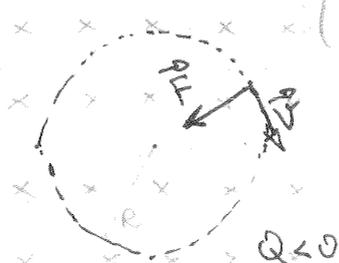
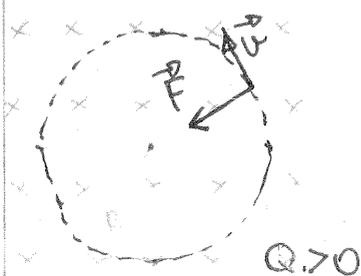
4.2.1.- Forza de Lorentz:

Se unha carga se move nunha rexión onde coexisten un C.E. e un C.M., a forza total é a suma:

$$\vec{F} = q (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad \text{Forza de Lorentz}$$

4.2.2.- Movemento dunha carga no seo dun campo magnético. Aplicacións

- A forza magnética é sempre perpendicular á velocidade da partícula.
- A forza magnética non realiza traballo sobre a carga (pois $\vec{F} \perp d\vec{r}$) portanto non produce cambio ningún na enerxía cinética (ou módulo da velocidade) da partícula.
- No caso no que a velocidade da partícula sexa perpend. a un C.M. uniforme, cambia a dirección pero non o módulo da velocidade, polo que a carga describe un movemento circular uniforme nun plano perpendicular a \vec{B}



(\vec{B} entrante no plano do papel)

$$\text{An: } \vec{F} = q \vec{v} \times \vec{B} ; m \vec{a} = q \vec{v} \times \vec{B}$$

Somente sobre aceler. normal: $\vec{a} = \vec{a}_n$

$$m \frac{v^2}{R} = q v B \Rightarrow R = \frac{m \cdot v}{q B}$$

que é o raio da circunferência descrita pela partícula

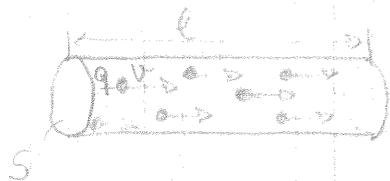
- Isto é a base de funcionamento do espectrômetro de massas e de aceleradores de partículas como o ciclotrão.

4.3. FORÇA EXERCIDA SOBRE UMA CORRENTE

- Corrente elétrica: chorro de cargas elétricas que se movem no vácuo ou a través dum meio conductor (p.ex. fio de cobre).

- Intensidade da corrente elétrica: $I = \frac{dQ}{dt}$, $I = \frac{Q}{t}$ no caso da corrente contínua (DC), medem-se em amperios (A), Q carga total

- Se por um fio situado num C.M. circular uma corrente, a força que o C.M. exerce sobre o conductor é a soma das forças que exerce sobre cada única carga em movimento (carga q , veloc. v)



O nº de cargas no interior deste segmento de fio de longitude l e área da secção S

$$\text{é: } n \cdot S \cdot l$$

onde n é o nº de cargas por unidade de volume

$S \cdot l$ é o volume deste trecho de fio

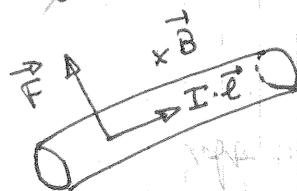
Para uma carga: $\vec{F} = q \vec{v} \times \vec{B}$

Para o total das cargas no fio: $\vec{F} = n \cdot S \cdot l \cdot q \vec{v} \times \vec{B}$

Do outro lado: $I = \frac{Q}{t} = \frac{n \cdot l \cdot S \cdot q}{t} = n \cdot l \cdot S \cdot q \cdot \frac{v}{l} = n S q v$

$$\text{An: } \boxed{\vec{F} = I \cdot \vec{l} \times \vec{B}}$$

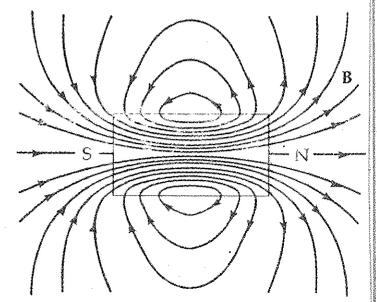
Expressão que se verifica experimentalmente



4.4.- LEI DE BIOT E SAVART. CAMPO MAGNÉTICO CREADO POR UN FIO E POR UMA ESPIRA.

4.4.1.- Representação do Campo magnético. Linhas de campo magnético.

Igual que no C. Eléctrico, o C. Magnético também pode ser representado mediante linhas de C. Magnético. Nos dois casos a direcção e sentido do campo vêm indicado pela direcção e sentido das linhas de campo; a magnitude do campo vêm indicado pela densidade de linhas..



- Duas importantes diferenças entre linhas de C.E. e linhas de C.M.:
 - 1) Direcção da força que o campo exerce sobre uma carga
 - 2) As linhas de C.E. começam nas cargas positivas e rematam nas negativas. Sem embargo, non existen puntos do espacio nos que as linhas de C.M. comencem ou rematem. No seu lugar, formam espiras cerradas.

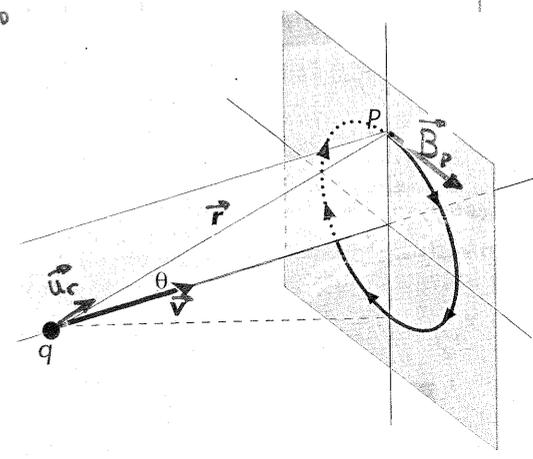
4.4.2.- Campo magnético creado por unha carga puntual móbil

- Pouco despois da experiencia de Oersted (1820), Biot e Savart mediron a forza que actúa sobre un imán próximo a un conductor longo polo que circula unha corrente.

- Ampère e Laplace ampliaron estes experimentos, ~~de~~ obtendo, entre outros resultados, a intensidade do C.M. \vec{B} creado por unha carga Q que se move cunha velocidade \vec{v} nun punto situado a unha distancia \vec{r} dela:

$$\vec{B}_p = k_m \cdot \frac{Q \vec{v} \times \vec{u}_r}{r^2} \quad (1)$$

sendo k_m un parámetro característico do medio igual a:



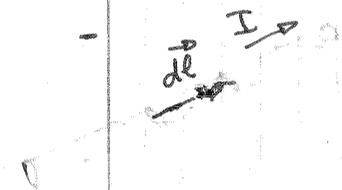
$$K_m = \frac{\mu}{4\pi}$$

onde μ é a permeabilidade magnética do meio, que para o vácuo é:

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{T \cdot m}{A} \quad \left(\text{ou } \frac{N}{A^2} \right)$$

- Módulo de \vec{B} : $B = \frac{\mu}{4\pi} \cdot \frac{q v \sin \theta}{r^2}$
- B é zero ao longo da linha de movimento da carga
- \vec{B} tem direcção perpendicular a \vec{v} e a \vec{r} . A direcção vem dada pela regra da mão direita.
- Uma carga eléctrica em movimento cria um campo eléctrico e um campo magnético perpendiculares entre si.

4.4.3.- Campo magnético criado por um fio conductor rectilíneo e indefinido



- Se dq é a carga que circula por $d\vec{l}$ num tempo dt a uma velocidade $\vec{v} = \frac{d\vec{l}}{dt}$, como:

$$I = \frac{dq}{dt} = \frac{dq}{\frac{d\vec{l}}{v}} \Rightarrow dq \cdot \vec{v} = I \cdot d\vec{l}$$

De (1):

$$\boxed{d\vec{B} = \frac{\mu}{4\pi} \cdot \frac{dq \vec{v} \times \vec{r}}{r^2} = \frac{\mu}{4\pi} \frac{I d\vec{l} \times \vec{r}}{r^2}}$$

Corresponde como Lei de Biot-Savart, que corresponde ao C.M. criado por um elemento diferencial de corrente num pto. P , a uma distancia r do elemento, pelo que circula uma corrente de intensidade I e tem uma longitude dl .

- O C.M. criado por um conductor inteiro poderá calcular integrando:

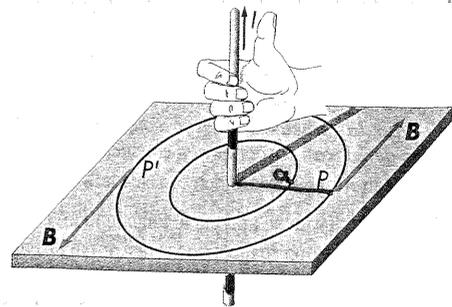
$$\vec{B} = \frac{\mu}{4\pi} I \int \frac{d\vec{l} \times \vec{r}}{r^2}$$

em função da forma física do conductor.

- Corrente retilínea indefinida:

C.T. num pto P situado a unha distancia "a" do fio condutor:

$$B_p = \frac{\mu \cdot I}{2\pi a}$$



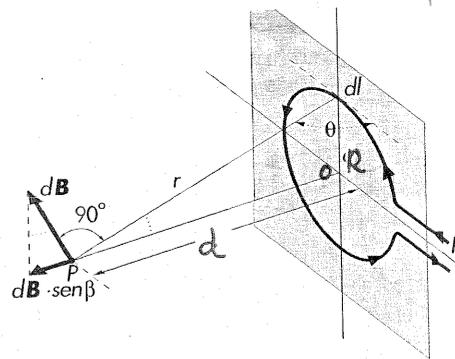
- É inversamente proporcional á distancia.

- Dirección e sentido segundo a regra da man dereita (ver figura)

4.4.4.- C. Magnético creado por unha espira

- Módulo do C.T. creado por unha espira circular de radio "R" pola que circula unha intensidade de corrente I nun punto P situado sobre o eixo da espira a unha distancia "d" do centro:

$$B_p = \frac{\mu}{2} I \cdot \frac{R^2}{r^3} = \frac{\mu}{2} I \frac{R^2}{(d^2 + R^2)^{3/2}}$$



- Dirección: a do eixo da espira

- Sentido: Regra man dereita \vec{B} \vec{I}

- No centro da espira, $r = R$, o C.T. é máximo:

$$B_0 = \frac{\mu I}{2R}$$

4.4.5.- C. Magnéticos creado por un solenoide ou bobina

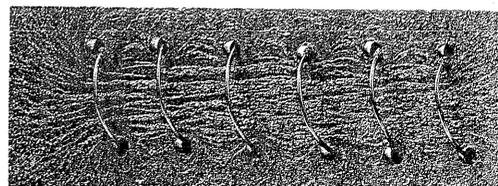
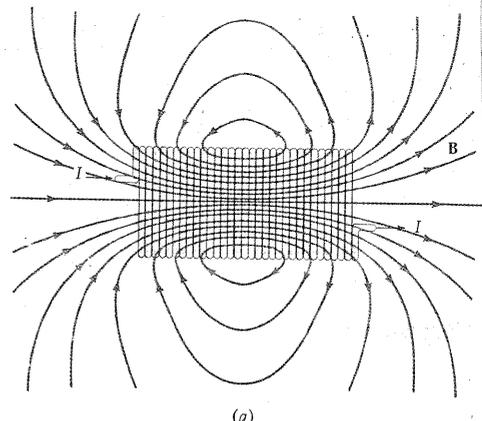
- Un solenóide ou bobina é un arame enrolado estreitamente en forma de hélice.

- Produce un campo magnético intenso e uniforme no seu interior.

- Semellante papel ao que xoga o condensador placas paralelas para crear C.E. uniforme entre as dúas placas

- Se o solenoide ten N espiras e lonxitude L, no interior:

$$B = \mu I \frac{N}{L}$$



(b)

4.5- FORZAS ENTRE CORRIENTES PARALELAS: DEFINIÇÃO DE AMPÉRIO.

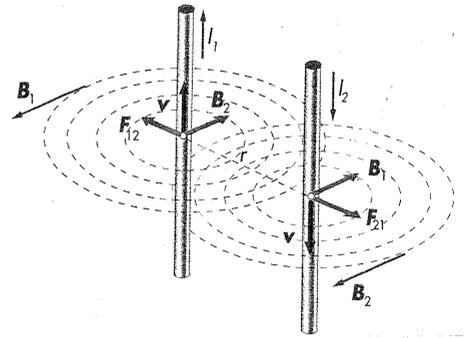
- 2 conductores paralelos, de comprimento L :

① I_1 , a uma distancia r de I_2 :

$$B_1 = \frac{\mu I_1}{2\pi r}$$

② I_2 , a uma distancia r de I_1 :

$$B_2 = \frac{\mu I_2}{2\pi r}$$



- Força de Lorentz: $\vec{F} = I \vec{L} \times \vec{B}$

+ $F = I l B$ se \vec{L} e \vec{B} son perpendiculares

B_1 sobre I_2 : $\vec{F}_{21} = I_2 \vec{L} \times \vec{B}_1$

• módulo: $F_{21} = I_2 L \cdot \frac{\mu I_1}{2\pi r}$

B_2 sobre I_1 : $\vec{F}_{12} = I_1 \vec{L} \times \vec{B}_2$

módulo: $F_{12} = I_1 L \frac{\mu I_2}{2\pi r}$

} Mesma intensidade e direção,
sentidos opostos
(3ª lei de Newton!)

- Def AMPÉRIO (unidade fundamental de medida): "É a intensidade de corrente que circula por dois conductores rectilíneos paralelos, separados uma distancia de 1m cando a força mútua que actua entre eles é igual a $2 \cdot 10^{-7} N$ por metro de conductor."

4.6- LEI DE AMPÈRE: APLICACIÓN: C. M. CREADOS POR UN SOLENOIDE

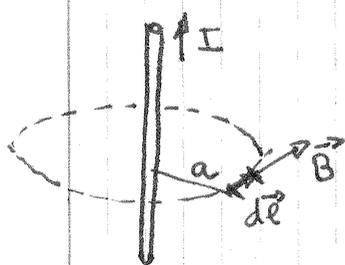
- ¿É o campo magnético conservativo?

○ C. Eléctrico é conservativo porque o trabalho realizado por este ao longo dunha liña cerrada é cero; isto é:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0$$

- Para verificar se o C.M. é conservativo, consideramos un fio de

corrente retilínea:



Calculamos a integral ao longo dumha linha de C.M.:
 Como $d\vec{l} \parallel \vec{B}$ em todos os pontos:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \int B \cdot dl \cdot \cos 0 = \int B dl$$

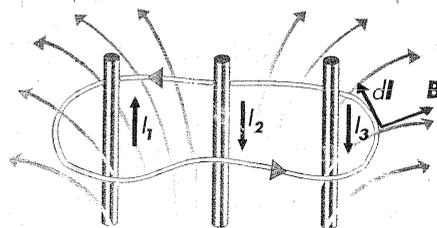
Como $B = \frac{\mu I}{2\pi a}$: $\int B dl = \frac{\mu I}{2\pi a} \int dl = \frac{\mu I}{2\pi a} \cdot 2\pi a$

Logo: $\boxed{\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu \cdot I}$ Lei de Ampère

Por tanto, o resultado é $\neq 0$, logo o C.M. não é conservativo.

Non podemos definir para cada punto do espaço um potencial.

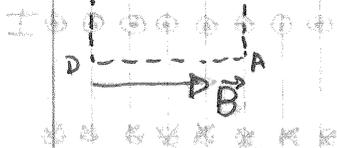
- A lei de Ampère é válida para qualquer C.M., qualquer corrente eléctrica constante e qualquer trajectória fechada que se elixa na integração. Xopa un papel semelhante á lei de Gauss no C.E. $I = \sum i_i$, con signo



4.6.1.- C.M. creado por un solenoide no seu

interior

Hipóteses: 1) O C.M. está dirixido ao longo do eixo do solenoide, sendo uniforme; 2) O C.M. fóra do solenoide é desprezível.



Escollemos a liña cerrada ABCD como trajectória:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \int_{AB} \vec{B} \cdot d\vec{l} + \int_{BC} \vec{B} \cdot d\vec{l} + \int_{CD} \vec{B} \cdot d\vec{l} + \int_{DA} \vec{B} \cdot d\vec{l}$$

Assí: $\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \int_A^B B \cdot dl \cdot \cos 90 + \int_C^B dl \cdot \cos 0 + 0 + B \int_D^A dl = B \cdot b$

Pela lei de Ampère: $\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu I N'$, pois hai N' espiras entre B e C

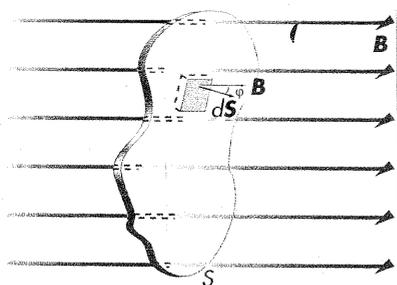
Assí: $B \cdot b = \mu I N' \Rightarrow \boxed{B = \frac{\mu N I}{L}}$, sendo $N = n^\circ$ total de espiras
 $L = \text{lonx. do solenoide}$

TEMA 5: INDUCCIÓN. CORRENTE ALTERNA

5.1. INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA

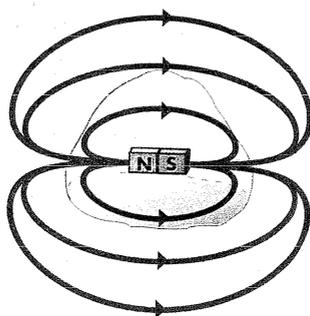
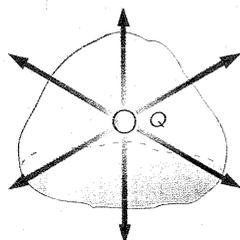
Experiencias de Faraday e Henry (1831): obter corrente eléctrica a partir de campos magnéticos. É, em certo modo, a experiência inversa à de Oersted. A chave está na variação temporal da quantidade de linhas de campo magnético que atravessam um circuito. Isto dá lugar aos chamados fenómenos de indução.

5.1.1. Fluxo magnético. Lei de Gauss para o C.M.



$$\phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = \int_S B \cdot \cos \varphi \cdot dS$$

Unidade no SI: weber: $1 \text{ Wb} = 1 \text{ T} \cdot \text{m}^2$
 $(1 \text{ T} = 1 \frac{\text{Wb}}{\text{m}^2})$

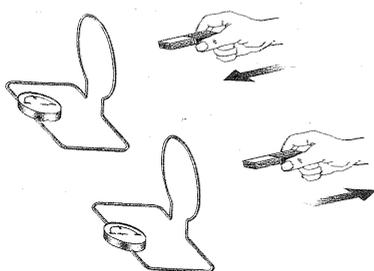


- Lei Gauss para o C.M.:
 Num imã, todas as linhas de campo que saem voltam a entrar na superfície:

$$\phi = \oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$

5.1.2. Experiência de Faraday-Henry

"Os campos magnéticos, baixo certas condições, são capazes de gerar correntes eléctricas e, por tanto, campos eléctricos"



Resumo das experiências: o galvanómetro detecta passo de corrente (corrente induzida) sempre que se "induz" uma variação do C. Magnético que atravessa as espiras do circuito.

Isto é, aparecerá unha corrente inducida se varía o fluxo magnético que atravesa o circuito. O fenómeno chámase Indución Electromagnética. O cambio de fluxo pódese producir:

- por cambio nas posicións relativas do inductor (ímán ou bobina) e inducido; isto é, durante o movemento relativo indúcese a corrente
- por cambio na intensidade da corrente do circuito inductor
- por cambio na permeabilidade do medio
- por cambio na forma do piñ dos circuitos.

5.2- CORRENTE INDUCIDA. LEIS DE FARADAY E LENZ.

2 leis para a indución EM:

- 1) Lei de Faraday, cuantifica o valor da forza electromotriz (fem) inducida pola variación de fluxo magnético:

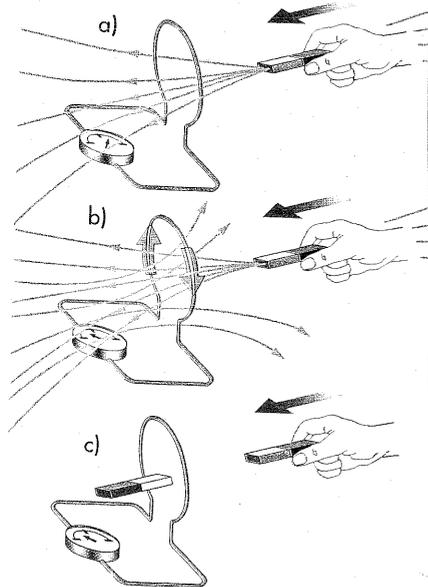
$$\mathcal{E} = - \frac{d\Phi_m}{dt}$$

$$\mathcal{E} = - \frac{d(B \cdot S \cdot \cos \theta)}{dt}$$

- 2) Lei de Lenz: cualitativa, dá o sentido da corrente inducida; é a orixe do signo negativo na lei de Faraday:

"O sentido da corrente inducida é tal que se opón á causa que a produce"

A lei de Lenz é unha forma do principio de conservación da enerxía. O traballo externo ao achegar ou afastar a espira ao ímán convértese en enerxía eléctrica no circuito.

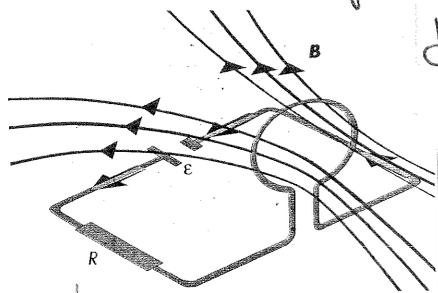


5.3- AUTOINDUCCIÓN.

Unha espira xera un campo magnético no seu centro. Xa que logo, se variamos a intensidade da corrente que circula pola espira, variamos o

campo magnético por esta produzido, e así varíamur o fluxo magnético a través da espira, dando lugar a unha corrente autoinducida (fenómenos de autoinducción)

- Segundo a lei de Ampère, o fluxo magnético é proporcional á intensidade. Se definíamur L como o coeficiente de autoinducción, ou simplemente autoinducción:



$$\phi = L \cdot I$$

Unidades de L no SI: henrio (H)

- Nun circuito eléctrico 

- Unha bobina ideal caracterízase polo L , de xeito que ao circular unha intensidade I variábel no circuito (por ex., una C. Alterna) indúcese unha fem (Faraday-Lenz):

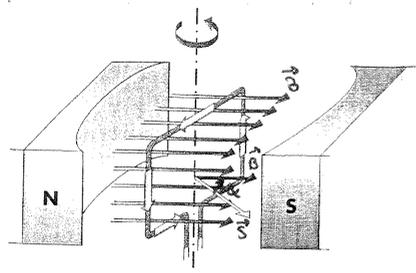
$$\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt} = -L \frac{dI}{dt}$$

A presenza dunha bobina nun circuito terá importancia se hai unha rápida variación de I no tempo.

5.4.- CORRENTES VARIÁBEIS: CORRENTE ALTERNA. XERADORES.

- Aplicación dos fenómenos de indución: produción e utilización da C.A.
- As correntes inducidas que aparecen cando existe movemento relativo entre condutores e campos magnéticos é a base de funcionamento de todas as centrais eléctricas.
- Unha fonte de C.A. é unha fonte de fem que produce entre os seus bornes unha diferenza de potencial oscilante. (Alternador)
- Nun circuito de C.A., o movemento dos electróns cambia de sentido un determinado número de veces por segundo.

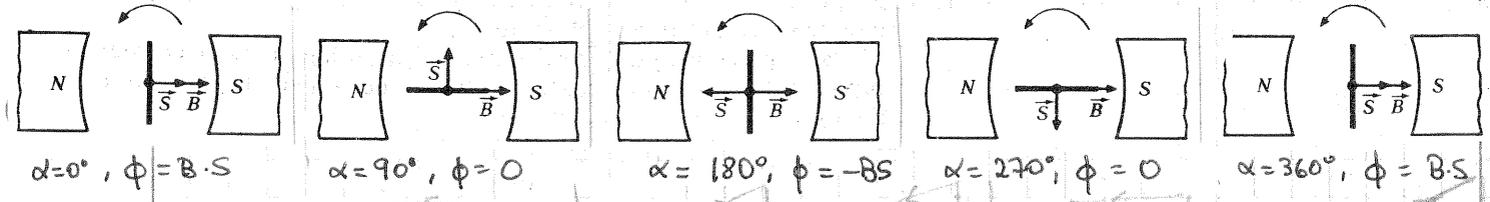
5.4.1.- Obtenção de correntes alternas



- Ao xirar a espira no interior do c. magnética, varia o fluxo que a atravessa, pelo que induzese na espira unha fem: (Lei Faraday)

$$E = - \frac{d\phi}{dt}$$

Esta corrente cambia de sentido cada vez que o cadro da espira pasa por unha posición normal ao c.m. ($\alpha = 0$), segundo a lei de Lenz.

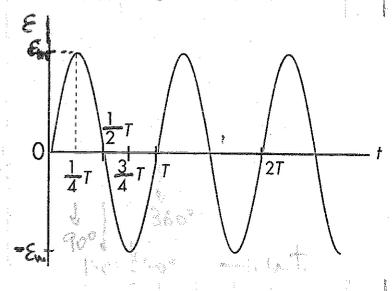


Se $\phi = \vec{B} \cdot \vec{S}$: $E = - \frac{d(\vec{B} \cdot \vec{S})}{dt} = - \frac{d(BS \cos \alpha)}{dt} = BS\omega \cdot \text{sen}(\omega t)$

tendo en conta que $\alpha = \omega \cdot t$, supoñemos que a espira xirva con velocidade angular constante.

Se $E_m = BS\omega$ (valor de E en $t=0$):

$$E = E_m \text{sen}(\omega t)$$



Observ.:

- O valor da fem varia co tempo. Por isto, o valor de E en calquera instante recibe o nome de fem instantánea.
- O valor da fem varia periodicamente: $T = \frac{2\pi}{\omega}$
- A frecuencia é: $f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi}$
- O valor máximo da fem é $E_m = B \cdot S \cdot \omega$
- Na realidade, as C.A. supoñen variacións periódicas de distintas formas de fem. Igual que ocorre nas vibracións co MHS, soamente estudiamos as tipo seno ou coseno porque o Teo de Fourier nos asegura o resto.