

Indução electromagnética e magnetismo da matéria

Materiais magnéticos (paramagnetismo, diamagnetismo e ferromagnetismo)

Curva de magnetização e histeréses magnética

Experiências de indução magnética

Lei de Faraday e lei de Lenz

Fem induzida de movimento

Geradores e Motores (TPC)

Materiais magnéticos

- No capítulo anterior ao discutirmos as fontes do campo magnético, os condutores eram sempre circundados pelo vácuo. Entretanto, as bobinas encontradas em transformadores, motores e geradores, usam sempre núcleo de ferro para aumentar o campo magnético e confiná-lo em determinadas regiões.
- Os ímãs permanentes, as fitas magnéticas e discos de computadores dependem das propriedades magnéticas dos materiais. Os materiais magnéticos classificam-se em paramagnéticos, diamagnéticos e ferromagnéticos .

- Chamamos de magnéticos aos materiais que possuem um momento magnético $\mu_B \neq 0$, tal que quando colocados num campo magnético exterior, cada dipolo magnético sofre um torque que tende a alinhar os dipolos magnéticos ao campo, tal que sua direcção é indicada pela posição correspondente a energia potencial mínima.

$$\vec{\tau} = \vec{\mu}_B \times \vec{B}$$

Sendo numa espira o campo magnético produzido é proporcional ao momento dipolar magnético, analogamente o campo magnético adicional devido as espiras microscópicas é proporcional ao momento magnético total por unidade de volume (a magnetização):

$$\vec{M} = \frac{\vec{\mu}_{tot}}{V}$$

O campo magnético associado à magnetização é $\vec{B}' = \mu_0 \vec{M}$ e o campo resultante é:

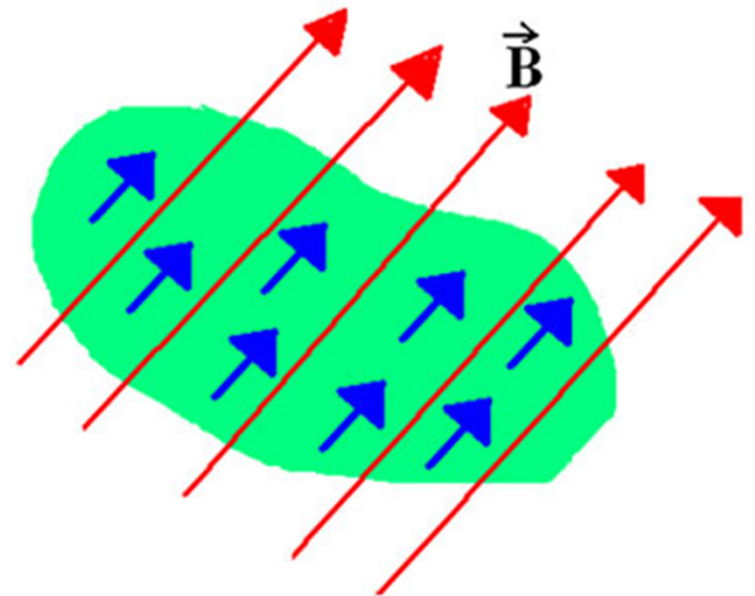
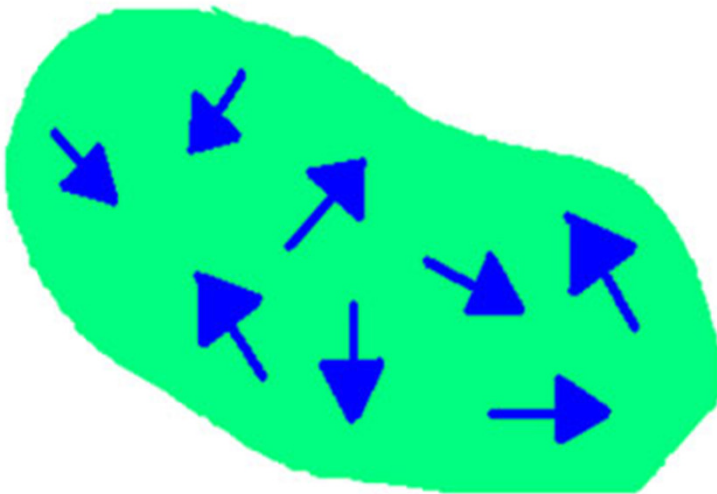
$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \mu_0 \vec{M}$$

Onde \vec{B}_0 é o campo magnético produzido pela corrente que flui no condutor.

- **Paramagnetismo:** Estes materiais têm ímãs microscópicos, mas orientados de forma aleatória o que resulta numa magnetização macroscópica nula. Quando colocado num campo magnético exterior, os ímãs microscópicos alinham-se no sentido do campo exterior. A orientação desses ímãs atómicos depende da intensidade do campo exterior e da temperatura.
- Chama-se de permeabilidade magnética relativa a grandeza adimensional K_m e ao produto desta grandeza com μ_0 , chama-se de permeabilidade magnética do material:

$$\mu = K_m \mu_0$$

Paramagnético num campo ex.terno



Nesta equação μ não é momento magnético dipolar, como representado no capítulo IX.

Chama-se de susceptibilidade magnética a diferença entre a permeabilidade magnética relativa e a unidade:

$$\chi = K_m - 1$$

A tendência dos momentos magnéticos atômicos estarem alinhados com o campo magnético é dificultada pela agitação térmica, e a susceptibilidade magnética é menor que unidade com aumento de temperatura:

$$M = C \frac{B}{T} \quad (\text{lei de Curie})$$

C – constante de Curie, dependente da natureza do Material;

B- densidade do fluxo magnético aplicado (em tesla)

- A lei de Curie mostra que para baixas temperaturas o efeito de agitação térmica diminui e prevale a tendência de alinhamento dos momentos dipolares magnéticos enquanto que para temperaturas normais o efeito térmico produz um movimento caótico dos momentos dipolares magnéticos. Por isso, os materiais paramagnéticos como Al ou Na não são atraídos por ímã (a força é fraca).

Diamagnetismo: na ausência de um campo magnético externo, neste tipo de materiais, o momento magnético total produzido por todas as espiras atômicas é nulo. Mesmo assim, os diamagnéticos exibem efeitos magnéticos quando submetidos a um campo magnético, são induzidos dipolos magnéticos dirigidos no sentido contrário ao campo aplicado. Diamagnéticos são fracamente repelidos por campos magnéticos.

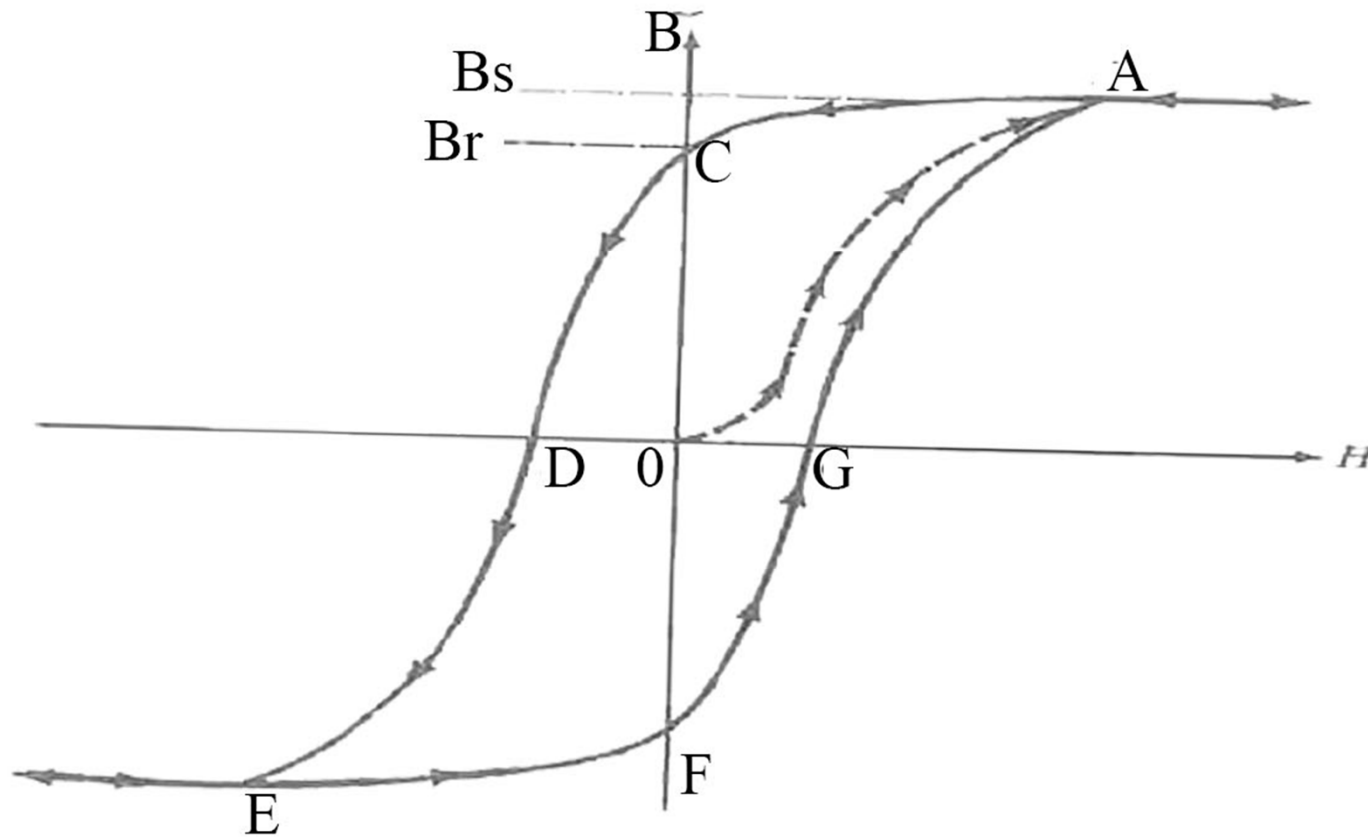
Os diamagnéticos apresentam susceptibilidade magnética negativa e permeabilidade magnética próxima de 1 (entre 0,99990 à 0,99999). Alguns materiais diamagnéticos são: Cu, Ag, Cu e Pb)

- **Ferromagnetismo:** São ferromagnéticos os materiais como Fe, Co, Ni e compostos na base destes elementos. Esta classe de materiais magnéticos possuem um momento magnético espontâneo mesmo na ausência do campo externo; a forte interacção entre os diferentes momentos magnéticos atômicos produz um alinhamento interno em certas regiões, os domínios magnéticos. Estes domínios existem mesmo na ausência do campo externo.
- No interior de cada domínio magnético quase todos os momentos magnéticos atômicos são paralelos. **Ferromagnéticos são atraídos por campos magnéticos.**
- Na ausência do campo externo \vec{B}_0 , as magnetizações dos domínios estão orientados ao acaso, alinhando-se paralelamente ao campo, quando este está presente. Domínios magnetizados no sentido do campo alongam-se e os magnetizados noutras direcções encolhem. A permeabilidade magnética relativa nestes materiais $\gg 1$ (situa-se entre 1000 a 100000). E a susceptibilidade magnética segue a lei de Curie-Weiss.

$$\chi = \frac{C\rho}{T - T_C}$$

ρ -densidade e T_C - temperatura de Curie (define a transição de ferro para paramagnetismo).

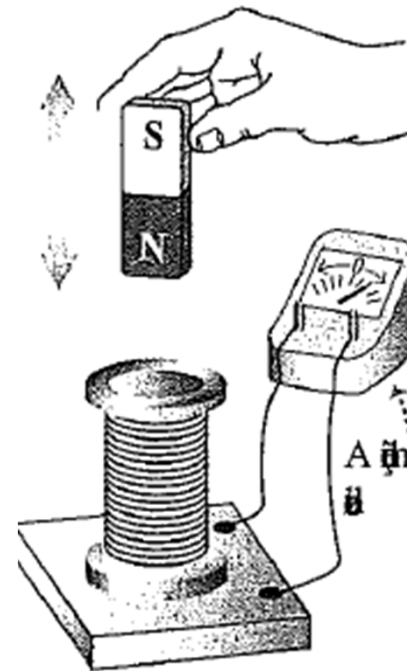
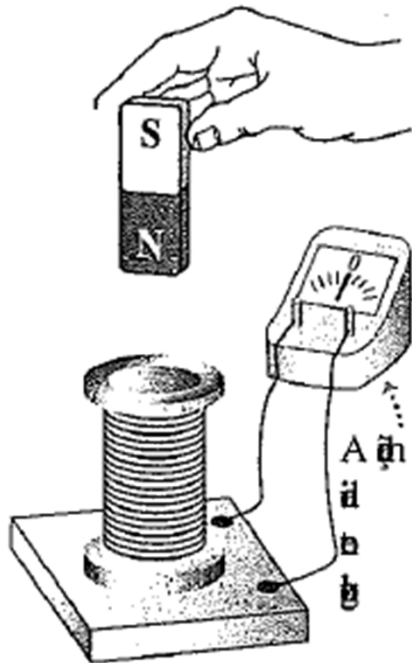
Curva de magnetização e histereses magnética



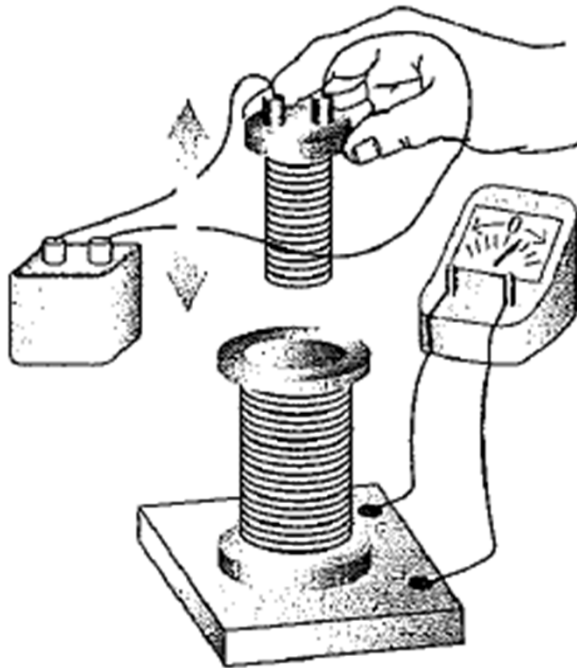
- Num material ferromagnético quando o campo externo \vec{B} aplicado aumenta a partir de zero, a indução magnética aumenta até ao valor de saturação. Nesta situação todos os domínios magnéticos estão alinhados no mesmo sentido e a magnetização é máxima.
- Ao diminuir o campo aplicado \vec{H} , a curva não é seguida, há sempre um magnetismo residual;
- Para que o módulo de \vec{B} seja nulo novamente, é necessário aplicar um campo coercivo \vec{H} aplicado no sentido oposto (D),
- Se o campo aplicado continuar aumentar no sentido negativo, pode ser atingida a saturação (E);
- Removido o H negativo, a indução magnética volta a crescer até F. Aplicando mais H positivo, o ciclo fecha-se.

Experiências de indução magnética

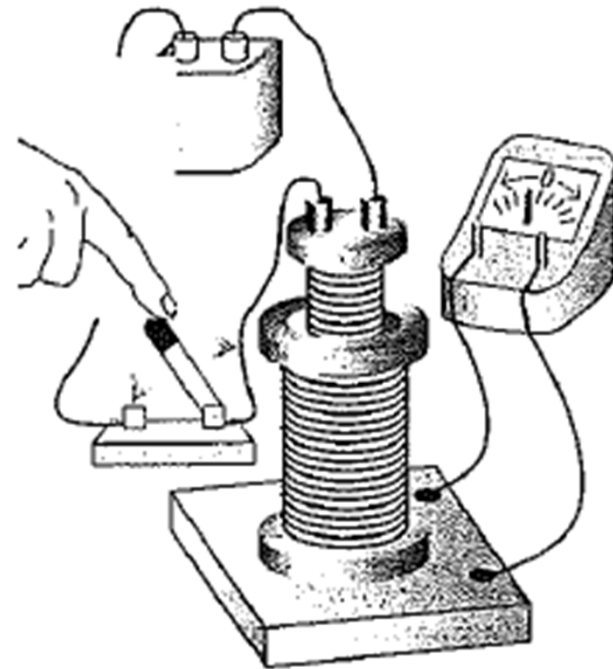
- Ímã estático na ausência de I_i
- Ímã móvel provoca I_i na bobina



Aproximação à bobina 1
de 2ª bobina com
corrente



Variação da corrente na
de 2ª bobina abrindo ou
fechando interruptor



Lei de Faraday e lei de Lenz

- Lembremos que para um elemento infinitesimal de área dS ($d\vec{S} = dS\vec{n}$), define-se o fluxo do campo magnético através desse elemento por:

$$d\Phi_B = \vec{B}d\vec{S} = B dS \cos \theta$$

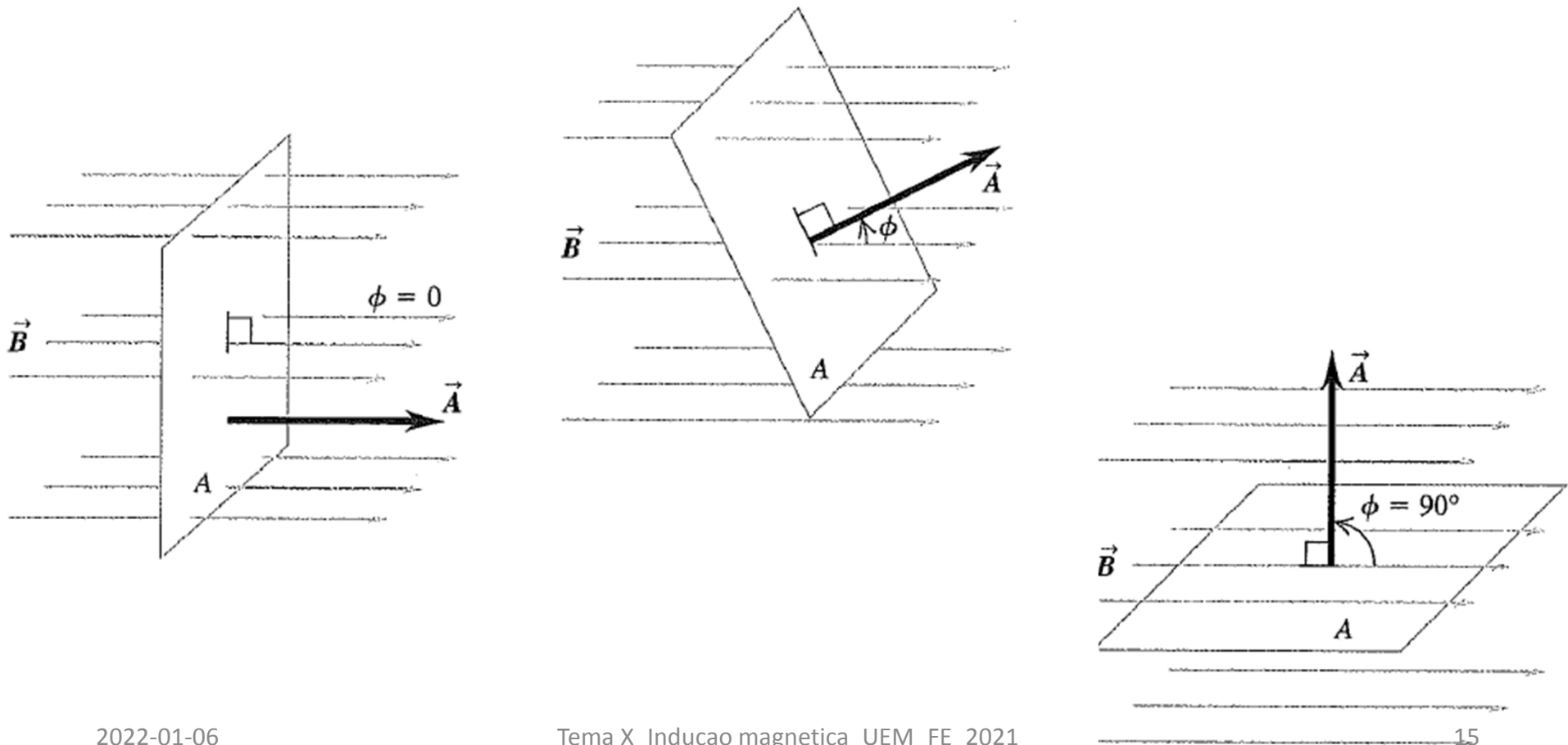
O fluxo magnético total através de uma área finita é a integral do fluxo elementar:

$$\Phi_B = \int B dS \cos \theta$$

Quando o campo magnético é constante ao longo de uma área plana o cálculo do fluxo magnético fica simplificado, tornando-se em:

$$\Phi_B = BS \cos \theta$$

- Em dependência da orientação relativa do campo magnético e a normal, podemos encontrar diferentes valores do fluxo para mesmos valores de B e S , como mostram as figuras.



- A variação temporal do fluxo magnético num contorno fechado (espira) é igual à fem que se induz na espira excepto o sinal.

$$\varepsilon_i = - \frac{d\Phi_B}{dt} \text{ (lei de indução de Faraday)}$$

Existem várias maneiras de variar o fluxo magnético:

- a. Variação de B (aumento ou diminuição da intensidade de \vec{B})
- b. Variação de S (expansão ou contração da área)
- c. Variação de ambas as grandezas (B e S)
- d. B e S constantes e variação da orientação relativa de \vec{B} e \vec{S} (rotação da superfície).

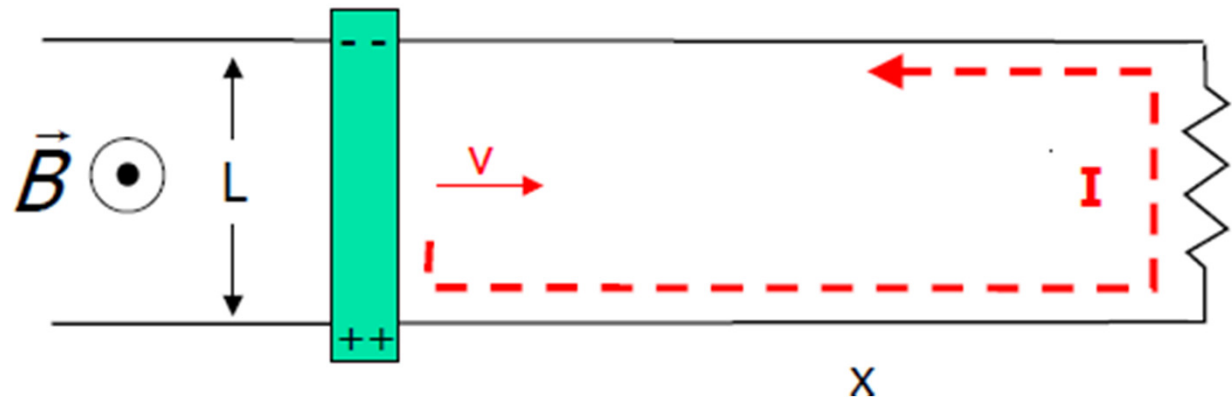
- Quando se trata de uma bobina enrolada de forma compacta, cada volta na bobina equipara-se a uma espira circular. A lei de Faraday neste caso tem o seguinte aspecto:

$$\varepsilon_{tot} = N\varepsilon_i = -N \frac{d\Phi_B}{dt}$$

Para efeitos de cálculo da força electromotriz induzida ignora-se o sinal que antecede a o termo direito da lei de Farady. A lei de Lenz encarrega-se a determinar o sentido da corrente.

- **Lei de Lenz:** O sinal (-) na lei de Faraday tem a ver com o sentido da corrente induzida.

O sentido da corrente induzida é tal que a sua contribuição para o campo magnético é oposta à variação do fluxo magnético que produz a corrente induzida.



- No circuito indicado, o movimento do condutor para a direita suscita a diminuição da área S , fazendo com que o fluxo magnético também diminua ($\vec{B} = \text{const}$).
- A diminuição do fluxo com o tempo cria uma força electromotriz que compense tal diminuição do fluxo. Ou seja, a corrente induzida tem que ter sentido anti-horário, pois só assim é que a força magnética no condutor fica dirigida para a esquerda.
- Se o movimento do condutor fosse para aumentar o fluxo, então a corrente induzida teria sentido horário de modo a opor-se ao aumento do fluxo com o tempo.

- **Exemplo 1:** Uma bobina circular de 75 voltas e 35 mm de raio tem seu eixo paralelo a um campo magnético espacialmente uniforme. O módulo do campo varia a uma taxa constante de 18 a 43 mT em 240 ms. Determine o módulo da fem induzida na bobina durante esse intervalo de tempo.

- Solução: o fluxo devido a uma única volta é:

$$\Phi_B = BS \cos \theta = BS (\text{porque } \vec{B} \uparrow \uparrow \vec{n}),$$

Ou,

$$\Phi_B = B\pi R^2 \quad (R - \text{raio da espira} = \text{raio de 1 volta na bobina})$$

$$\varepsilon_{tot} = -N \frac{d\Phi_B}{dt} = -N\pi R^2 \frac{dB}{dt} = -75\pi (35 \times 10^{-3})^2 \frac{\Delta B}{\Delta t}$$

O módulo de ε_{tot} é

$$\begin{aligned} \varepsilon_{tot} &= 75\pi \times 1225 \times 10^{-6} \times \frac{(0,043 - 0,018)}{0,24} = 0.030 \text{ V} \\ &= 30 \text{ mV} \end{aligned}$$

- **Exemplo 2:** Uma bobina circular de 500 espiras circulares e 4,0 cm de raio é colocada entre os pólos de um grande eletroímã, onde o campo magnético é uniforme e forma um ângulo de 60° com o plano da bobina. O campo magnético diminui à taxa de 0,200 T/s. Qual é o módulo e o sentido da fem induzida?

- Solução: o fluxo devido a uma única volta é:

$$\Phi_B = BS \cos \beta = BS \cos(90^\circ - \theta)$$

$$\varphi = \oint (\vec{B} \cdot \vec{n}) \quad \& \quad \theta = \angle(\vec{B} \& \text{plano da bobina})$$

- $\frac{d\Phi_B}{dt} = \frac{dB}{dt} S \cos \varphi$

- $\frac{dB}{dt} = -0,200 T/s$

Logo,

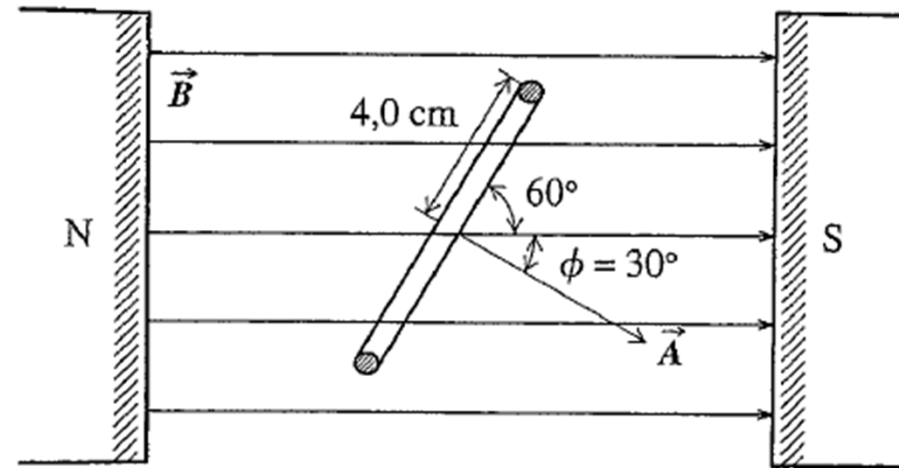
$$\frac{d\Phi_B}{dt} = \frac{dB}{dt} S \cos \varphi = -0,200 \times \pi R^2 \cos 30^\circ$$

$$\frac{d\Phi_B}{dt} = -0,200 \times 3,14 \times (4 \times 10^{-2})^2 \times 0,866 =$$

$$= -8,7 \times 10^{-4} \text{ Wb/s}$$

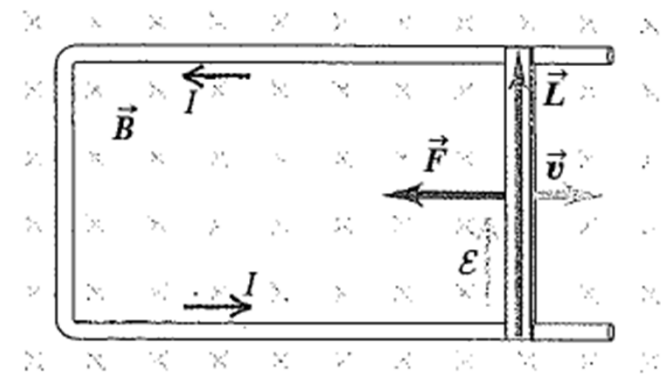
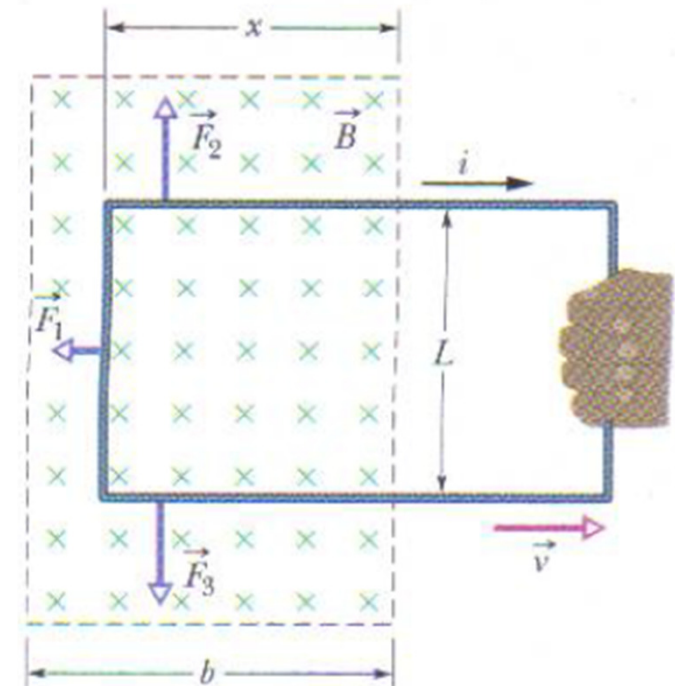
$$\varepsilon_{tot} = -N \frac{d\Phi_B}{dt} = 500 \times \frac{8,7 \times 10^{-4} \text{ Wb}}{s} = 0,435 \text{ V}$$

O sentido coincidirá com o sentido da corrente (horário- se observador olhar pelo lado esquerdo).



Fem induzida de movimento

- Quando o fluxo do campo magnético varia devido apenas ao movimento do próprio circuito (espira condutora) na sua totalidade ou parcialmente, diz-se que a fem induzida associada é de movimento.



- Na figura de cima nota-se que ao deslocar a espira, a parte da espira atravessada pelo \vec{B} diminui e consequentemente diminuirá o fluxo do campo magnético. Como consequência da variação do fluxo, vai surgir fem induzida no circuito, cuja corrente provoca força magnética que se opõe ao movimento:
- $\Phi_B = BS = BLx$
- O módulo da fem induzida é $\varepsilon_i = \frac{d(BLx)}{dt} = BLv$

Na outra figura o fluxo aumenta com o aumento da área atravessada pelo \vec{B} .

Na figura considera-se um condutor em forma de U, o qual está imerso num campo magnético que entra no plano da página. O circuito completa-se por um condutor leve que pode mover-se livremente através do condutor em U.

Um gerador com haste deslizante (baseado na figura em análise) é de corrente contínua.

A fem de movimento pode ser generalizada (para condutor de \forall forma e que se move em $\forall \vec{B}$):

$$d\varepsilon_i = (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l}$$

Para \forall espira fechada $\varepsilon_i = \oint (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l}$

Campos eléctricos induzidos

- Sabemos que para um campo eléctrico estacionário (as cargas são imóveis) é conservativo, isto é, o trabalho por trajectória fechada é nulo:

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

No caso do campo eléctrico induzido, associado a fem induzida temos:

$$\oint \vec{E}_i d\vec{l} = \varepsilon_i$$

$$\oint \vec{E}_i d\vec{l} = -\frac{d\Phi_B}{dt} = -\frac{d}{dt} \int \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad (\text{Lei de Faraday})$$

Para \forall trajecto fechado e qualquer superfície delimitada pelo trajecto fechado.

- Algumas analogias da lei de Faraday (LF) com a de Ampere (LA):

$$\oint \vec{B} d\vec{l} = \mu_0(i_c + I_d) = \mu_0 \left(i_c + \varepsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \right) : \text{LA}$$

Sobretudo para $i_c = 0$, o campo eléctrico variável é a causa ou fonte do campo magnético.

$$\oint \vec{E}_i d\vec{l} = - \frac{d\Phi_B}{dt} : \text{LF}$$

Campo magnético variável é a causa ou fonte do campo eléctrico

Geradores e Motores (TPC)

- O que é?
- Em que consiste?
- Qual o seu princípio de funcionamento?
- Por quê o gerador de corrente contínua baseado em condutor deslizando não é prático?