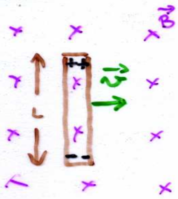
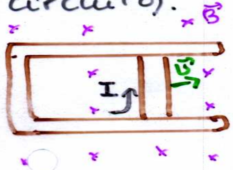
força eletromotriz produzida pelo movimento

A lei de faraday $\mathcal{E} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$ é válida em duas situações diferentes (como podemos ver nos exemplos da aula anterior): um condutor em movimento num campo magnético e um condutor num campo magnético variável. Nesta aula, analisemos o primeiro caso e na próxima, o segundo caso.

Quando um condutor está em movimento num campo magnético, aparece nele uma fem induzida chamada fem de movimento. Ela é dada pela lei de faraday mas pode também ser escrita de outra maneira como veremos agora.



inicialmente os e^- são submetidos a $\vec{f}_m = q\vec{v}\wedge\vec{B}$ e migram p/baixo. Aparece cargas + encima e − embaixo. Isso faz surgir um campo elétrico $\vec{E}$ (apontando das cargas + as −). Assim os e^- são também submetidos a $\vec{f}_e = q\vec{E}$, com sentido oposto a $\vec{f}_m$. Quando $\vec{f}_e = -\vec{f}_m$, o equilíbrio é atingido (não há mais movimento de e^-) $\underset{E = vB}{\therefore}$. Em outras palavras, o movimento da haste gera uma ddp ou fem entre suas extremidades: $\mathcal{E} = EL = vBL$. Ela é parecida com uma bateria (fora de um circuito).



Quando a haste deslizante faz parte de um circuito, não só há fem de movimento, mas corrente que circula (como para uma bateria num circuito). $\mathcal{E} = vBL$ continua valendo.

Lei de Lenz

Método alternativo para determinar o sentido da fem ou da corrente induzida.

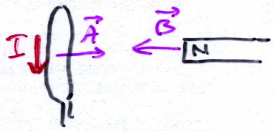
i) Não é um princípio independente. Ela é relacionada com a conservação de energia

ii) Ela dá o mesmo resultado do que a lei de Faraday mas é mais fácil de usar.

> O sentido de qualquer efeito de indução magnética é tal que ele se opõe à causa que produz esse efeito.

Queremos achar o sentido de $\mathcal{E}$ e de I, neste exemplo da aula passada.

. Usando a lei de Faraday:

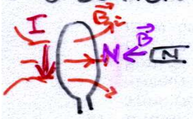


$$\Phi = -BA \quad \text{com } B\uparrow$$

$$\frac{d\Phi}{dt} = -\underbrace{\frac{dB}{dt}}_{>0}A < 0$$

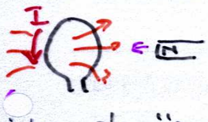
$$\Rightarrow \mathcal{E} = -\frac{d\Phi}{dt} > 0$$

• Usando a lei de Lenz: 1ª alternativa



Para se opor a aproximação de um polo N, a espira "cria" um polo N (cf. figura) $\Rightarrow$ isto nos fornece o sentido de I indicado.

• Usando a lei de Lenz: 2ª alternativa

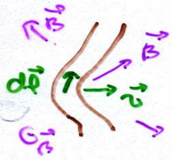


Quando o imã se aproxima, a bobina intercepta cada vez mais linhas de campo. Para se opor a isto, ela "cria" linhas de sentido oposto $\Rightarrow$ isto nos fornece o sentido de I indicado.

134

Obs. 1: se no lugar de um polo N, aparecia um S, então bastaria um pequeno empurrão sobre o imã para iniciar um processo onde sua velocidade cresceria cada vez mais (quanto maior a velocidade, maior a corrente induzida e, conseqüentemente a atração). A taxa de dissipação de calor na bobina também cresceria cada vez mais. Isto é, apareceria muita energia na bobina enquanto foi só fornecido o empurrãozinho, o que viola a conservação de energia. Por outro lado, quando aparece o N, temos que fazer um esforço para aproximar o imã. É este trabalho que é igual a energia térmica da bobina. Isto é, há conservação de energia. É por isto que dizemos que a lei de Lenz é relacionada com a conservação de energia.

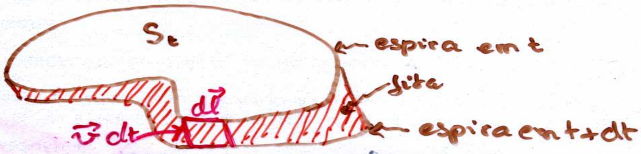
Obs. 2: se fizermos a experiencia com uma espira cortada, não haverá nem corrente induzida, nem energia térmica, nem força repulsiva sobre o imã. Ainda assim teremos uma fem induzida na espira. (Isto ficará mais claro na próxima aula.)



A discussão anterior pode ser generalizada a um condutor de forma qualquer num campo magnético uniforme ou não, de direção qualquer (mas não variando no tempo de um ponto para outro).

Sobre $d\vec{l}$, teremos no equilíbrio $dq\,\vec{v}\wedge\vec{B} = -dq\,\vec{E} \Rightarrow -\vec{E} = \vec{v}\wedge\vec{B}$ daí entre as extremidades de dl: $d\mathcal{E} = \vec{E}\cdot d\vec{l} = (\vec{v}\wedge\vec{B})\cdot d\vec{l}$. Para o condutor todo: $\boxed{\mathcal{E} = \int(\vec{v}\wedge\vec{B})\cdot d\vec{l}}$

Agora, mostramos que esta fem obedece a lei de Faraday. [Consideremos uma espira qualquer em movimento num campo magnético.



$\oint \vec{B}\cdot d\vec{A} = 0$ com $S = S_t + S_{t+dt} + \text{fita}$

$\Rightarrow \Phi_{t+dt} = \Phi_t + \Phi_{fita} \Rightarrow d\Phi \equiv \Phi_{t+dt} - \Phi_t = \Phi_{fita}$

$$\Rightarrow d\Phi = \int_{fita} \vec{B}\cdot d\vec{A} = \int_{fita} \vec{B}\cdot(\vec{v}\,dt\wedge d\vec{l}) = \int_{fita} \vec{B}\cdot(\vec{v}\wedge d\vec{l})\,dt$$

$$\Rightarrow \frac{d\Phi}{dt} = \int_C \vec{B}\cdot(\vec{v}\wedge d\vec{l}) = -\int_C (\vec{v}\wedge\vec{B})\cdot d\vec{l} = -\mathcal{E}. \quad]$$

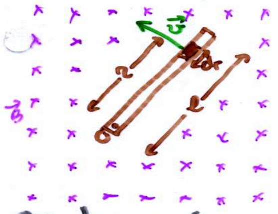
Em resumo, para um condutor em movimento num campo magn., a fem induzida é:

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi_B}{dt} = \oint(\vec{v}\wedge\vec{B})\cdot d\vec{l}$$

(Faraday) (fem de mov.)

Exemplos:

① Barra girante (com vel. ang. ω cte, ao redor de O)
⤳ fem induzida entre as extremidades



Para dr: $v = r\omega$ e $|d\mathcal{E}| = Bv\,dr$

$\Rightarrow |\mathcal{E}| = \int_0^\ell B\omega r\,dr = \frac{1}{2}B\omega\ell^2$

Para obter o sentido, lembramos que a força$^{magn.}$ sobre dr é $\vec{f} = dq\,\vec{v}\wedge\vec{B}$ se $dq>0$ (conveniente p/ determinar o sentido de $\mathcal{E}$) $\vec{f}$ aponta para O e $\mathcal{E}$ também

Estes resultados podem ser obtidos também com a lei de Faraday.

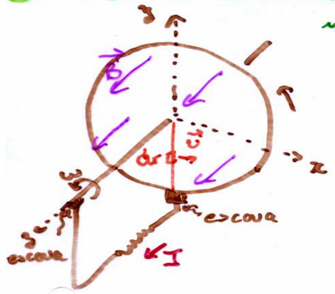
O fluxo através da área delimitada por aObℓ:

$\phi = -BA = -B\left(\frac{1}{2}\ell^2\theta\right)$

$\Rightarrow \mathcal{E} = -\frac{d\phi}{dt} = +\frac{1}{2}B\ell^2\frac{d\theta}{dt} = \frac{1}{2}B\omega\ell^2$

Como $\mathcal{E}>0$, ela deve apontar de a p/ O. Pode-se usar a lei de Lenz p/ verificar. Para se opor ao aumento do nº. de linhas através da área, precisa uma fem que provocaria num circuito fechado, um $\vec{B}_{ind.}$ assim ⊙, i.e. fem apontando de a para O.

② Dínamo baseado no disco de Faraday
⤳ fem induzida entre centro e periferia?

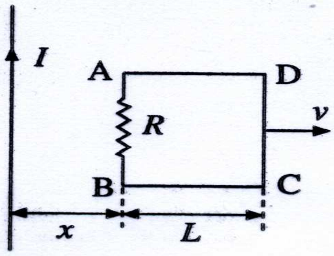


Para dr: $\begin{cases} |d\mathcal{E}| = vB\,dr \\ v = \omega r \end{cases}$ daí $|\mathcal{E}| = \int_0^R \omega B r\,dr = \frac{1}{2}\omega B R^2$

Para determinar o sentido, podemos ver que $\vec{f}_{mag} = dq\,\vec{v}\wedge\vec{B}$ aponta p/ baixo (se $dq>0$) ou usar a lei de Lenz como no ①.

Questão 2

Um fio retilíneo muito longo conduz uma corrente I. Uma espira quadrada de lado L, com resistência R, move-se com velocidade v constante, conforme é indicado na figura. No instante $t = 0$ a distância x entre o lado AB da espira e o fio é igual a L ($x(0) = L$).



(a) (0,5 ponto) Usando a lei de Ampère, calcule o campo magnético produzido pelo fio.

(b) (1,0 ponto) Calcule o fluxo do campo magnético na espira em função de t.

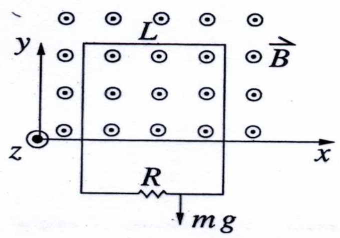
(c) (0,5 ponto) Determine a intensidade e o sentido (horário ou anti-horário) da corrente induzida na espira.

(d) (0,5 ponto) Calcule a indutância mútua M entre o fio e a espira.

2009

Questão 2

Uma espira retangular de largura L, resistência R e massa m está caindo, sob a ação do campo gravitacional, em uma região onde há um campo magnético uniforme como indicado na figura abaixo (não há campo magnético abaixo do eixo x).



(a) (0,5 ponto) Usando a lei de Lenz, explique qual é o sentido da corrente produzida na espira (horário ou anti-horário).

(b) (1,0 ponto) Obtenha a corrente induzida na espira em função da velocidade instantânea de queda $v = dy/dt$. Note que $v < 0$.

(c) (1,0 ponto) Determine a força magnética sobre a espira (módulo, sentido e direção). Suponha que antes de sair totalmente da região com campo magnético a espira atinja uma *velocidade limite* v_ℓ (movimento com aceleração nula). Escreva a equação de movimento da espira e calcule a velocidade limite v_ℓ.

8