



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Escola de Engenharia de Lorena – EEL

“LOB1053 - FÍSICA III”

Prof. Dr. Durval Rodrigues Junior

Departamento de Engenharia de Materiais (DEMAR)

Escola de Engenharia de Lorena (EEL)

Universidade de São Paulo (USP)

Polo Urbo-Industrial, Gleba AI-6 - Lorena, SP 12600-970

durval@demar.eel.usp.br

Rodovia Itajubá-Lorena, Km 74,5 - Caixa Postal 116
CEP 12600-970 - Lorena - SP
Fax (12) 3153-3133
Tel. (Direto) (12) 3159-5007/3153-3209

USP Lorena
www.eel.usp.br

Polo Urbo-Industrial Gleba AI-6 - Caixa Postal 116
CEP 12600-970 - Lorena - SP
Fax (12) 3153-3006
Tel. (PABX) (12) 3159-9900

UNIDADE 9 –

LEI DE FARADAY E

LEI DE LENZ

Indução

Sabemos que:

Uma espira condutora percorrida por uma corrente i na presença de um campo magnético sofre ação de um torque:
espira de corrente + campo magnético $\Rightarrow$ torque

mas...

- Se uma espira, com a corrente desligada, girar no interior de uma região onde há um campo magnético B , aparecerá uma corrente i na espira? Isto é:
- **torque + campo magnético $\Rightarrow$ corrente?**

Experimentos de Faraday

As respostas a essas questões foram dadas por Michael Faraday em 1831. Ele observou que o *movimento relativo* no conjunto ímãs e circuitos metálicos fechados fazia aparecer nestes últimos *correntes transientes*.

Primeiro experimento:

Espira conectada a um galvanômetro – não há bateria!

1- Se houver *movimento relativo* ímã-espira aparecerá uma corrente no galvanômetro.

2- *quanto mais veloz* for o movimento, *maior será a corrente* na espira.

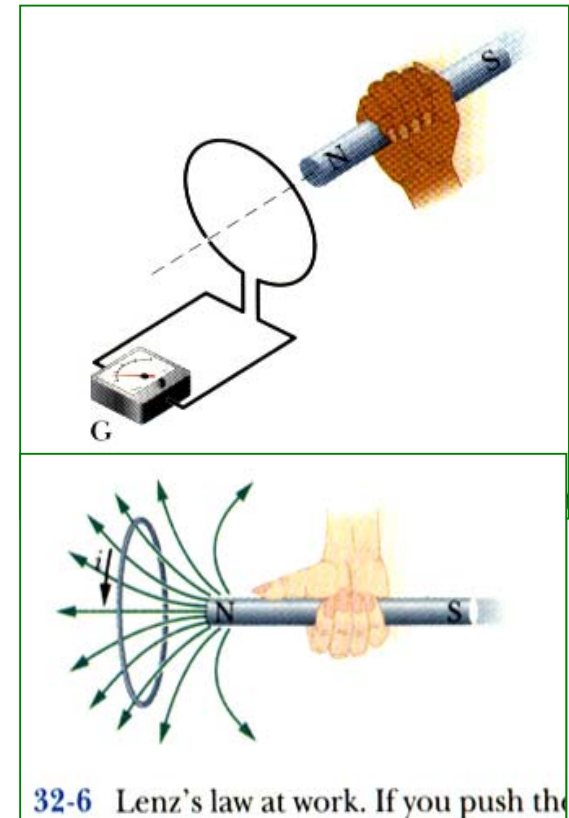


Fig.1 corrente induzida

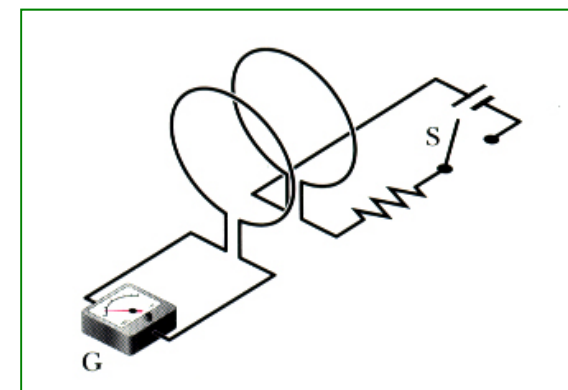
Experimentos de Faraday

Segundo experimento:

Figura ao lado: duas espiras condutoras próximas uma da outra, mas sem se tocarem.

Fechando-se S (para ligar a corrente na espira da direita) aparece um **pico momentâneo** de corrente no galvanômetro.

Abrindo-se S (para desligar a corrente), aparece um pico momentâneo de corrente no galvanômetro, na **direção oposta à anterior**.



Embora não haja movimento das espiras, temos uma **corrente induzida** ou uma **força eletromotriz induzida (fem)**

Nesta experiência, uma **fem** é induzida na espira somente quando o campo magnético que a atravessa estiver variando.

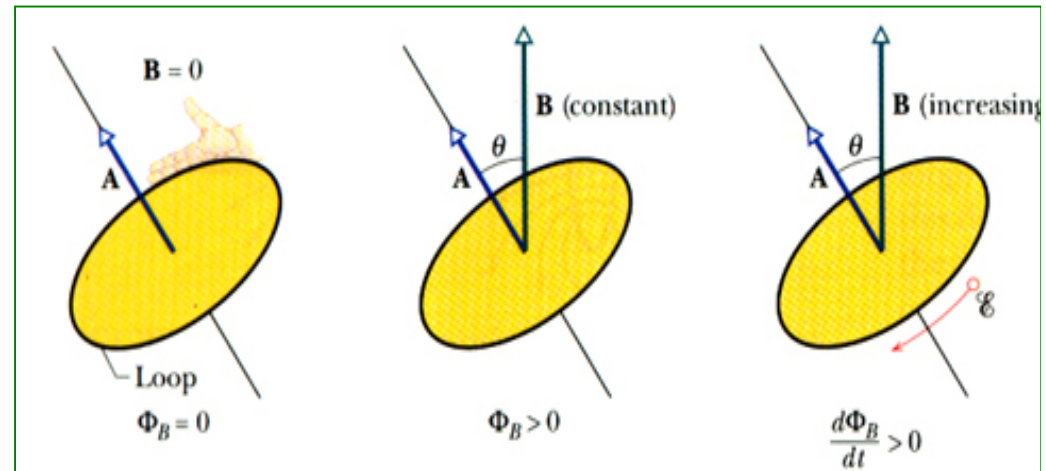
A Lei de Faraday da Indução

Fluxo do campo magnético:

$$\phi_B = \int_S \vec{B} \cdot \hat{n} dA$$

A unidade SI para fluxo é o weber (Wb)

$$1\text{weber} = 1\text{Wb} = 1\text{T.m}^2$$



A intensidade da *fem* $\mathcal{E}$ é igual à taxa de variação temporal do *fluxo do campo magnético* :

$$\mathcal{E} = -\frac{d\phi_B}{dt} \text{ (Lei de Faraday)}$$

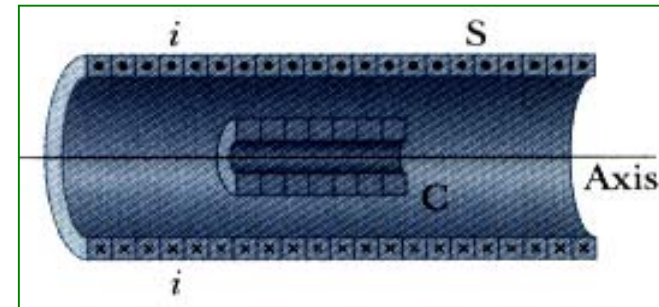
O *sinal negativo* indica que a *fem* deve se *opor* à *variação* do fluxo que a produziu.

Exemplo 1

Um longo solenóide S (em corte longitudinal) mostrado na figura ao lado tem **220 voltas/cm** e transporta uma corrente **$i = 1,5\text{A}$** ; seu diâmetro **$D = 3,2\text{ cm}$** . Em seu centro encontra-se uma bobina compacta C de **130 voltas** e diâmetro **$d = 2,1\text{ cm}$** . A corrente no solenóide é reduzida a zero a uma taxa uniforme em **25 ms**. Qual a intensidade da **fem** induzida na bobina C enquanto a corrente no solenóide estiver variando?

O fluxo *por volta* na bobina compacta é

$$\begin{aligned}\phi_B &= BA = (\mu_0 i n) \left(\frac{\pi d^2}{4} \right) \\ &= (4\pi \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A}) (1,5\text{A}) (22 \times 10^3 \text{ voltas/m}) \times \\ &\quad (3,46 \times 10^{-4} \text{ m}^2) \\ &= 1,44 \times 10^{-5} \text{ Wb}\end{aligned}$$



A variação deste é então

$$\frac{d\phi_B}{dt} = \frac{\Delta\phi_B}{\Delta t} = \frac{\phi_{B,f} - \phi_{B,i}}{\Delta t} = \frac{0 - 1,44 \times 10^{-5} \text{ Wb}}{25 \times 10^{-3} \text{ s}} = -5,76 \times 10^{-4} \text{ V}$$

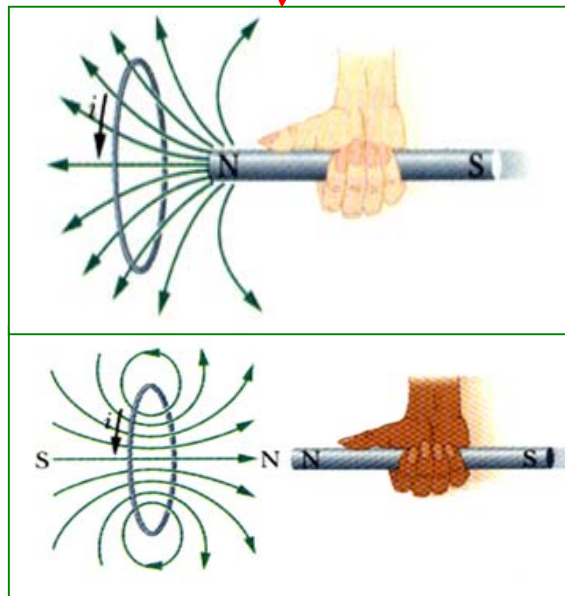
Como consequência a **fem**

$$\varepsilon = -N \frac{d\phi_B}{dt} = -(130 \text{ voltas})(-5,76 \times 10^{-4} \text{ V}) = 75 \text{ mV}$$

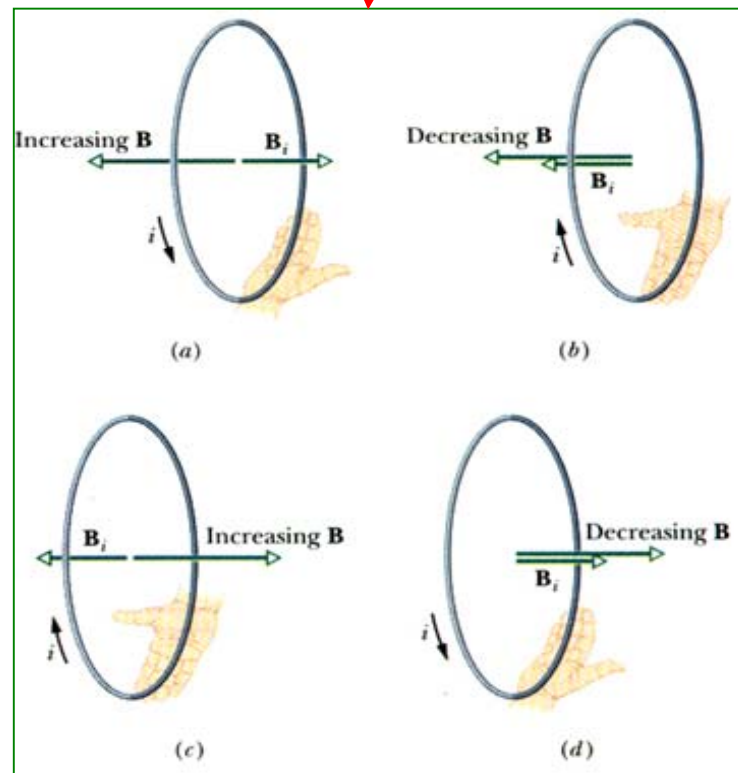
A Lei de Lenz

Uma corrente induzida possui o sentido tal que o campo magnético devido a ela se opõe à variação do fluxo magnético que a produziu.

Oposição do movimento do ímã



Oposição à variação do fluxo



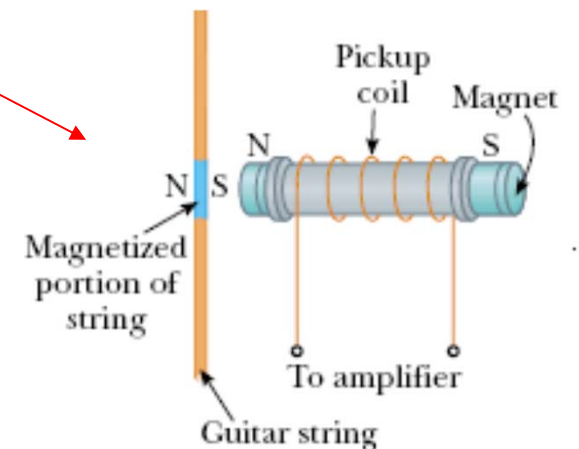
Guitarras elétricas

Fender stratocaster – possuem três grupos de seis pickups.

(pickups são dispositivos que convertem oscilações elétricas em oscilações acústicas)

Vista lateral de um pickup elétrico de uma guitarra

Quando a corda oscila, o pequeno imã nela criado pelo magneto do pickup provoca uma variação do fluxo do campo magnético na bobina.

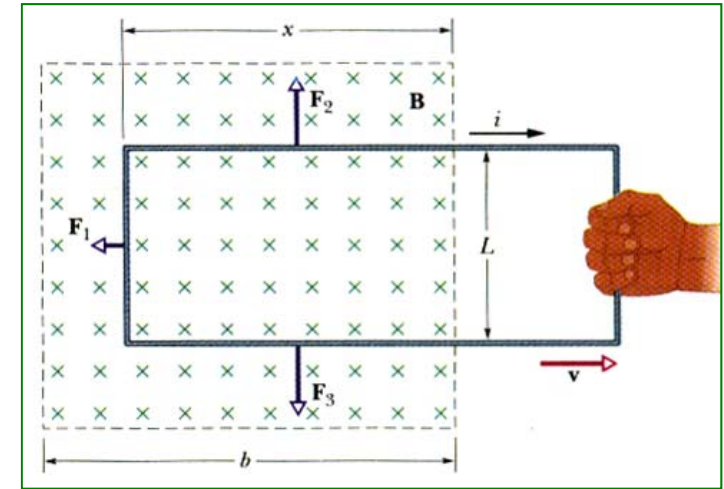


Indução e transferência de energia

Espira sendo deslocada para direita com velocidade $\vec{v}$. O trabalho realizado pelo agente externo por unidade de tempo (potência aplicada) é:

$$P = \vec{F} \cdot \vec{v} = F v$$

Como o fluxo está diminuindo, aparece uma *fem* e portanto uma corrente induzida na espira.



$$\phi_B = BLx \Rightarrow \varepsilon = -\frac{d\phi_B}{dt} = BL\left(-\frac{dx}{dt}\right) = BLv$$

$$i = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{BLv}{R}$$

Forças sobre a espira: $\vec{F}_{ex} = \vec{F}$; $\vec{F}_1$, $\vec{F}_2$ e $\vec{F}_3$ $\vec{F}_2 = -\vec{F}_3$ $\vec{F}_1 = i\vec{L} \times \vec{B}$

$$v = \text{constante} \Rightarrow \vec{F} + \vec{F}_1 = \vec{0} \text{ ou } F = iLB \sin 90^\circ = \frac{B^2 L^2 v}{R} \Rightarrow P = \frac{B^2 L^2 v^2}{R}$$

Taxa de aparecimento de energia térmica na espira (Efeito Joule):

$$P = Ri^2 = \left(\frac{BLv}{R}\right)^2 R = \frac{B^2 L^2 v^2}{R}$$

(igual à potência aplicada,
conservação de energia)

Exemplos

Ex. 1) Exemplo 2, pg. 226, Halliday, Física 3, 4ª edição.

Ex. 2) Exemplo 3, pg. 227, Halliday, Física 3, 4ª edição.

Campos elétricos induzidos

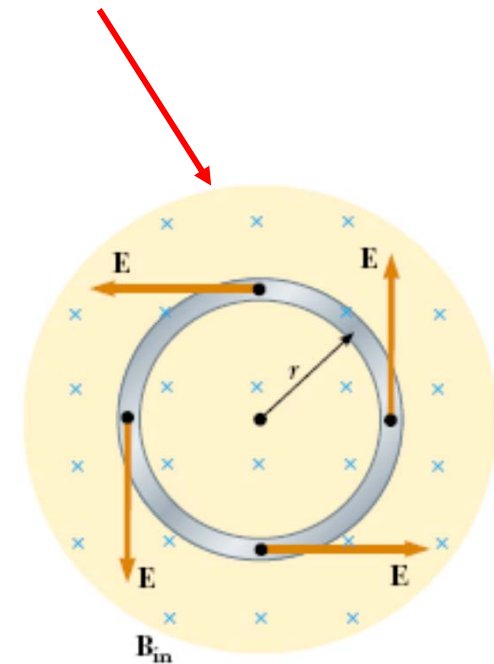
Seja um anel de cobre de raio r numa região onde há um campo magnético variável no tempo (com módulo crescendo à taxa $\frac{dB}{dt}$).

A variação de B faz aparecer uma **corrente** no anel. Portanto, um **campo elétrico induzido** passa a existir no anel.

$$\frac{\partial B}{\partial t} \Rightarrow E$$

Pode-se então dizer que: *um campo magnético variável produz um campo elétrico (Lei de Faraday reformulada).*

As linhas do campo elétrico induzido são tangentes ao anel, formando um conjunto de circunferências concêntricas.



Campos elétricos induzidos

Trabalho sobre uma partícula com carga q_0 , movendo-se ao redor de uma circunferência de raio r :

$$\Delta W = \oint \vec{F} \cdot d\vec{l} = q_0 \oint \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (\text{ou: } \Delta W = q_0 E \cdot 2\pi r)$$

Mas, também:

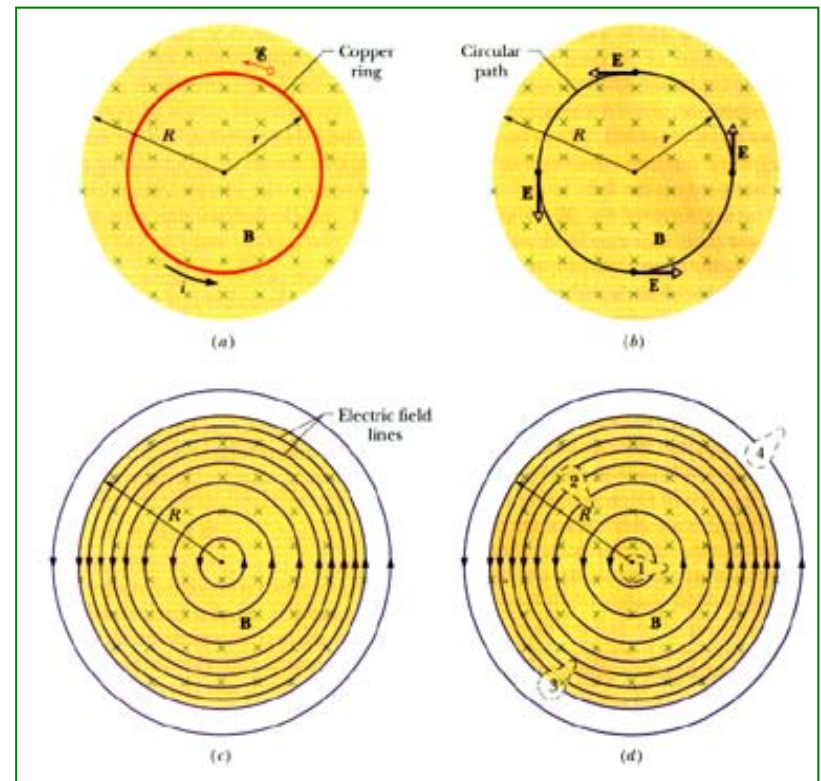
$$\Delta W = q_0 \varepsilon \quad (\varepsilon = \text{fem induzida})$$

$$\text{Então: } \varepsilon = \oint \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

Ou:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\phi_B}{dt} \quad (\text{Lei de Faraday})$$

➡ *Note que o campo induzido não pode ser relacionado com um potencial elétrico!*



Exemplo 2

Para a figura do slide da página anterior adotar $dB/dt = 0,13 \text{ T/s}$ e $R = 8,5 \text{ cm}$.
Determinar as expressões da intensidade do campo elétrico induzidos para $r < R$
e $r > R$. Obtenha os valores numéricos para $r = 5,2 \text{ cm}$ e $r = 12,5 \text{ cm}$.

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = \oint E dl = E \oint dl = E(2\pi r)$$

a) $r < R$: $\Rightarrow \phi_B = BA = B(\pi r^2)$

$$E(2\pi r) = (\pi r^2) \frac{dB}{dt} \Rightarrow E = \frac{r}{2} \frac{dB}{dt}$$

Para $r = 5,2 \text{ cm}$

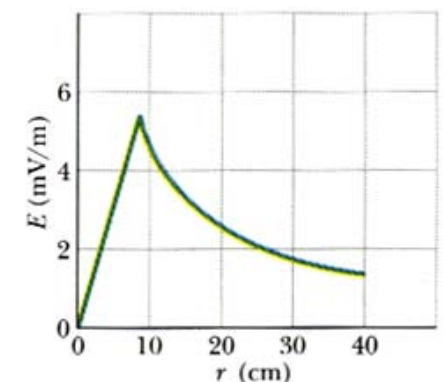
$$E = \frac{5,2 \times 10^{-2} \text{ m}}{2} (0,13 \text{ T/s}) = 3,4 \text{ mV/m}$$

b) $r > R$: $\Rightarrow \phi_B = BA = B(\pi R^2)$

$$E = \frac{R^2}{2r} \frac{dB}{dt}$$

$$E = \frac{(8,5 \times 10^{-2} \text{ m})^2}{2 \times 12,5 \times 10^{-2} \text{ m}} (0,13 \text{ T/s}) = 3,8 \text{ mV/m}$$

Gráfico de E(r)



Exemplos

Ex. 1) Ex. 9, pg. 238, Halliday, Física 3, 4ª edição.

Ex. 2) Ex. 23, pg. 241, Halliday, Física 3, 4ª edição.

Ex. 3) Ex. 25, pg. 242, Halliday, Física 3, 4ª edição.

Ex. 4) Ex. 32, pg. 243, Halliday, Física 3, 4ª edição.