Eletricidade e Magnetismo II – Licenciatura: *15ª Aula* (01/10/2012)

Prof. Alvaro Vannucci

- Discutiremos agora as "*Correntes de Foucault*"

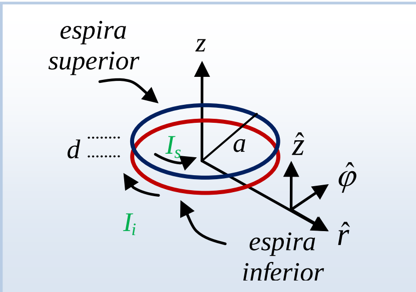
- São correntes induzidas em corpos metálicos sob variações, no tempo, do fluxo do campo magnético.

- Em um trem moderno, a frenagem é suave pois as correntes de Foucault diminuem naturalmente conforme a velocidade do trem diminui.

- Efeitos indesejáveis (nos tokamaks, por exemplo): as correntes geradas tendem a dissipar parte da energia por efeito Joule.

- Por esta razão é que os núcleos de motores e transformadores utilizam lâminas de ferro superpostas ao invés de ferro maciço: a ideia é dificultar a formação das correntes de Foucault.

- **Exemplo**: Considere duas espiras concêntricas e superpostas com raios a = 10 cm e separadas de d = 1mm. Supor que $I_s = I_i$ = 140 A em sentidos opostos. Usando a "aproximação cilíndrica" ($a \gg d$), estime a força e a aceleração sentida pela espira de cima, considerando a sua massa m = 0,02 kg.



- Sendo $a \gg d$, podemos estimar a força entre as espiras considerando que cada trecho dl_s da espira superior, percorrida pela corrente I_1, está sob a ação de um campo magnético produzido pela espira inferior:

- Se $a >> d$, então $B_{si} \sim \dfrac{\mu_0 I_i}{2\pi d}\hat{r}$, de forma que $dF_s = I_s d\vec{l}_s \times \vec{B}_{si} = I_s dl_s B_{si}\underbrace{\left(-\hat{\varphi}\times\hat{r}\right)}_{=\hat{z}}$

- Então $F_s = I_s \dfrac{\mu_0 I_i}{\cancel{2\pi}} \underbrace{\int dl_s}_{\cancel{2\pi} a} = \dfrac{\left(4\pi\times10^{-7}\right)\left(140\right)^2\left(0,1\right)}{10^{-3}} = 2,5N$ (direção e sentido de $\hat{z}$)

- Mas $\vec{F}_R = \left(F_s - P\right)\hat{z} \Rightarrow F_R = 2,5 - mg = 2,5 - \left(0,02\right)\left(9,8\right) = 2,25N = ma$

$$\therefore \boxed{a = 107\,m/s^2}$$

➢ **Indutância**.

➢ Vimos que espira rígida e estacionária atravessada por um campo externo B_{ext} que varia com o tempo, induz nos terminais da espira uma *f.e.m.* (d.d.p.): $\mathcal{E} = -N\dfrac{d\phi_M}{dt}$ (Lei de Faraday).

➢ Na situação em que $B_{ext} = 0$, mas com corrente circulando na espira, há um fluxo de $\vec{B}$ através dela produzida por esta corrente.

➢ Na situação que esta corrente varia com o tempo → o fluxo de $\vec{B}$ através da espira varia e, portanto, surge um contra-fluxo de acordo com a Lei de Lenz.

➢ De forma que se pode escrever $\mathcal{E} = -\dfrac{d\phi_M}{dt} = -\underbrace{\dfrac{d\phi_M}{dI}}_{\equiv L}\dfrac{dI}{dt}$ → denominada por "auto-indutância", "indutância própria" ou simplesmente" indutância".

Símbolo: ( )

➢ No caso de uma bobina com N espiras:

$$L = N\frac{d\phi}{dI}; \qquad \text{unidade: } \frac{Weber}{Ampère} \equiv Henry \quad (\text{símbolo: } H).$$

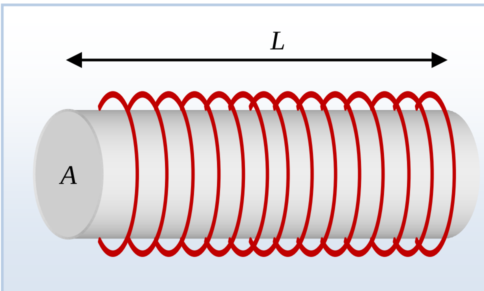
➢ Fisicamente, a indutância de um circuito pode ser entendida como representando uma espécie de "*inércia*" do sistema face a uma variação de corrente que se tenta circular por ele (sustentada por uma fonte).

➢ Como no caso da capacitância, a indutância de um sistema só depende dos seus parâmetros geométricos (e não da corrente que circula por ele).

➢ **Exemplo**. Um solenóide de "longo" comprimento l = 25 cm e seção e seção reta A=4 cm^2 tem 300 espiras. Por ele circula uma corrente elétrica que diminui à taxa de 20 A/s. Calcule:

a) Auto-indutância

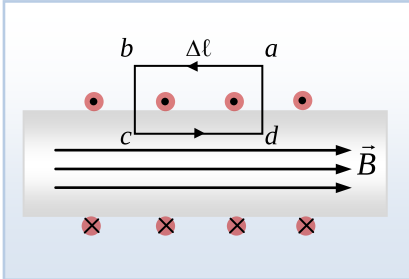
b) f.e.m. induzida.



a) $L = N\dfrac{d\phi}{dI}$; $\phi_{1\,espira} = \int \vec{B}\cdot\hat{n}\,dA$; sendo $\vec{B} = \vec{B}_{solenoide}$

➢ Aplicando a Lei de Ampère para calcular $B_{solenoide}$ (como já fizemos antes):

$$\oint \vec{B}\cdot d\vec{l} = \underbrace{\int_a^b \overbrace{\cancel{\vec{B}\cdot d\vec{l}}}^{=0}}_{\text{não há campo}} + \underbrace{\int_b^c \overbrace{\cancel{\vec{B}\cdot d\vec{l}}}^{=0}}_{\vec{B}\perp d\vec{l}} + \int_c^d \vec{B}\cdot d\vec{l} + \underbrace{\int_d^a \overbrace{\cancel{\vec{B}\cdot d\vec{l}}}^{=0}}_{\vec{B}\perp d\vec{l}}$$



$$\Rightarrow \oint \vec{B}\cdot d\vec{l} = \int_c^d \vec{B}\cdot d\vec{l} = (B)(\Delta\ell) = \mu_0 I_{enl} = (\mu_0)\underbrace{(n\Delta\ell)}_{\substack{\text{nº de espiras}\\ \text{no interior}\\ \text{da circulação}\\ \text{(enlaçadas)}}} I\ ;$$

sendo $n = \dfrac{\text{número total de espiras}}{comprimento\ do\ \text{solenóide}}$: $n = \dfrac{N}{l}$

- Então $B_{\text{solenoide}} = \mu_0 nI$ e $\phi_{1\ \text{esp}} = \dfrac{\mu_0 N}{l}\int I\,dA$, observando que I varia no tempo e não no espaço.

- Assim: $\phi_{1\ \text{esp}} = \dfrac{\mu_0 NIA}{l} \Rightarrow L = N\dfrac{d\phi}{dI} \Rightarrow L = \dfrac{\mu_0 NA}{l} = 180\,\mu H$

note que só depende dos parâmetros geométricos

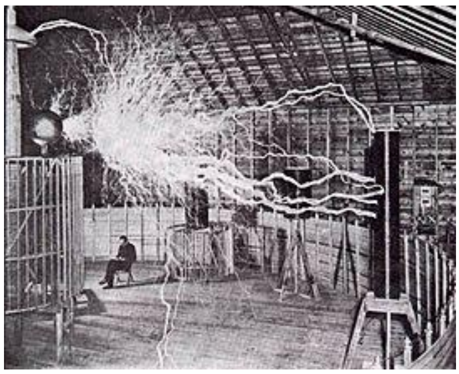
b) $\mathcal{E} = -N\dfrac{d\phi}{dt} = -L\dfrac{\Delta I}{\Delta t} = -\left(180\times10^{-6}\right)(50) \quad\Rightarrow\quad \mathcal{E} = -9\,mV$

só indica contra-fluxo

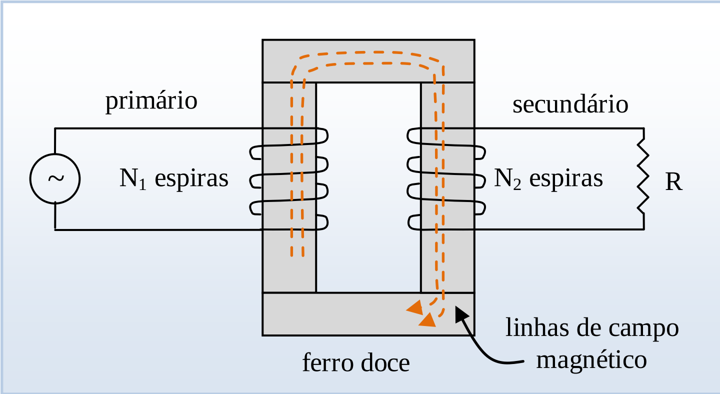
- **Transformador**, utilizado com correntes alternadas – AC – e cujo símbolo eletrônico é:

- São extremamente importantes para serem usados, entre outras coisas, no processo de transporte de energia a longas distâncias.

- A utilização de CA × CC para o uso doméstico e industrial de energia elétrica foi motivo de grande disputa travada por *Thomas Edson* e *Nikola Tesla* no início do século XX.



- Um transformador consiste basicamente de dois enrolamentos (o *primário* e o *secundário*) em torno de um núcleo comum de ferro doce, que direciona e incrementa o fluxo magnético.



- Circuito primário: alimentado por uma fonte CA, cria fluxo ϕ_1 de forma que

$$\mathcal{E}_1^{ef} = -\left(\frac{d\phi_1}{dt}\right)^{ef} = -N_1\left(\frac{d\phi_1^{\text{1esp.}}}{dt}\right)^{ef} \qquad (1)$$

- Em um transformador ideal, as perdas nos enrolamentos e no núcleo são desprezíveis, então este fluxo será o mesmo através do enrolamento da bobina do secundário. Ou seja:

$$\frac{d\phi_2}{dt} = \frac{d\phi_1}{dt}$$

- De forma que: $\mathcal{E}_2^{ef} = -N_2\left(\frac{d\phi_1}{dt}\right)^{ef} \qquad (2)$

- Comparando as equações (1) e (2): $\dfrac{\mathcal{E}_1^{ef}}{\mathcal{E}_2^{ef}} = \dfrac{N_1}{N_2} \quad \Rightarrow \quad \boxed{\mathcal{E}_2^{ef} = \dfrac{N_1}{N_2}\mathcal{E}_1^{ef}}$

- Note que quando:

$$\begin{cases} N_2 > N_1 \Rightarrow \mathcal{E}_2^{ef} > \mathcal{E}_1^{ef} \Rightarrow \underline{\text{transformador levantador}} \text{ de tensão} \\ N_2 < N_1 \Rightarrow \mathcal{E}_2^{ef} < \mathcal{E}_1^{ef} \Rightarrow \underline{\text{transformador abaixador}} \text{ de tensão} \end{cases}$$

- Não havendo perdas de energia no transformador ideal → a potência injetada pela fonte que alimenta o primário e a consumida (na carga do secundário) será a mesma.

- Como a potência $P = \mathcal{E}i \quad \Rightarrow \quad P = \mathcal{E}_1 i_1 = \mathcal{E}_2 i_2 \quad \Rightarrow \quad P = \mathcal{E}_1 i_1 = Ri^2$.