Eletromagnetismo

4300372

F.S. Navarra

navarra@if.usp.br

Guilherme Germano (monitor)

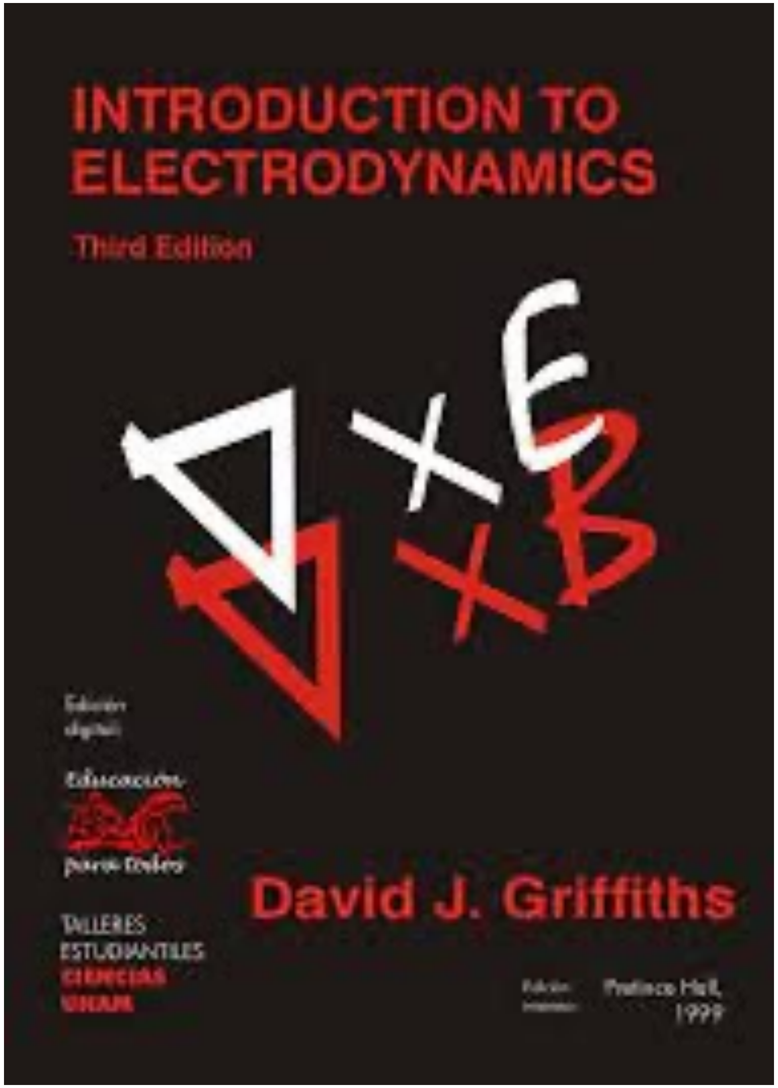
guilherme.germano@usp.br

edisciplinas.if.usp.br

Plano do Curso

16/08	13/09	11/10	08/11
19/08	16/09	14/10	11/11
23/08	20/09 P1	18/10	15/11
26/08	23/09	21/10 P2	18/11
30/08	27/09	25/10	22/11
02/09	30/09	28/10	25/11
06/09	04/10	01/11	29/11 P3
09/09	07/10	04/11	02/12 ex
			06/12 Sub

Bibliografia



Capítulo 2 : eletrostática

Capítulo 5 : magnetostática

Capítulo 7 : eletrodinâmica

Capítulo 8 : leis de conservação

Capítulo 9 : ondas eletromagnéticas

Capítulo 10 : campos e potenciais

Capítulo 11 : radiação

Aula 12

Eletrodinâmica

Campos elétricos e magnéticos variando no tempo

Lei de Faraday

$$\boxed{\epsilon = -\frac{d\Phi}{dt}}$$

$$\epsilon = \oint_C \vec{E} \, . \, d\vec{l}$$

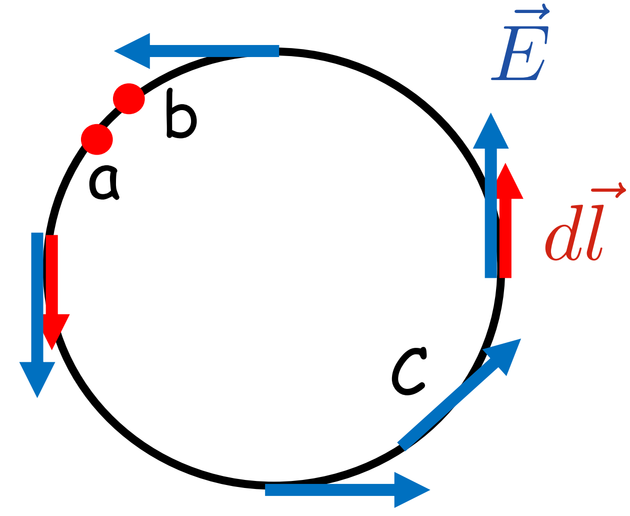
$$\phi = \int_S \vec{B} \, . \, d\vec{a}$$

$$\boxed{\oint_C \vec{E} \, . \, d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \, . \, d\vec{a}}$$

$$\boxed{\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}}$$

Na eletrostática:

$$V(b) - V(a) = -\int_a^b \vec{E}\,.\,d\vec{l}$$



a e b são próximos: $\Delta V \simeq -\oint \vec{E}\,.\,d\vec{l}$

Mas na eletrostática: $\oint_C \vec{E}\,.\,d\vec{l} = 0$

Na eletrodinâmica: $\oint_C \vec{E}\,.\,d\vec{l} \neq 0 \quad \rightarrow \quad \epsilon = \oint_C \vec{E}\,.\,d\vec{l}$

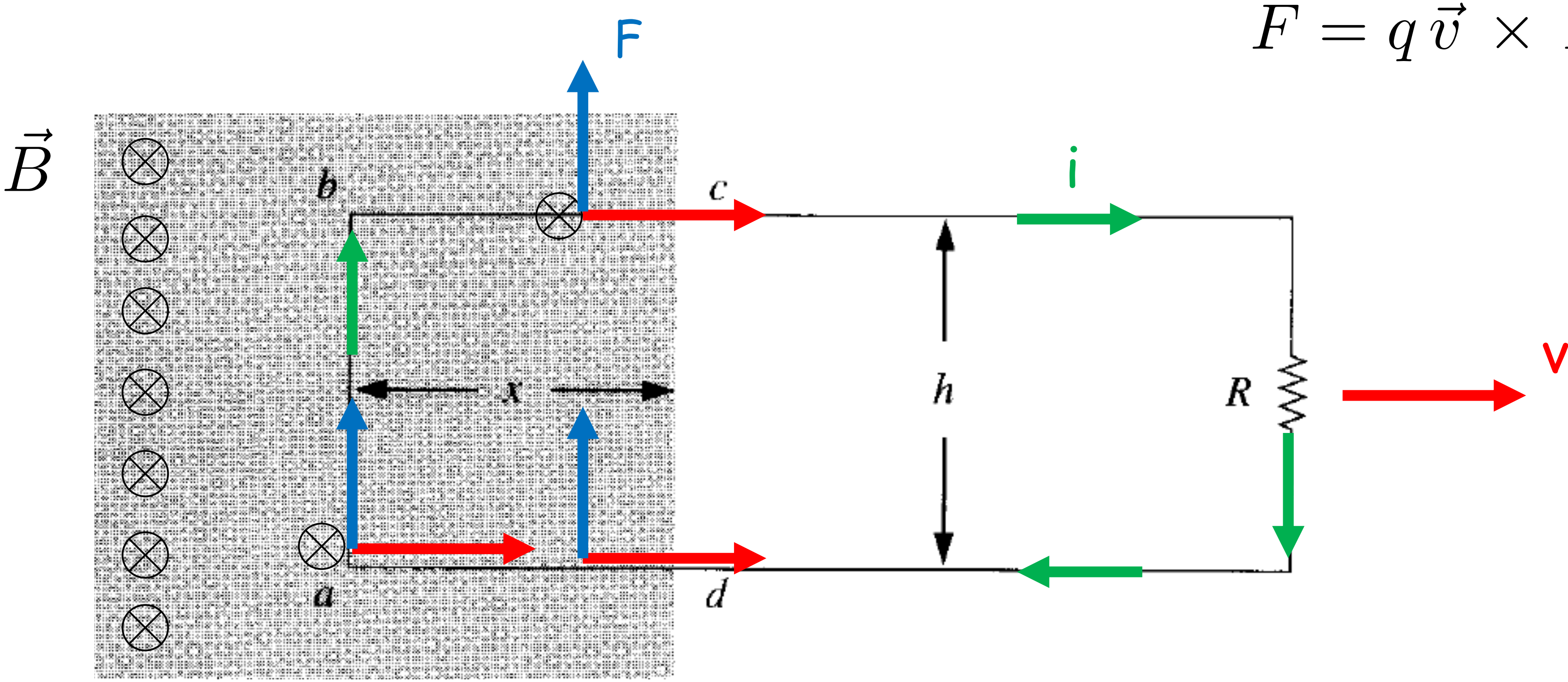
A força eletromotriz é o análogo do potencial eletrostático.

O trabalho da força elétrica por unidade de carga para dar uma volta em C

Para um circuito fechado de resistência R : $\boxed{\epsilon = R\,i}$

Força Eletromotriz de Movimento ("motional emf")

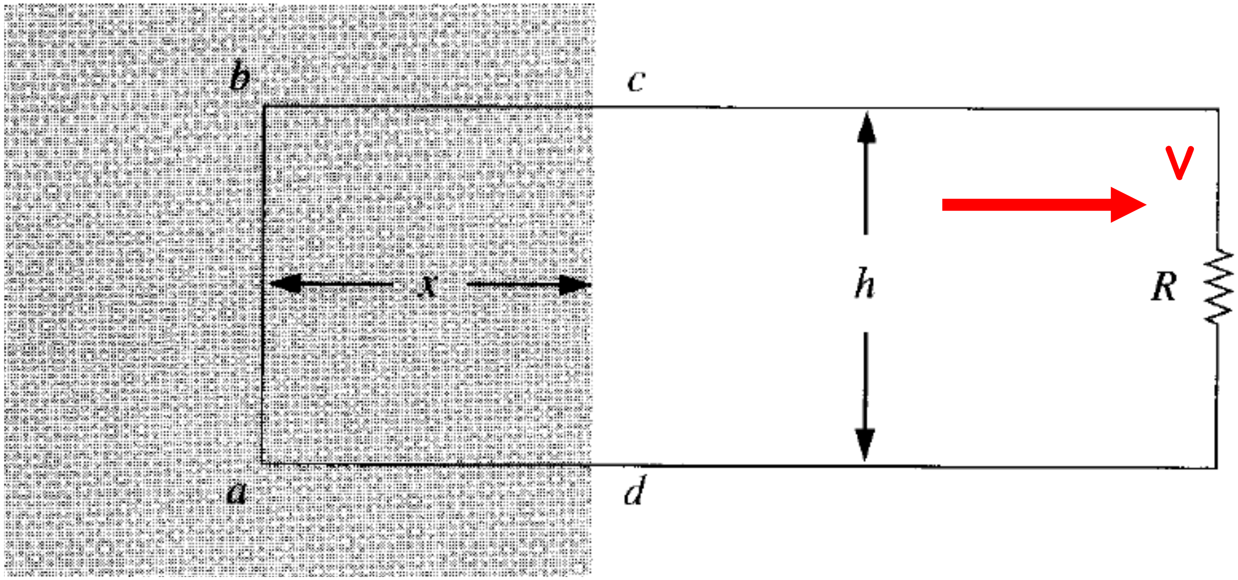
$$\vec{F} = q\,\vec{v} \times \vec{B}$$



Trabalho da força magnética na carga q :
$$W = \int_0^h \vec{F}\,.\,d\vec{l} = q\,v\,B\,h$$

FEM : $\epsilon = \dfrac{W}{q} = v\,B\,h \qquad \epsilon = R\,i$

Também podemos calcular a FEM pela variação do fluxo:



$$\Phi = B\,h\,x$$

$$\frac{d\Phi}{dt} = B\,h\,\frac{dx}{dt}$$

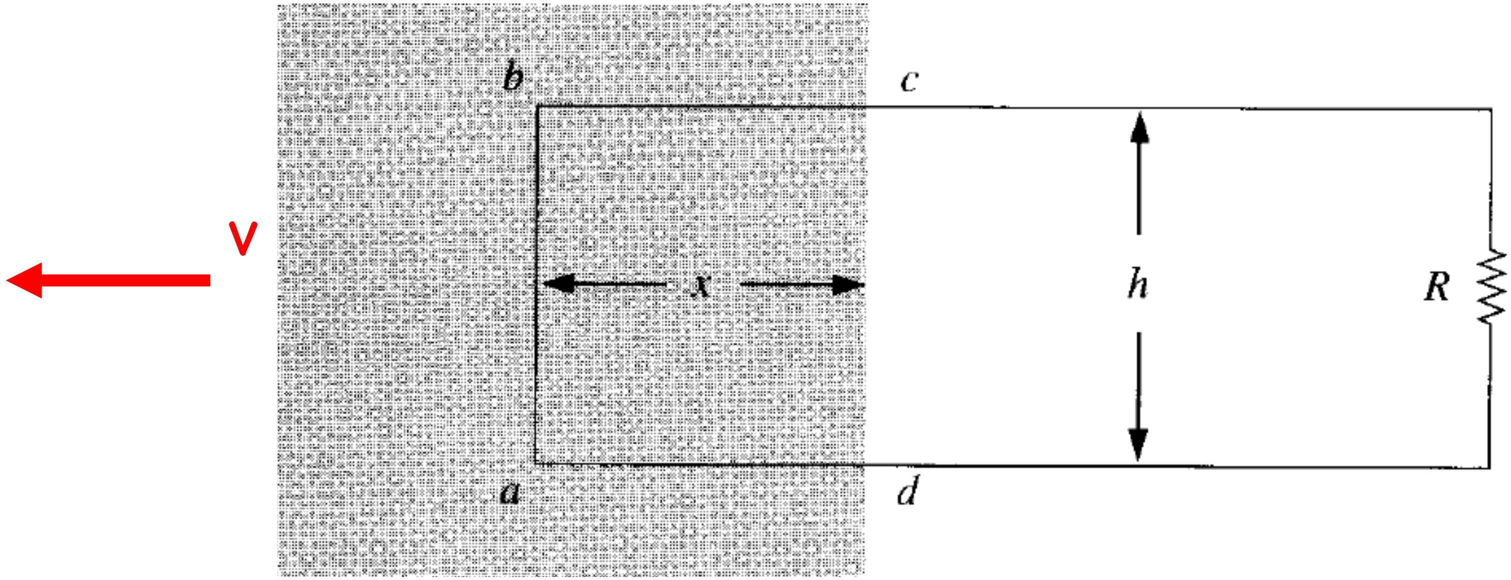
$$\frac{d\Phi}{dt} = -B\,h\,v$$

$$\epsilon = -\frac{d\Phi}{dt}$$

$$\epsilon = B\,h\,v$$

Roy Lichtenstein

Agora com o circuito parado e o campo "se deslocando":



$$\Phi = B\,h\,x$$

$$\frac{d\Phi}{dt} = B\,h\,\frac{dx}{dt}$$

$$\epsilon = -\frac{d\Phi}{dt}$$

$$\frac{d\Phi}{dt} = -B\,h\,v$$

$$\epsilon = B\,h\,v$$

$$\boxed{\boxed{\epsilon = -\frac{d\Phi}{dt}}} \longrightarrow \epsilon = -\frac{d}{dt}\int_S \vec{B}\,.\,d\vec{a}$$

Esta fórmula resolve tudo !

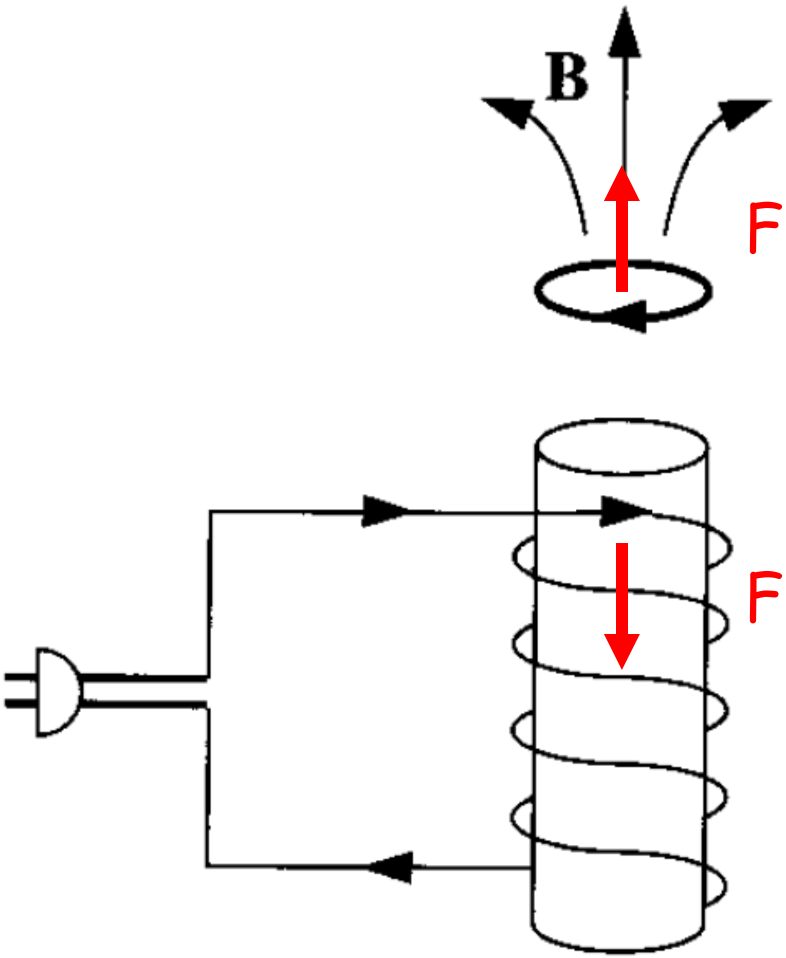
Mas a física envolvida é diferente !

1) Se o campo magnético variar no tempo surge o campo elétrico induzido:

$$\epsilon = \oint_C \vec{E}\,.\,d\vec{l} = \int_A (\vec{\nabla} \times \vec{E})\,.\,d\vec{a} \longrightarrow \vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

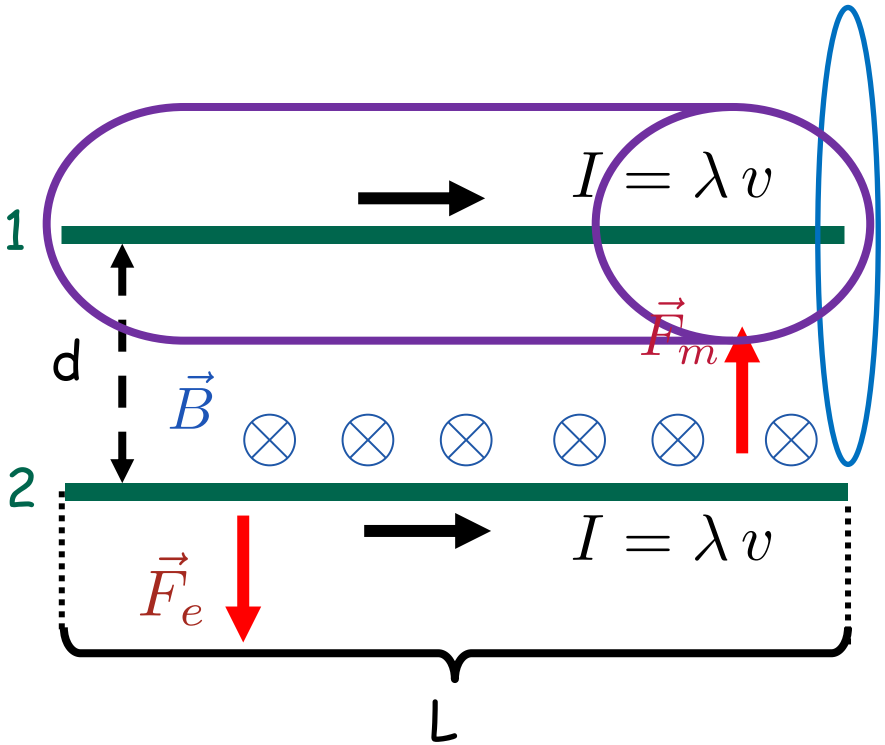
2) Se o campo magnético for constante e o circuito se mover não há campo elétrico induzido (E=0) , a FEM existe e tem outra origem.

Exemplo 7.6



Exercício

Dois fios infinitos, separados por uma distância d, com densidade de carga λ, se movem a uma velocidade constante v (figura a esquerda). Qual seria o valor de v para que a atração magnética entre os fios compensasse a repulsão elétrica entre eles ?



$$2\pi r B = \mu_0 I$$

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \qquad \boxed{B = \frac{\mu_0 I}{2\pi d}}$$

$$\vec{F} = I \int \vec{dl} \times \vec{B}$$

$$F = I L B$$

$$F_m = \frac{\mu_0 I^2 L}{2\pi d} \boxed{= \frac{\mu_0 \lambda^2 v^2 L}{2\pi d}}$$

$$E\, 2\pi r L = \frac{\lambda L}{\epsilon_0} \qquad \boxed{E = \frac{\lambda}{2\pi d \epsilon_0}}$$

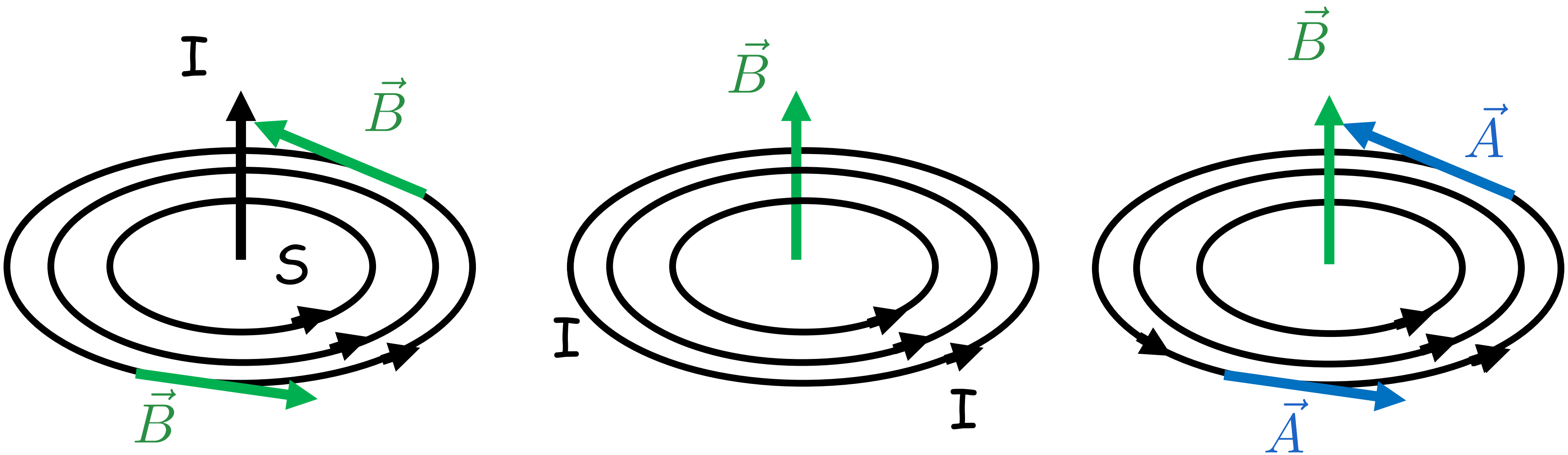
$$F = q E \qquad \boxed{F_e = \frac{\lambda^2 L}{2\pi d \epsilon_0}}$$

$$F_e = F_m \qquad \boxed{v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}}$$

Potencial Vetor

Antes introduzimos o potencial eletrostático : $\vec{E} = -\vec{\nabla} V$

Antes introduzimos o potencial vetor: $\vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A}$

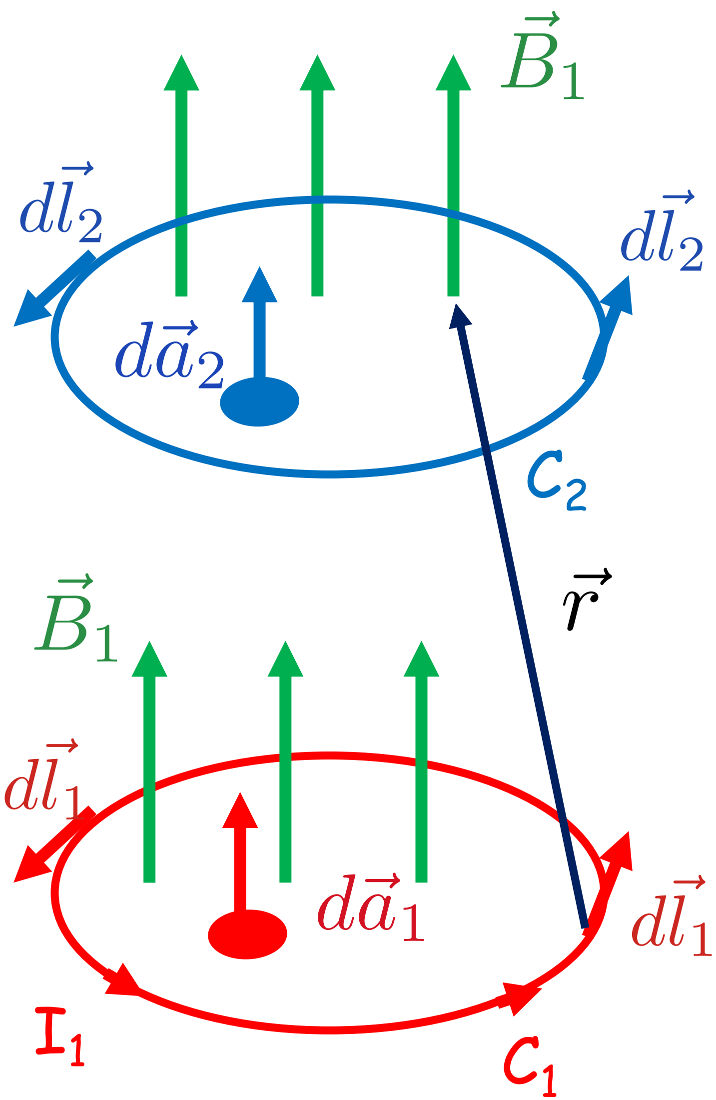


$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \, \frac{\vec{I}}{S}$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{A} = \vec{B}$$

A é "paralelo" à corrente e pode ser obtido a partir dela !

Indutância



$$\vec{B}_1 = \frac{\mu_0}{4\,\pi}\, I_1 \oint_{C_1} \frac{d\vec{l}_1 \times \hat{r}}{r^2}$$

$$\phi_2 = \int_{S_2} \vec{B}_1 \,.\, d\vec{a}_2$$

$$\phi_2 = I_1 \left[\frac{\mu_0}{4\,\pi} \int [\oint_{C_1} \frac{d\vec{l}_1 \times \hat{r}}{r^2}] \,.\, d\vec{a}_2 \right]$$

$$\phi_2 = I_1\, M_{21}$$

M_{21} = Indutância mútua

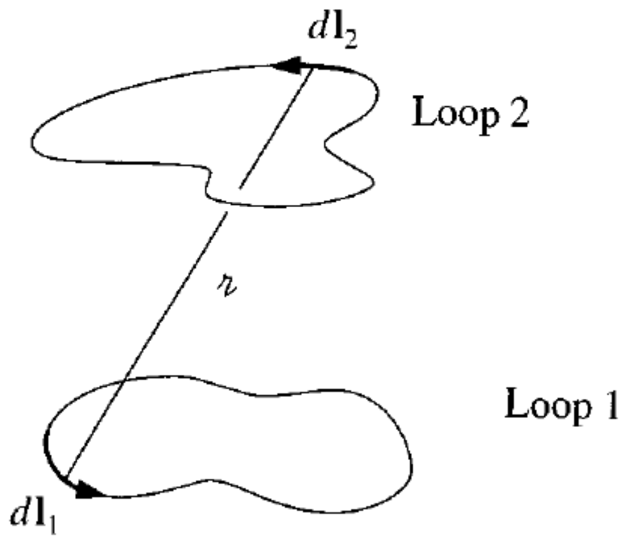
$$\phi_2 = I_1\, M_{21}$$

$$\phi_2 = \int_{S_2} \vec{B}_1 \,.\, d\vec{a}_2 \;\; = \int_{S_2} (\vec{\nabla} \times \vec{A}_1) \,.\, d\vec{a}_2$$

Teorema de Stokes : $\quad \phi_2 = \oint_{C_2} \vec{A}_1 \,.\, d\vec{l}_2$

$$\vec{A}_1 = \frac{\mu_0}{4\,\pi}\, I_1 \oint_{C_1} \frac{d\vec{l}_1}{r^2}$$

$$\phi_2 = I_1 \left[\frac{\mu_0}{4\,\pi} \oint_{C_2} \oint_{C_1} \frac{d\vec{l}_1 \,.\, d\vec{l}_2}{r} \right]$$



$$\boxed{M_{21} = \left[\frac{\mu_0}{4\,\pi} \oint_{C_2} \oint_{C_1} \frac{d\vec{l}_1 \,.\, d\vec{l}_2}{r} \right]}$$

$$M_{21} = M_{12} = M$$

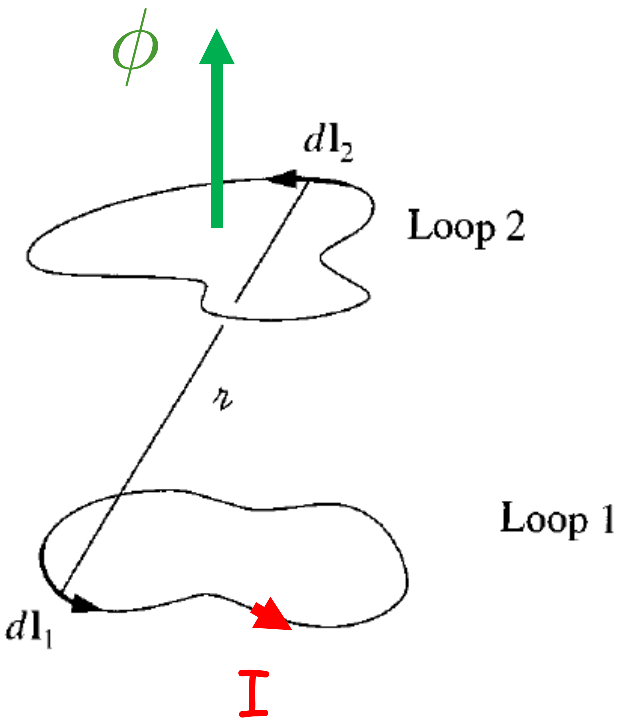
Fórmula de Neumann

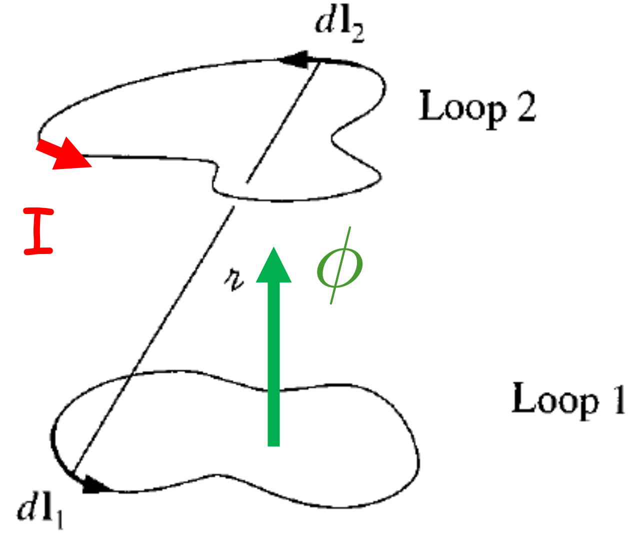
Fórmula de Neumann

$$\phi_2 = I_1 \, M_{21}$$

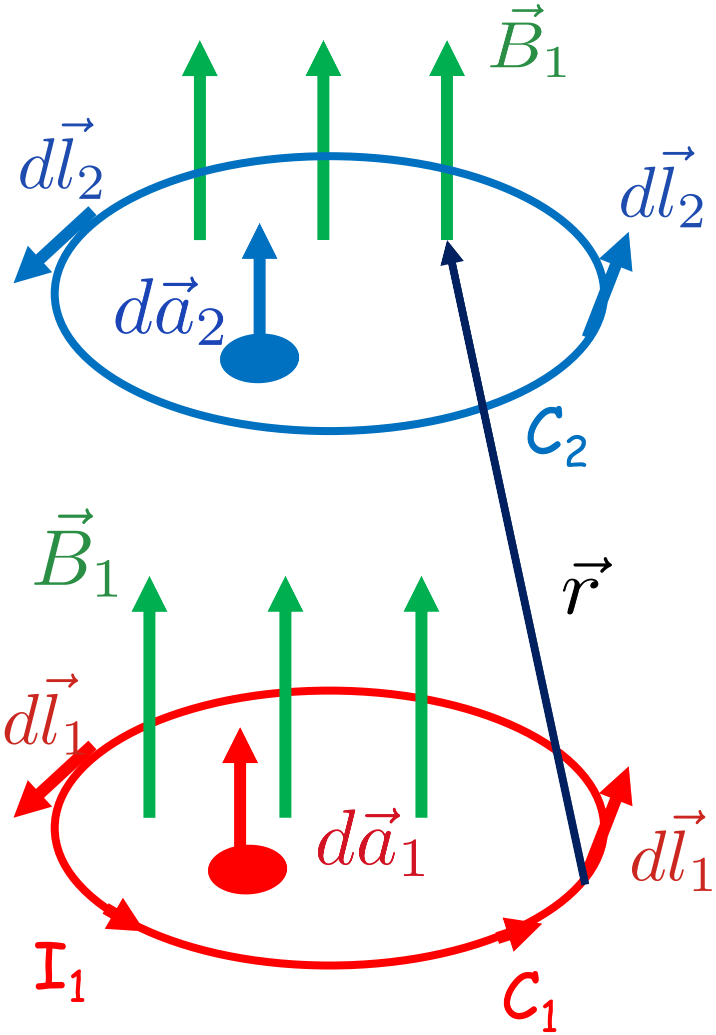
$$\boxed{M_{21} = \left[\frac{\mu_0}{4\,\pi} \oint_{C_2} \oint_{C_1} \frac{d\vec{l_1} \, . \, d\vec{l_2}}{r} \right]}$$

$$M_{21} = M_{12} = M$$





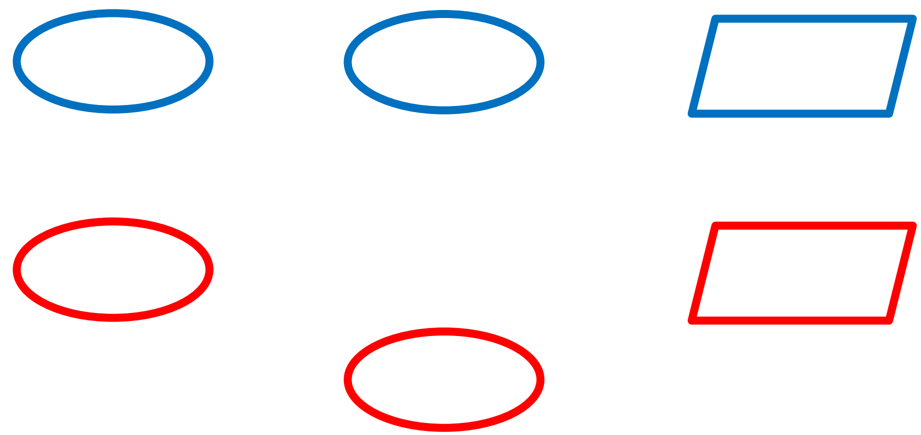
Mesma corrente gera o mesmo fluxo, mesmo trocando as espiras !



Quando ligamos a corrente em C_1 surge o campo magnético B_1 na espira 2, que gera o fluxo

$$\phi_2 = I_1\, M_{21} \qquad \phi_2 = M\, I_1$$

O coeficiente M_{21} é a Indutância Mútua
Depende só da geometria das espiras :



Variando a corrente I_1 aparece uma FEM em S_2 : $\epsilon_2 = -\dfrac{d\phi_2}{dt}$

$$\frac{d\phi_2}{dt} = M\,\frac{dI_1}{dt} \longrightarrow \epsilon_2 = -M\,\frac{dI_1}{dt}$$

Fim