

cap. 34 - Indução eletromagnética

Prof. Carlos Eduardo Souza - Cadu

**Sala: A2-15 (IF, andar 1P)
Email: carlooseduardosouza@id.uff.br**

Indução eletromagnética

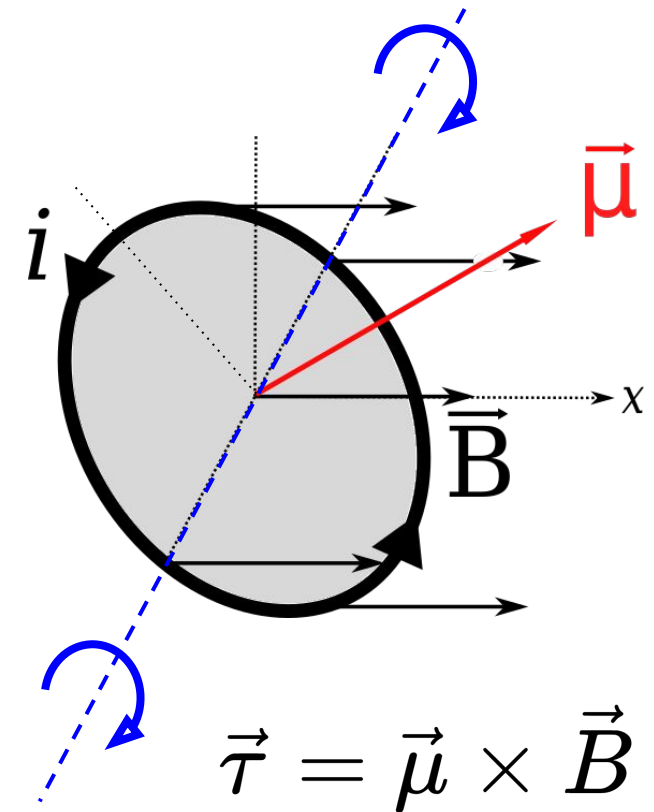
Objetivos:

- . Calcular corrente elétrica induzida
- . Calcular o fluxo magnético
- . Empregar a Lei de Lenz e a Lei de Faraday para determinar o sentido e a intensidade de correntes induzidas

Indução eletromagnética

Uma espira de corrente sofre um torque e entra em movimento quando está imersa em um campo magnético.

Espira de corrente + campo $\rightarrow$ torque



Ex.: um dispositivo que converte energia elétrica em energia mecânica...

Indução eletromagnética

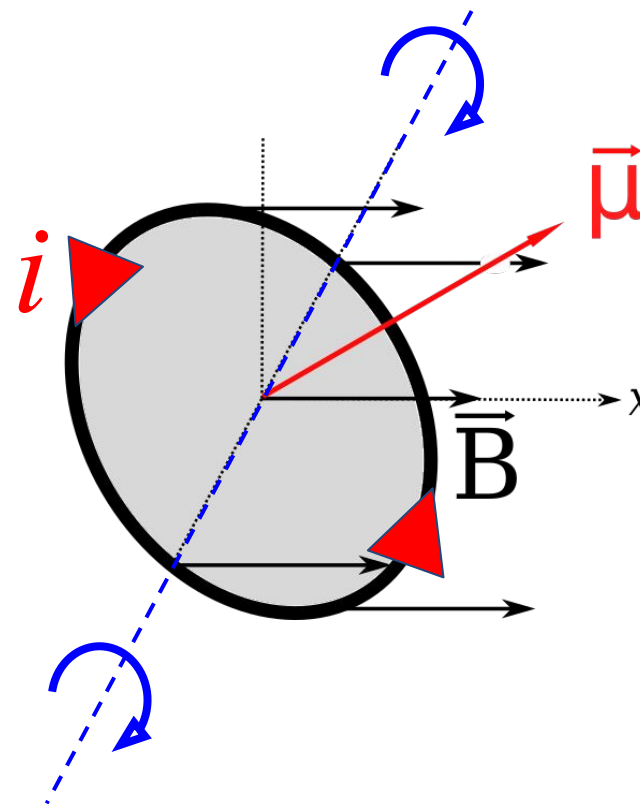
Uma espira de corrente sofre um torque e entra em movimento quando está imersa em um campo magnético.

Espira de corrente + campo $\rightarrow$ torque

Será que...

Uma espira sem corrente ao girar em uma região de campo magnético faz aparecer uma corrente?

Torque + campo $B \rightarrow$ corrente ???



Indução eletromagnética

Definição

Indução eletromagnética é o processo de geração de corrente elétrica por meio da variação do campo magnético que atravessa um circuito.

A indução eletromagnética estabelece um vínculo entre a eletricidade e o magnetismo.

Esse efeito é fundamental para entendermos como a luz é descrita por uma onda eletromagnética...

Indução eletromagnética

Depois da **descoberta de Oersted**, os cientistas queriam saber se um ímã podia gerar corrente elétrica...

Muitos cientistas trabalharam com esta perspectiva, mas foi **Michael Faraday** quem foi o pioneiro em descobrir o mecanismo de geração de corrente elétrica...

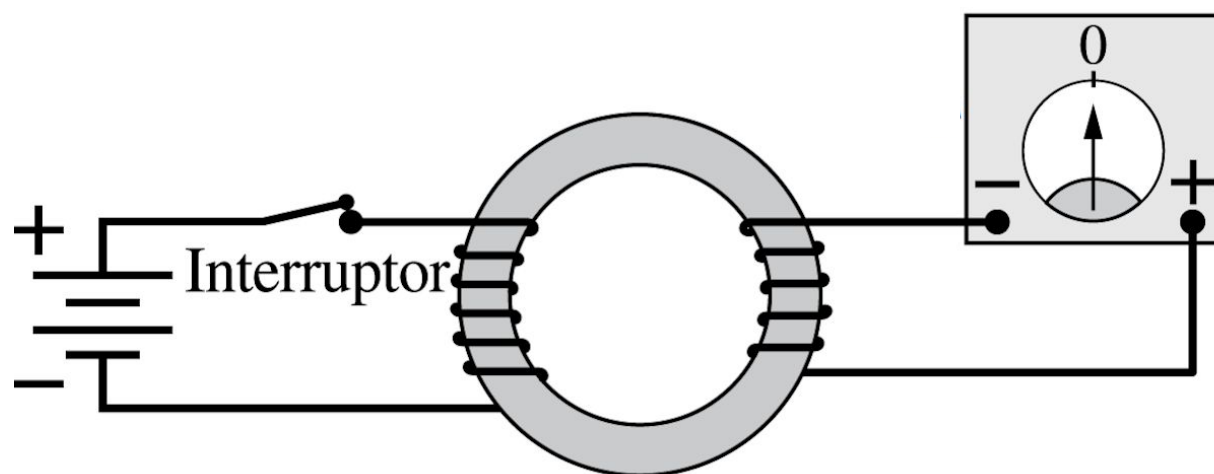
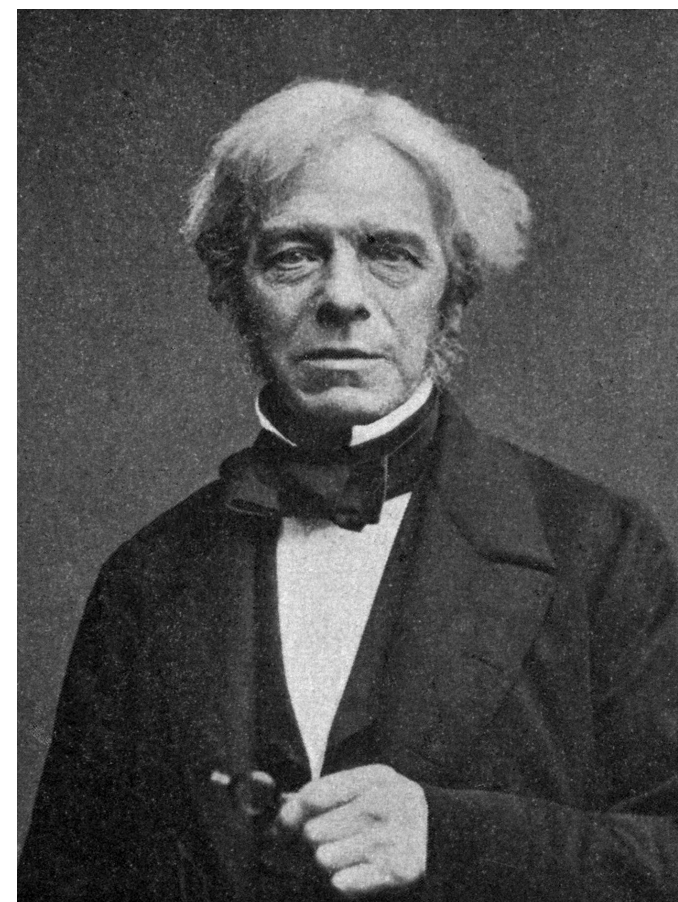
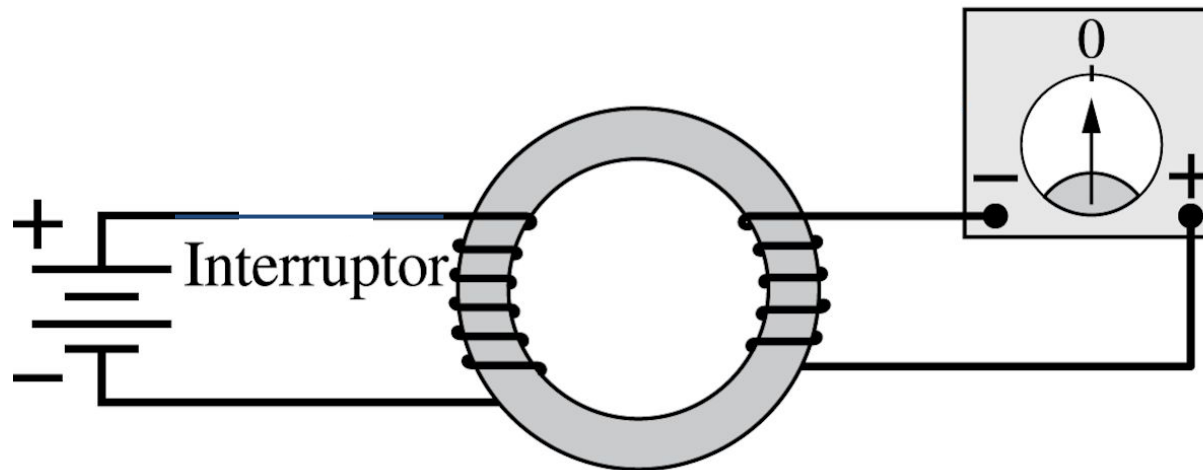


Fig. esquema experimental do aparato de Faraday

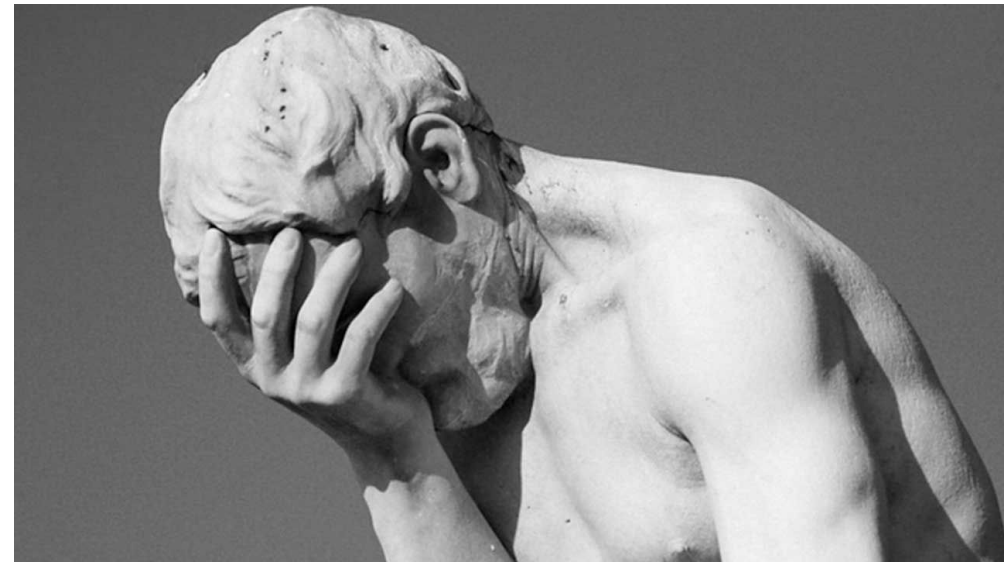


Indução eletromagnética

Vejamos uma versão esquemática do experimento de Faraday.



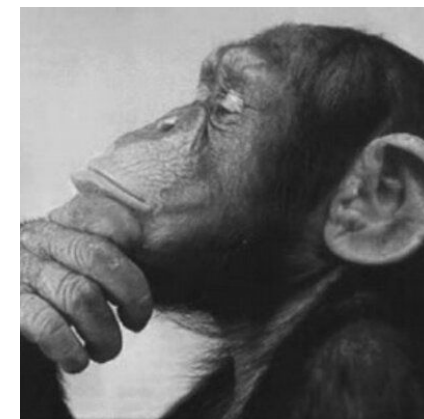
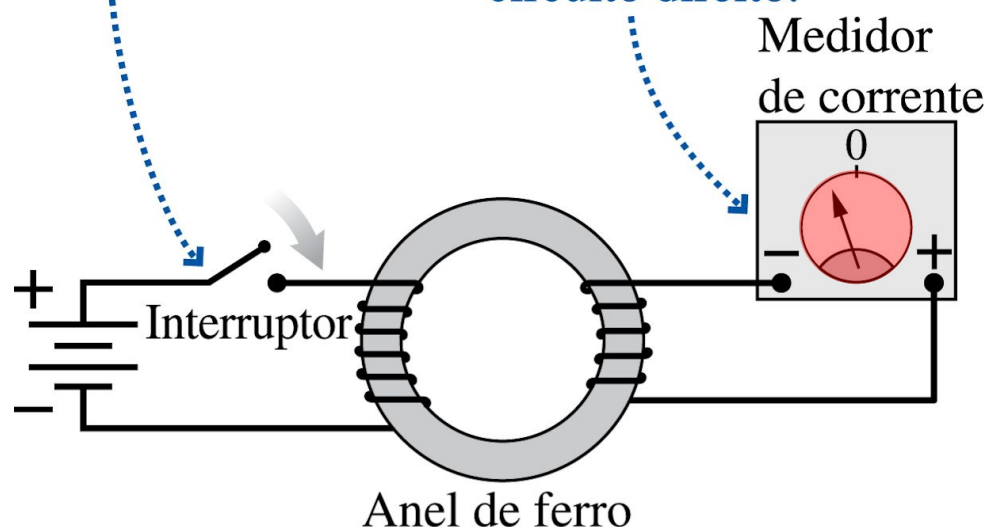
** Não funcionou como ele previu...*



Indução eletromagnética

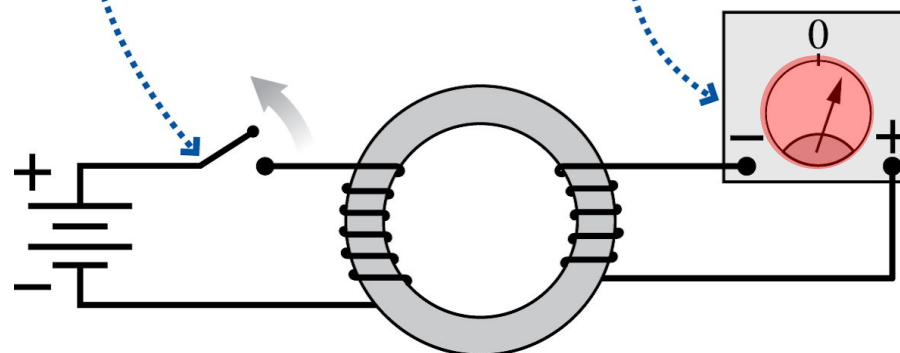
Fechar o interruptor
do circuito esquerdo...

produz uma corrente
momentânea no
circuito direito.

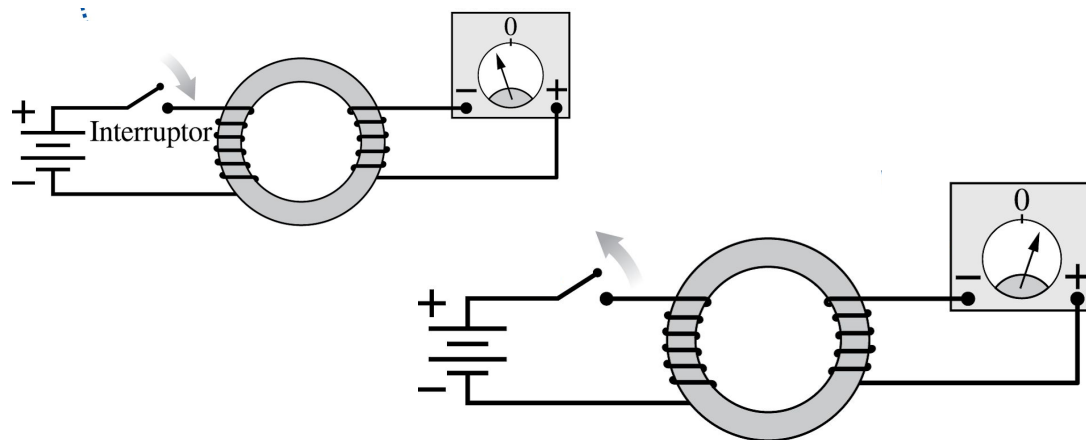


Abrir o interruptor
do circuito esquerdo ...

produz uma corrente
momentânea em sentido
oposto.



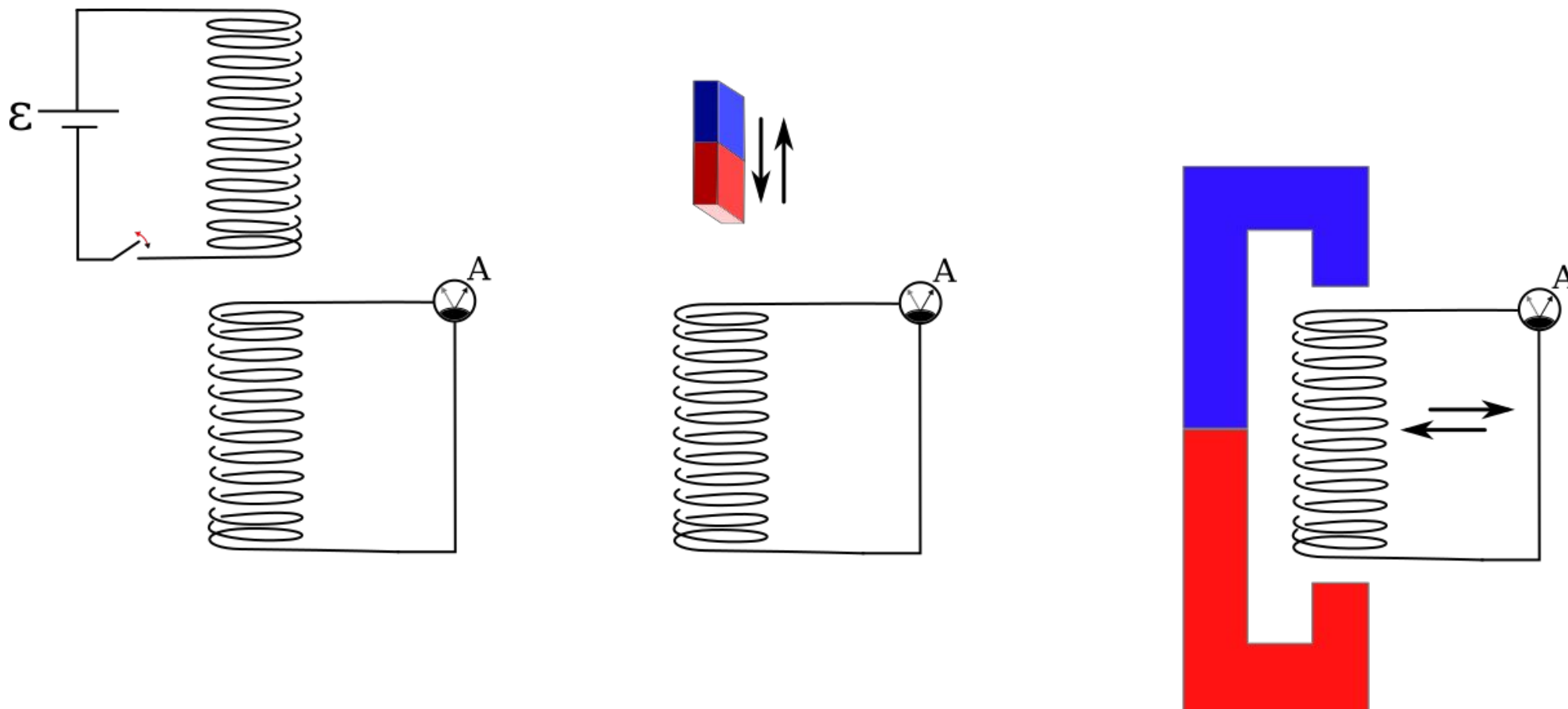
Indução eletromagnética



O pensador - Auguste Rodin

Indução eletromagnética

Faraday investiga a indução eletromagnética...



...Faraday descobriu que existe uma corrente na bobina se, e somente se, o campo magnético que a atravessa estiver variando.

Indução eletromagnética

Existe uma corrente na bobina se, e somente se, o campo magnético que a atravessa estiver variando...

Em resumo, pode-se gerar uma corrente induzida de duas maneiras diferentes:

- *Por meio da variação do tamanho (ou orientação) de um circuito num campo estacionário, ou*
- *Por meio da variação de um $\mathbf{B}$ que atravessa um circuito estacionário.*

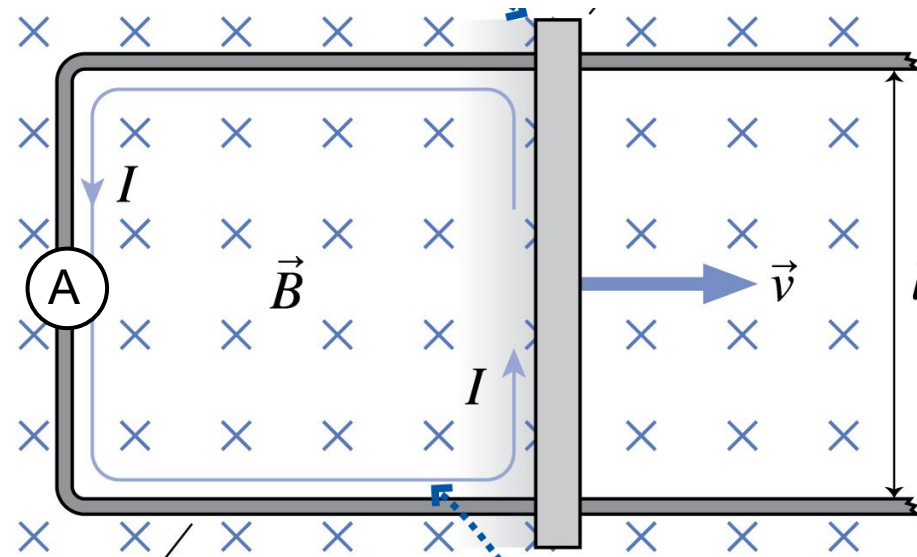
Indução eletromagnética

Existe uma corrente na bobina se, e somente se, o campo magnético que a atravessa estiver variando...

Em resumo, pode-se gerar uma corrente induzida de duas maneiras diferentes:

- *Por meio da variação do tamanho (ou orientação) de um circuito num campo estacionário, ou*
- *Por meio da variação de um $\vec{B}$ que atravessa um circuito estacionário.*

Exemplo:

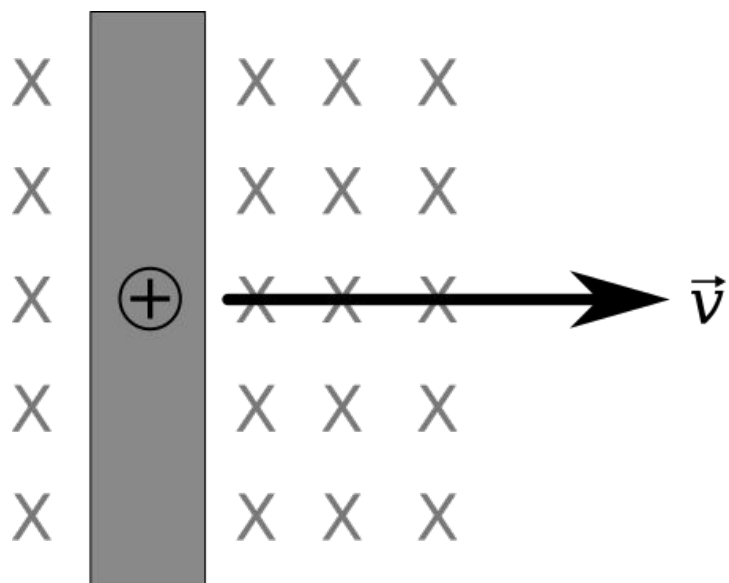


Por que aparece corrente elétrica???

Indução eletromagnética

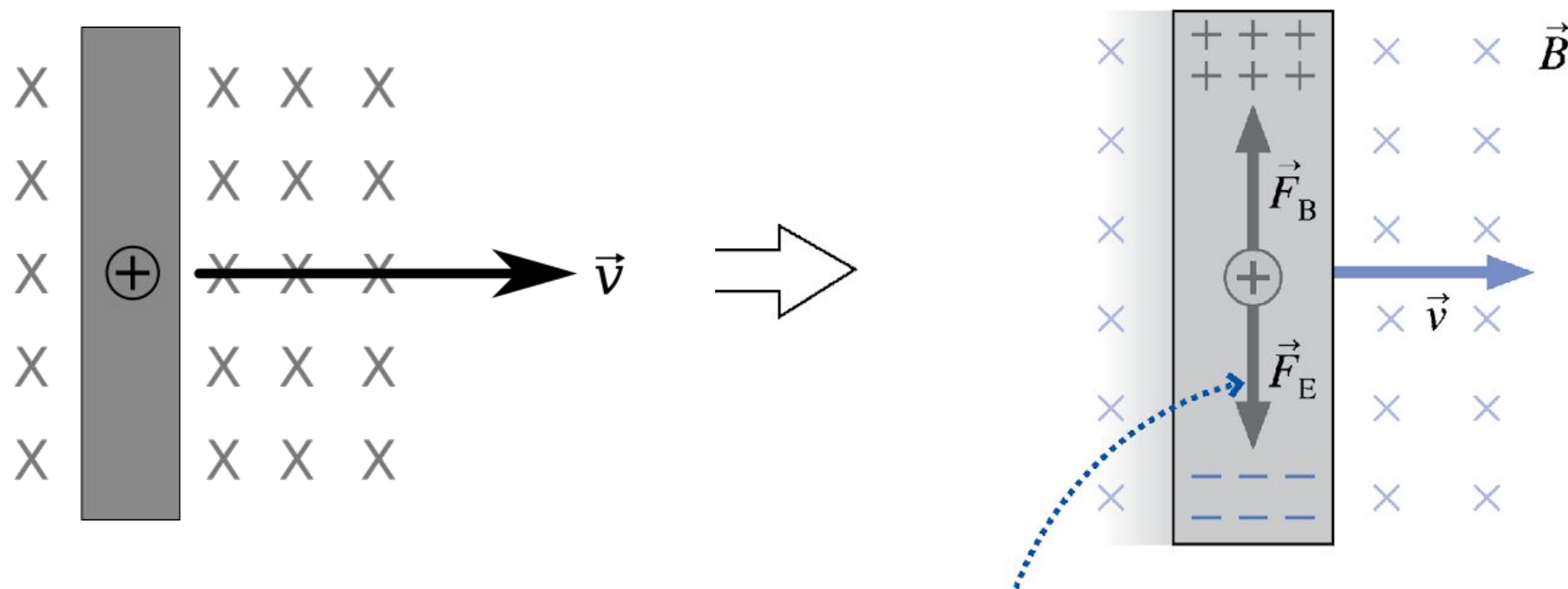
Por que aparece corrente elétrica???

Considerando os portadores sendo cargas (+), o que acontece com eles?



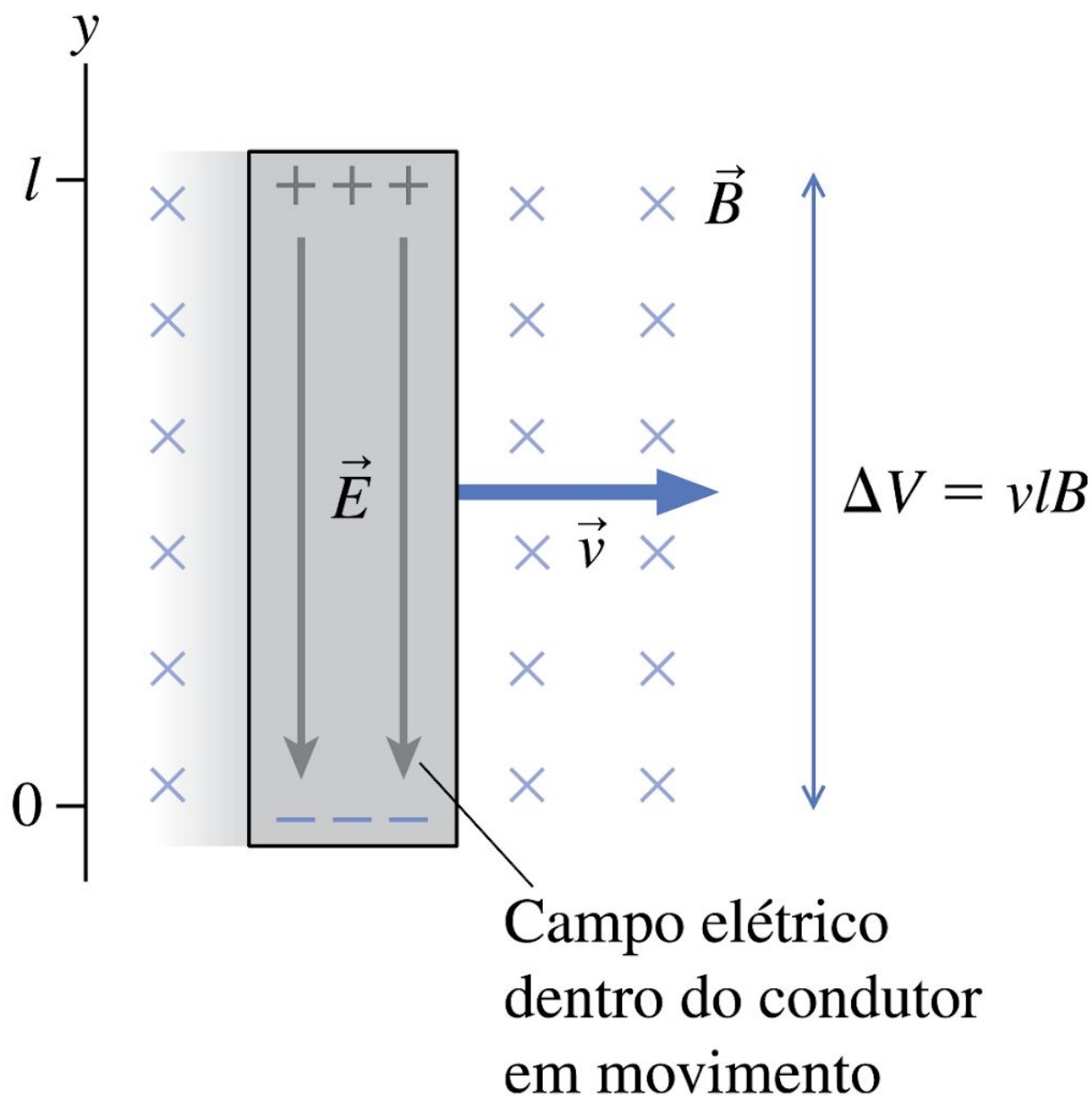
Indução eletromagnética

*Olhando para os **portadores de carga** do condutor em movimento num campo magnético...*



As cargas fluem continuamente até que a força elétrica $\vec{F}_E$ para baixo seja suficientemente grande para equilibrar a força magnética $\vec{F}_B$ orientada para cima. Então, a força resultante sobre as cargas torna-se nula e cessa a corrente.

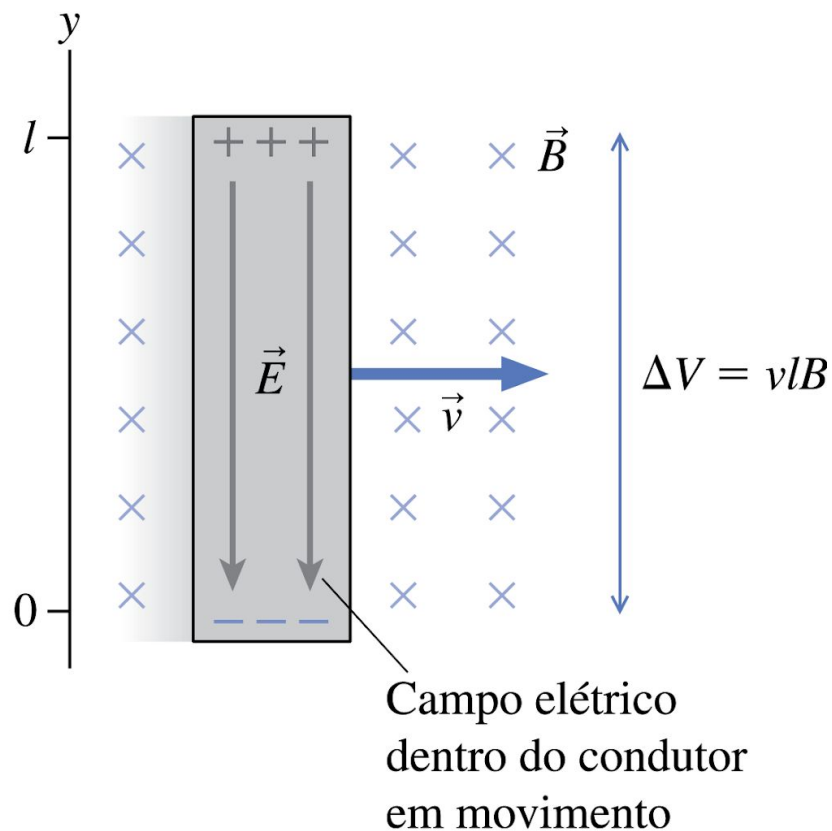
Indução eletromagnética



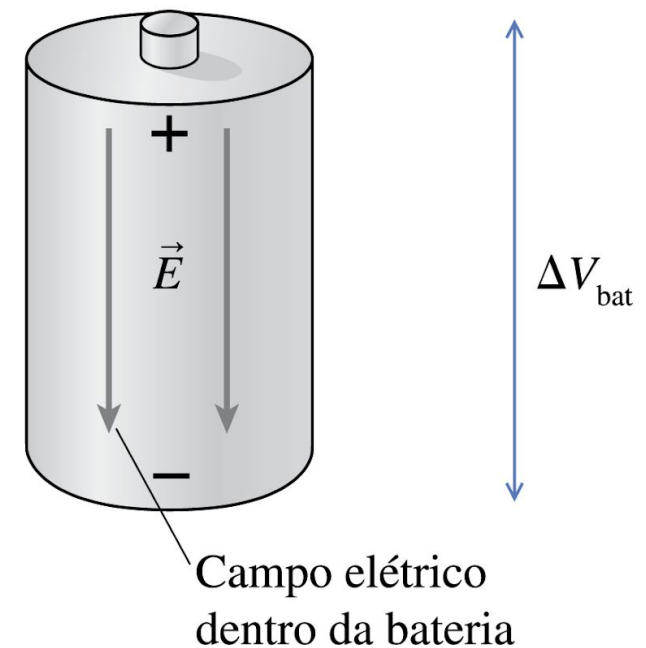
Indução eletromagnética

Dois tipos de fem...

As forças magnéticas separam as cargas, produzindo uma diferença de potencial entre as extremidades. Trata-se de uma fem de movimento.



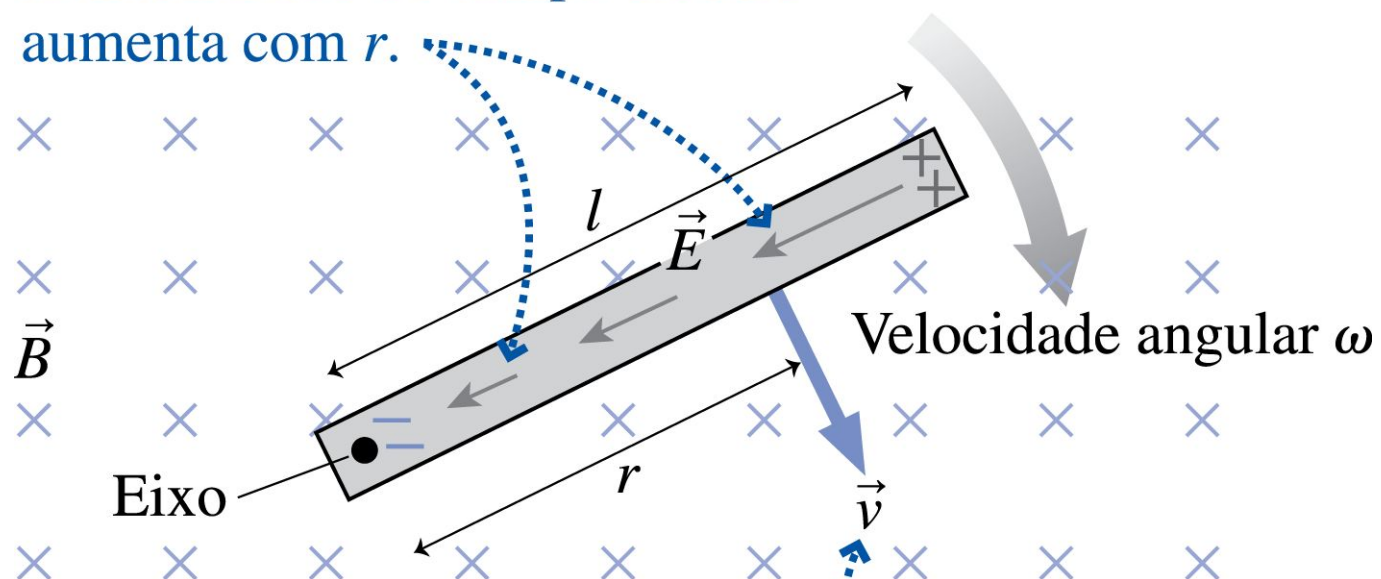
As reações químicas separam as cargas, produzindo uma diferença de potencial entre as extremidades. Trata-se de uma fem química.



Indução eletromagnética

Ex.34.2

A intensidade do campo elétrico aumenta com r .



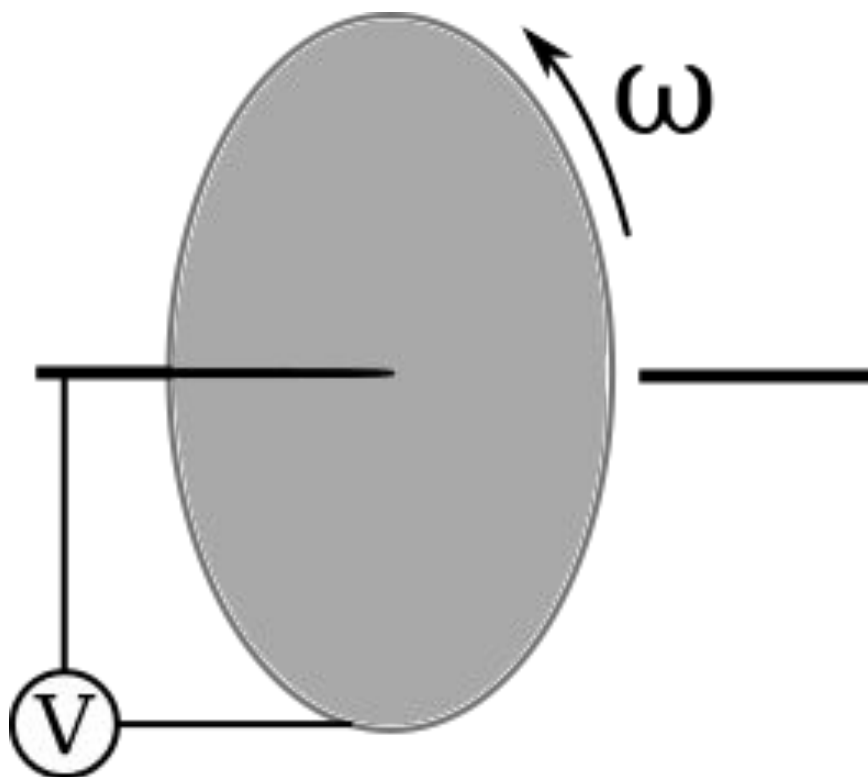
A uma distância r , a velocidade vale $v = \omega r$.

$$ds = dr$$

$$\begin{aligned}\varepsilon &= \Delta V = V_+ - V_- = - \int_i^f \vec{E} \cdot d\vec{s} \\ &= - \int_0^l E_r dr = - \int_0^l (-\omega r B) dr = \frac{1}{2} \omega l^2 B\end{aligned}$$

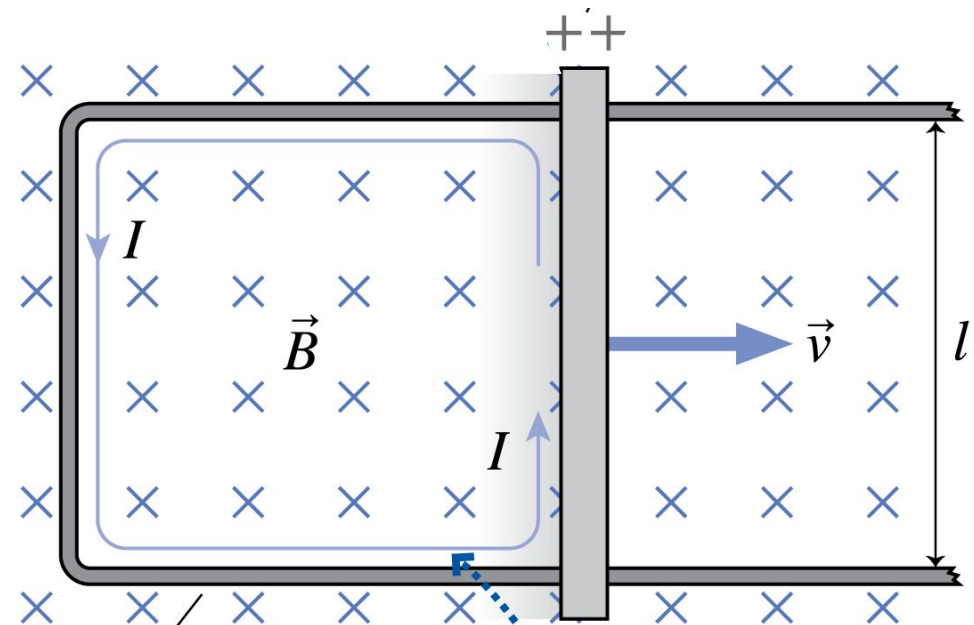
Indução eletromagnética

Exemplo: Dínamo de Faraday



Indução eletromagnética

*Conectando o condutor
em movimento a um circuito...*



Trilho condutor.
Fixado à mesa e imóvel.

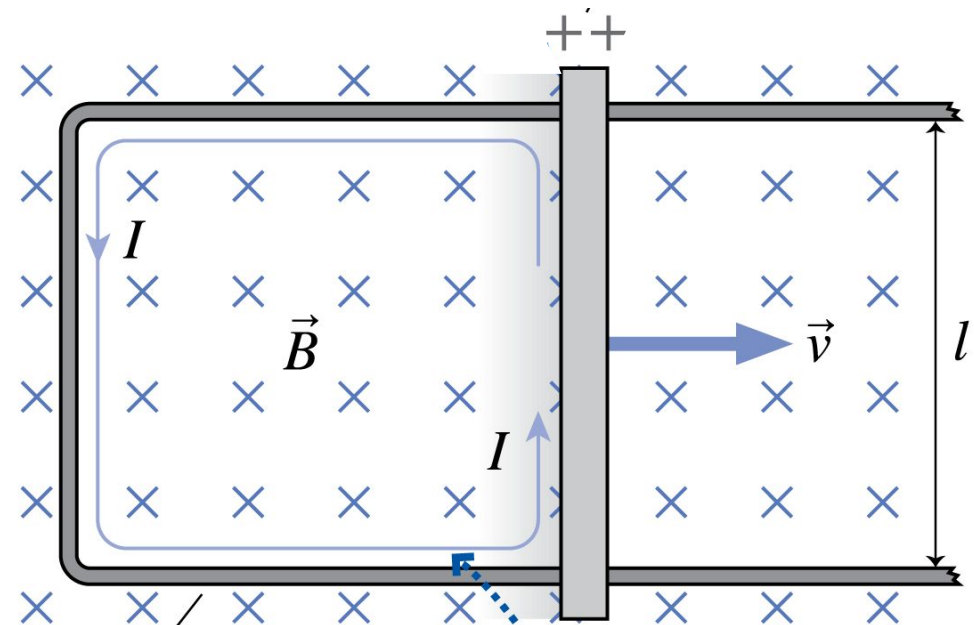
2. Os portadores de carga fluem
ao longo da espira condutora
formando uma corrente induzida.

Indução eletromagnética

Conectando o condutor em movimento a um circuito...

Usando o resultado da fem de um metal em movimento:

$$I = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{v l B}{R}$$



Trilho condutor.
Fixado à mesa e imóvel.

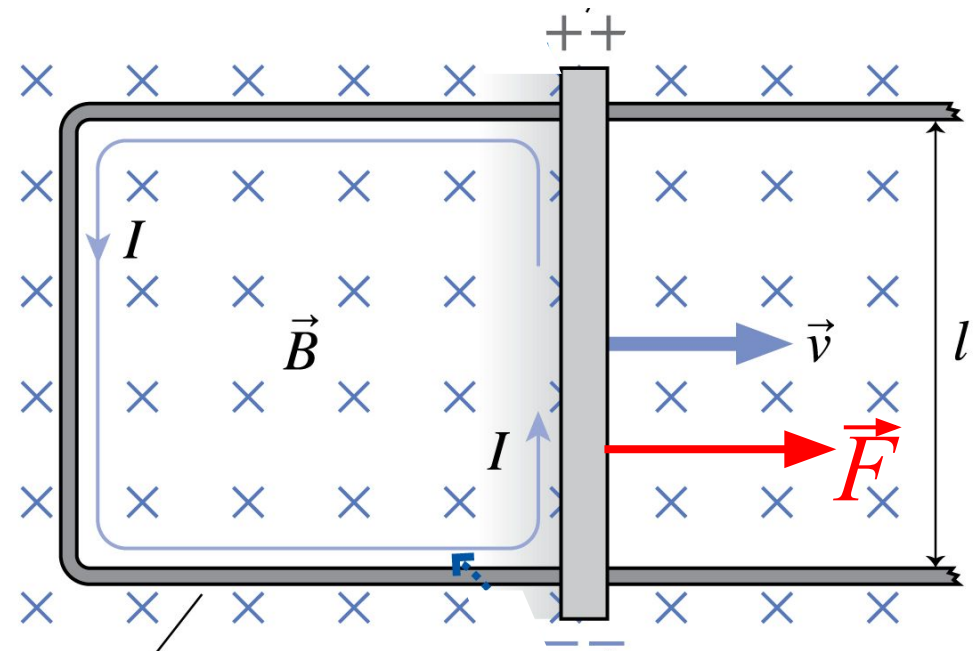
2. Os portadores de carga fluem ao longo da espira condutora formando uma corrente induzida.

Indução eletromagnética

Teste Conceitual 1

Como F deve se comportar de forma a manter $v = \text{cte}$?

- A) F deve aumentar no tempo*
- B) F deve diminuir no tempo*
- C) F deve ser constante e nula*
- D) F deve ser constante e não nula.*



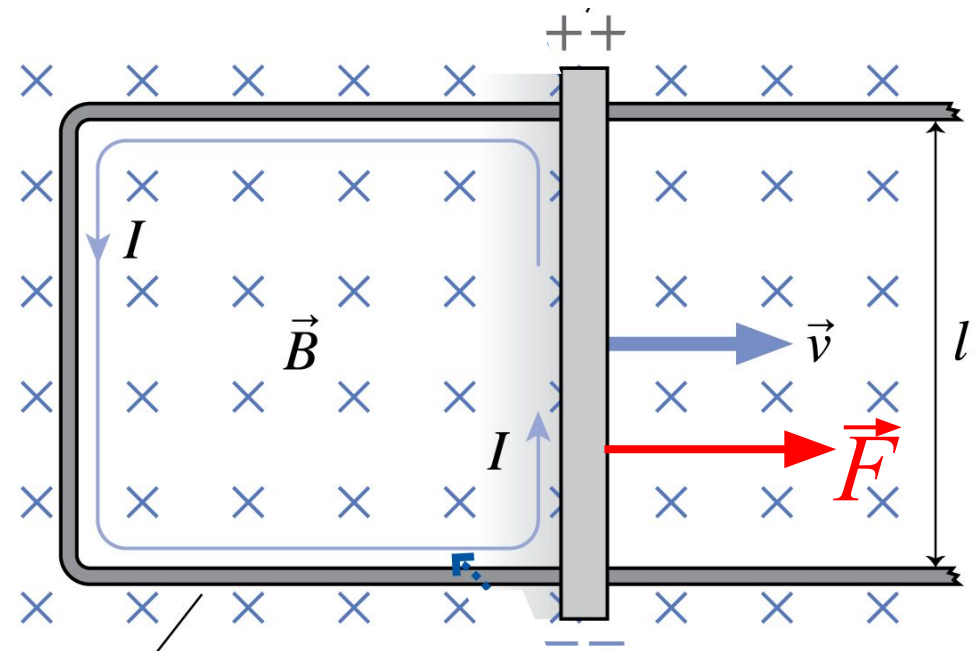
Trilho condutor.
Fixado à mesa e imóvel.

Indução eletromagnética

Teste Conceitual 1

Como F deve se comportar de forma a manter $v = \text{cte}$?

- A) F deve aumentar no tempo
- B) F deve diminuir no tempo
- C) F deve ser constante e nula
- D) F deve ser constante e não nula.



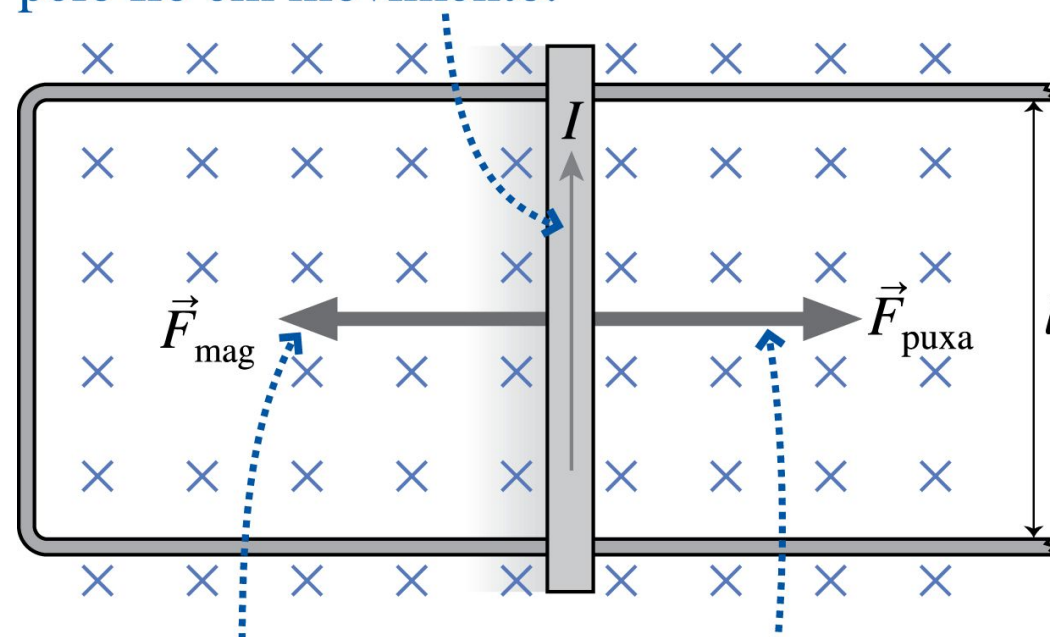
Trilho condutor.
Fixado à mesa e imóvel.

Indução eletromagnética

Em resumo...



A corrente induzida flui pelo fio em movimento.

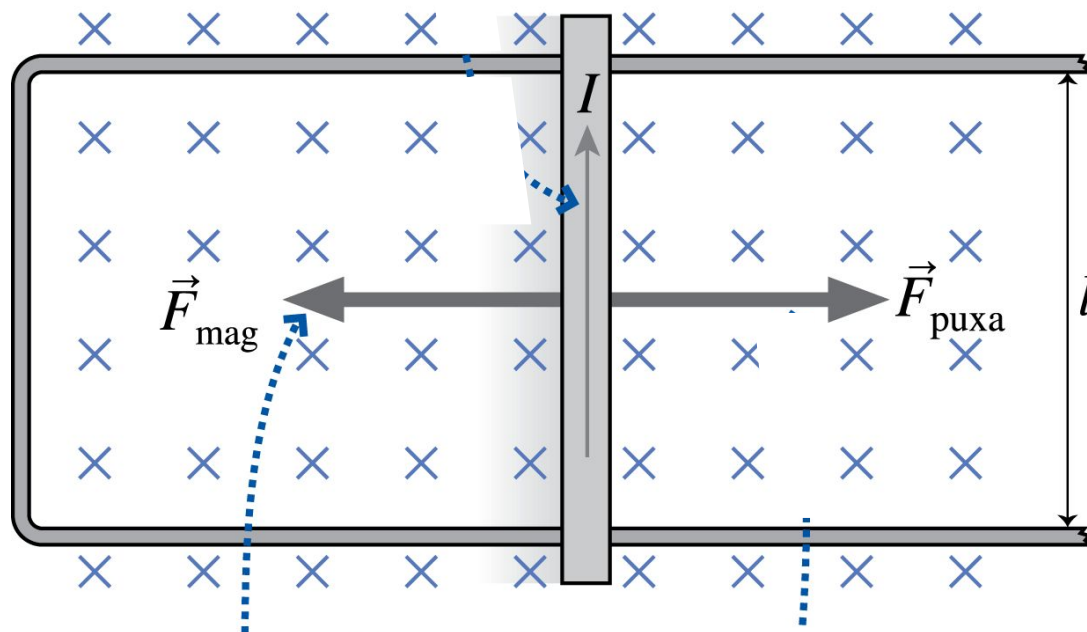


A força magnética sobre o fio condutor de corrente opõe-se ao movimento.

Uma força que puxe para a direita deve equilibrar a força magnética a fim de manter o fio em movimento com velocidade constante. Essa força realiza trabalho sobre o fio.



Indução eletromagnética



A força magnética sobre o fio condutor de corrente opõe-se ao movimento.

É necessário haver uma força que puxe a barra a fim de mantê-la em movimento para a direita...

Essa força externa realiza trabalho

$$\begin{aligned} F_{\text{puxa}} &= F_{\text{mag}} \\ &= IlB \\ &= \frac{vlB}{R} lB \\ &= \frac{v l^2 B^2}{R} \end{aligned}$$

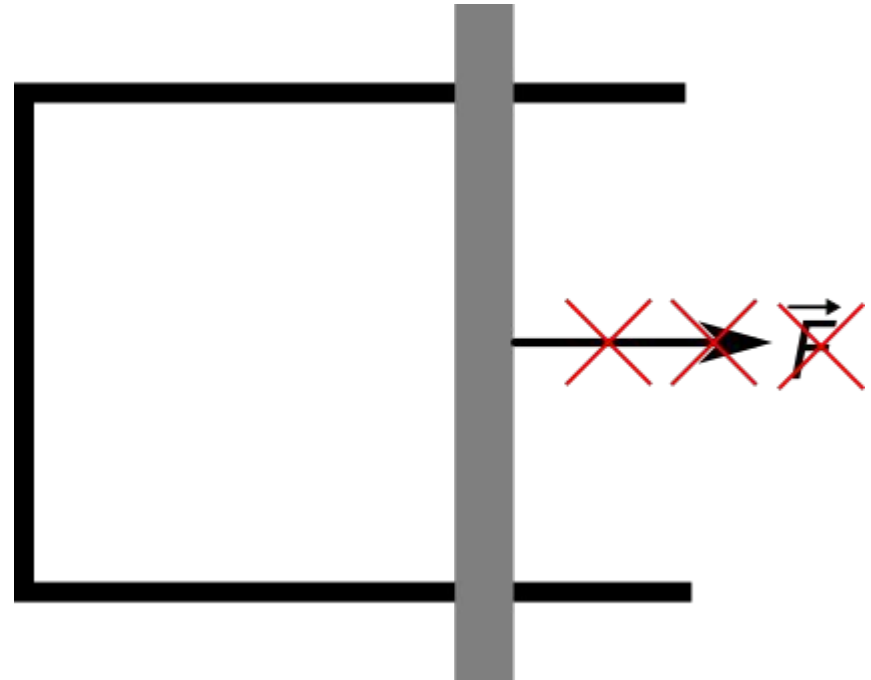
$$\dots Pot = I^2 R = \frac{v^2 l^2 B^2}{R}$$

Indução eletromagnética

Teste Conceitual 2

E se a Força F cessar? Lembrando que não há atrito...

- A) O fio deslizando freia e volta pra trás*
- B) O fio deslizando freia e para*
- C) O fio deslizando mantém $v=cte$*
- D) O fio deslizando acelera para a direita*

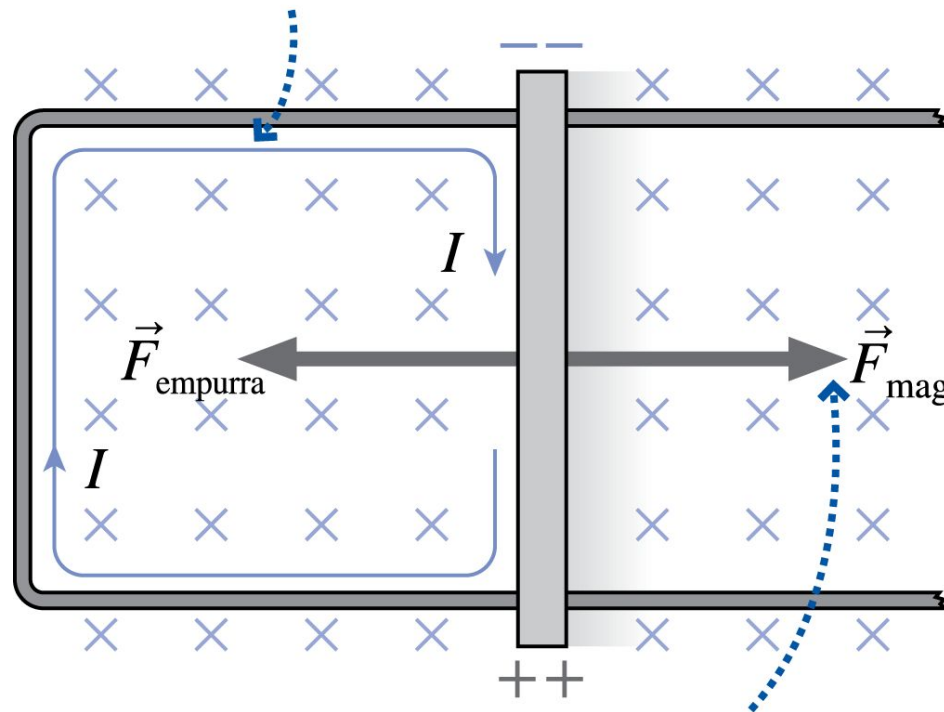




Cap. 34 - Indução eletromagnética

O fio metálico se move da direita para a esquerda...

1. A força magnética sobre os portadores de carga aponta para baixo; logo, a corrente induzida flui em sentido horário.



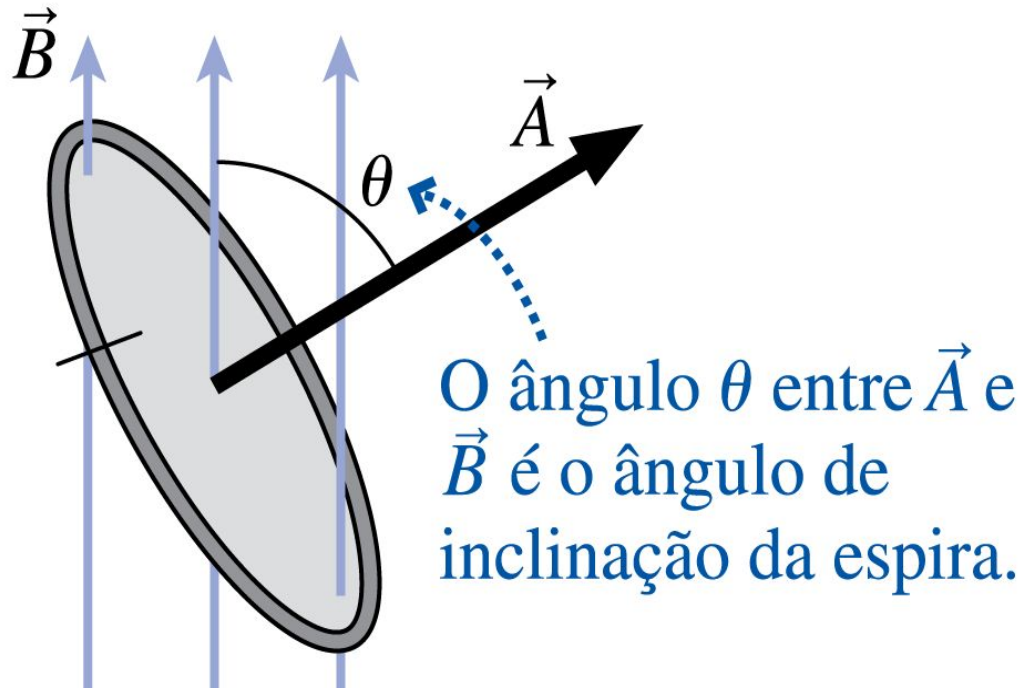
2. A força magnética sobre o fio condutor de corrente aponta para a direita.

OBS:> A força magnética é contrária a variação da área.

Indução eletromagnética

Fluxo Magnético

O fluxo magnético através da espira é
 $\Phi_m = \vec{A} \cdot \vec{B}$.



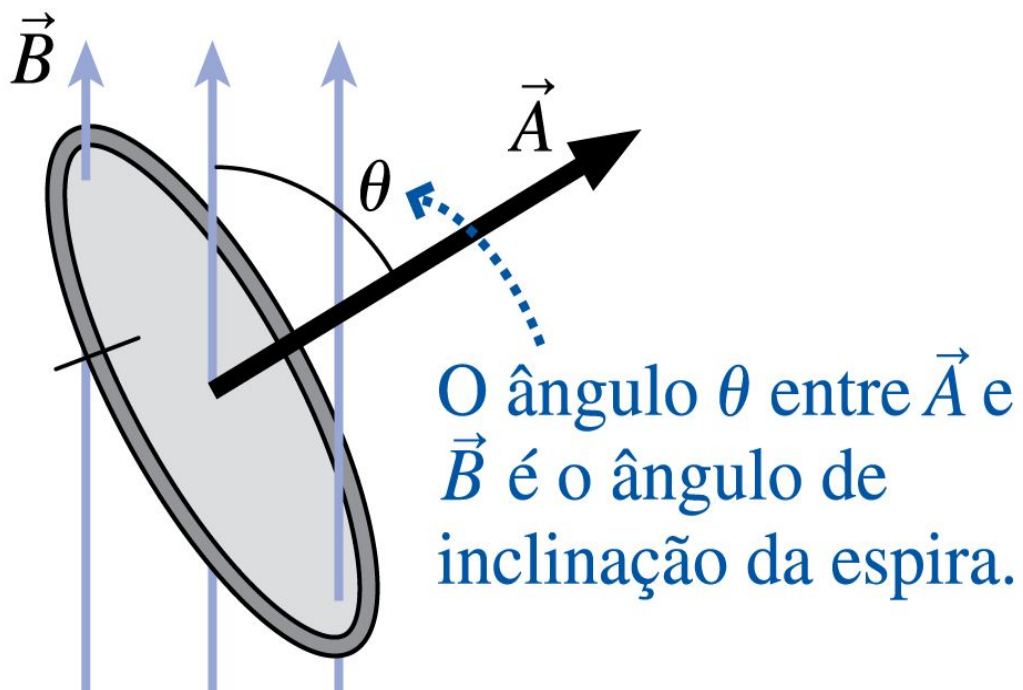
Produto escalar

$$\vec{A} \cdot \vec{B} = |\vec{A}| |\vec{B}| \cos \theta$$

Indução eletromagnética

Fluxo Magnético

O fluxo magnético através da espira é
 $\Phi_m = \vec{A} \cdot \vec{B}$.

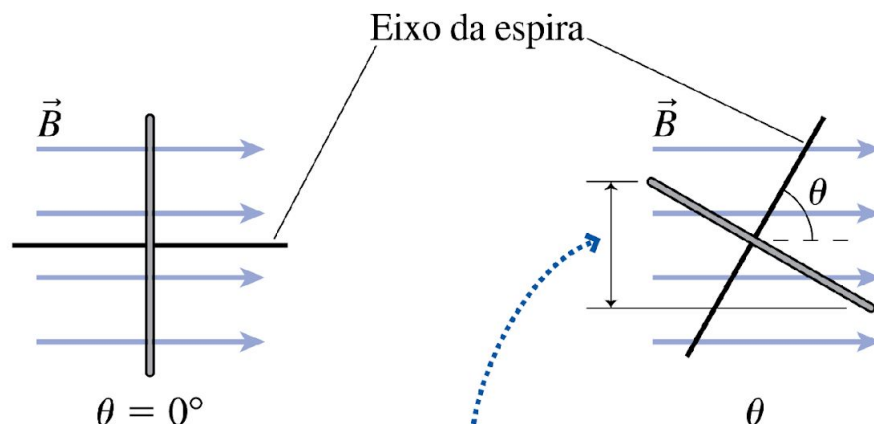


Caso geral,
$$\Phi_B \equiv \int_A \vec{B} \cdot d\vec{A}$$

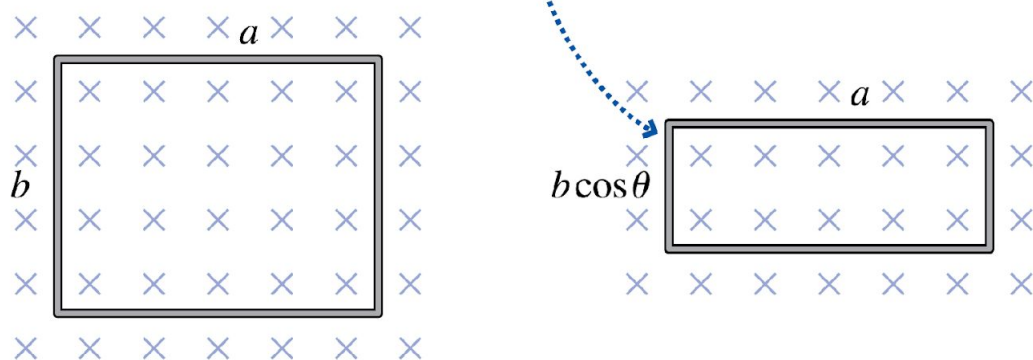
Indução eletromagnética

Fluxo Magnético:

Espira vista de lado:



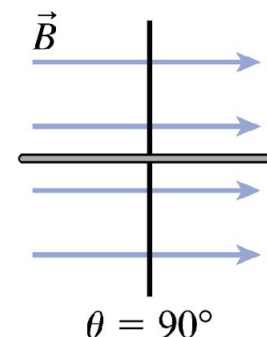
Vista segundo a direção do campo magnético:



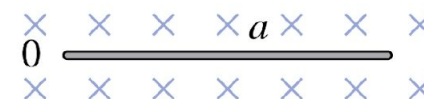
Φ_B é máx

A espira é perpendicular ao campo; logo o número de setas que a atravessa é máximo.

Girar a espira em um ângulo θ fará com que muito menos setas a atravessem.



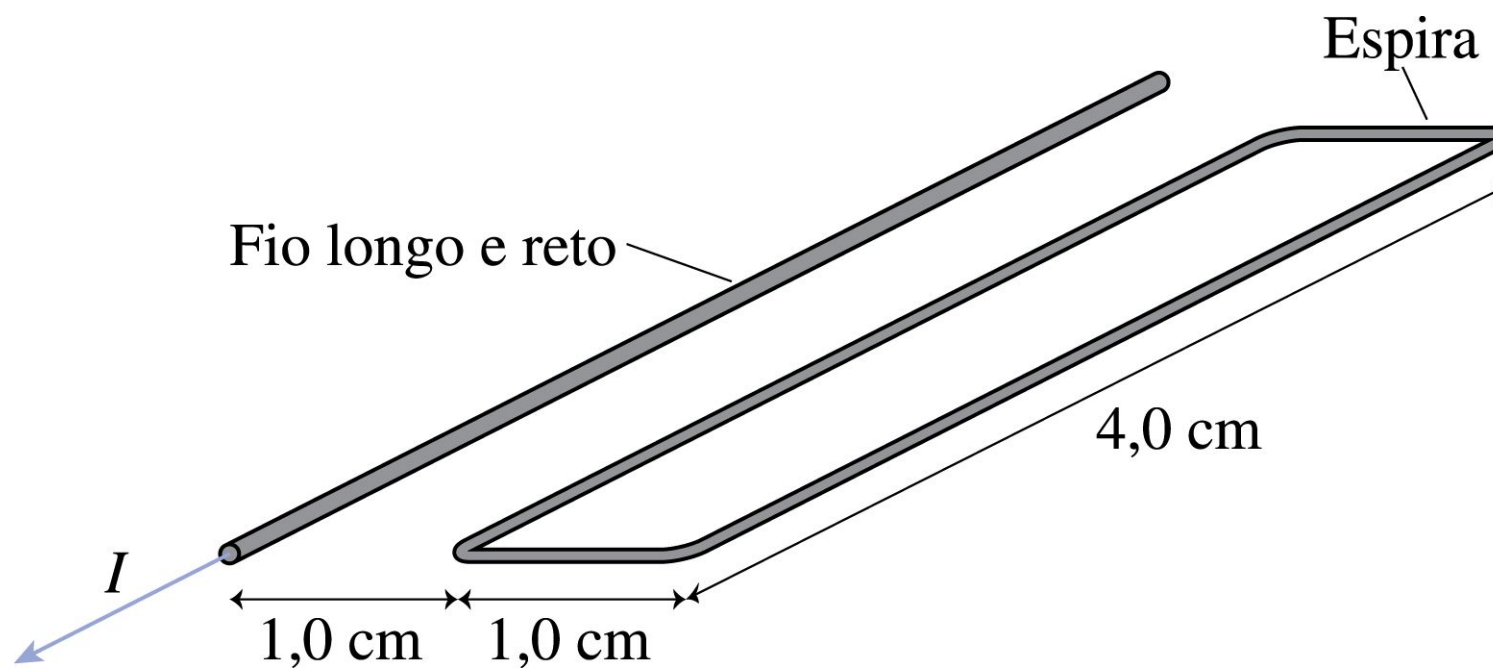
Φ_B é nulo



Girada em 90° , nenhuma seta atravessa a espira.

Indução eletromagnética

Problema: qual o fluxo através da espira?

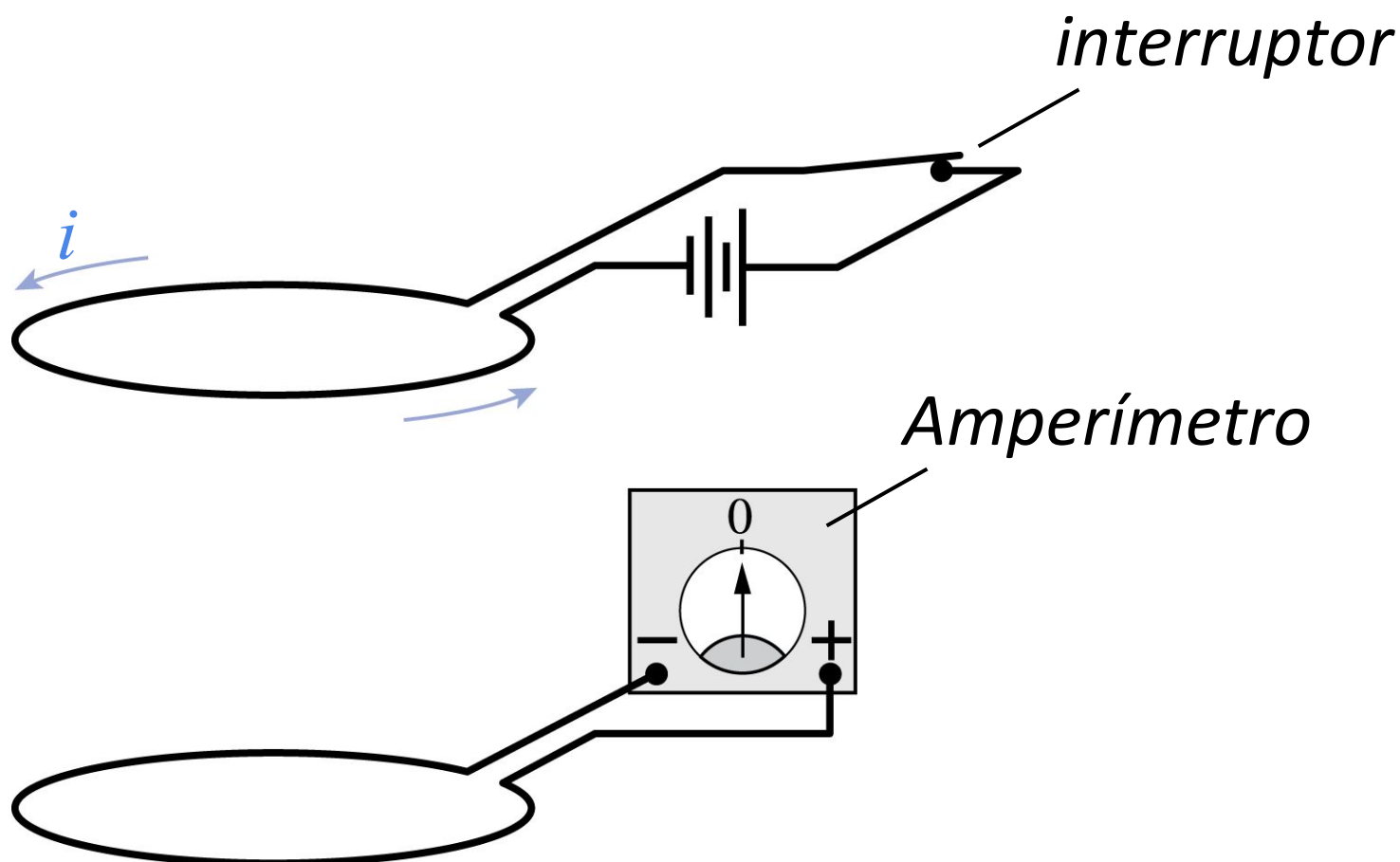


Indução eletromagnética

A Indução eletromagnética

Indução eletromagnética

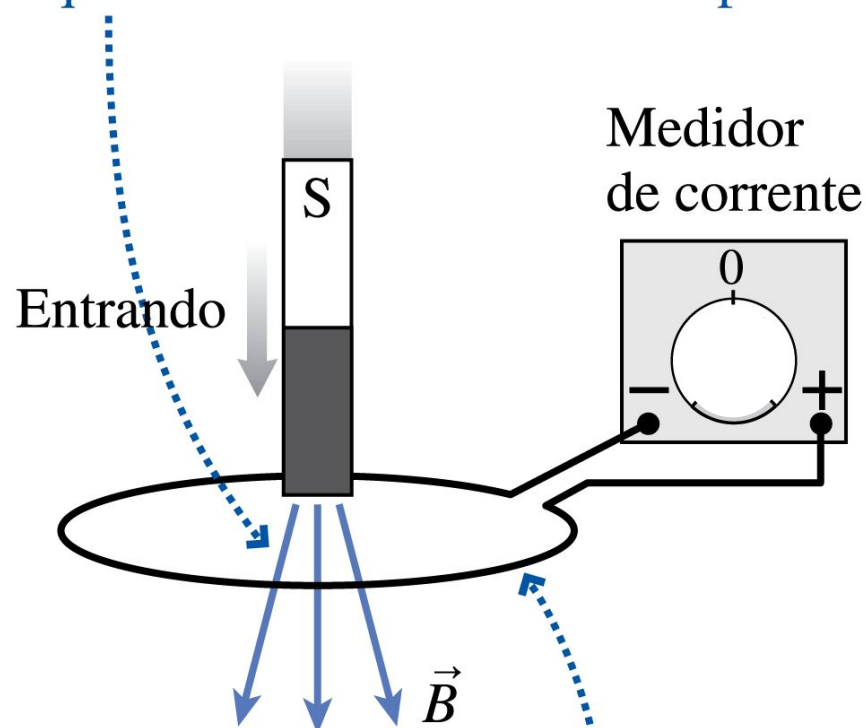
O interruptor do circuito superior está fechado há um longo tempo... O que acontecerá no circuito de baixo (amperímetro) quando o interruptor for aberto?



Indução eletromagnética

De forma similar, podemos considerar num problema análogo

Empurrar um ímã em barra para dentro de uma espira aumenta o fluxo através da mesma, o que induz uma corrente na espira.



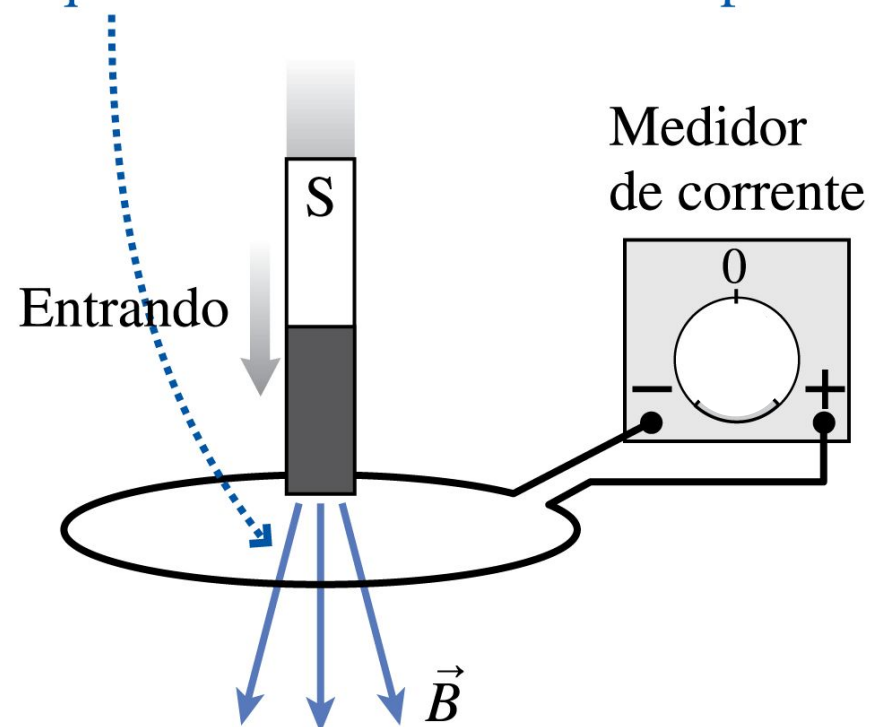
A corrente induzida flui em sentido horário ou anti-horário?



Indução eletromagnética

A Lei de Lenz

Empurrar um ímã em barra para dentro de uma espira aumenta o fluxo através da mesma, o que induz uma corrente na espira.



A Lei de Lenz

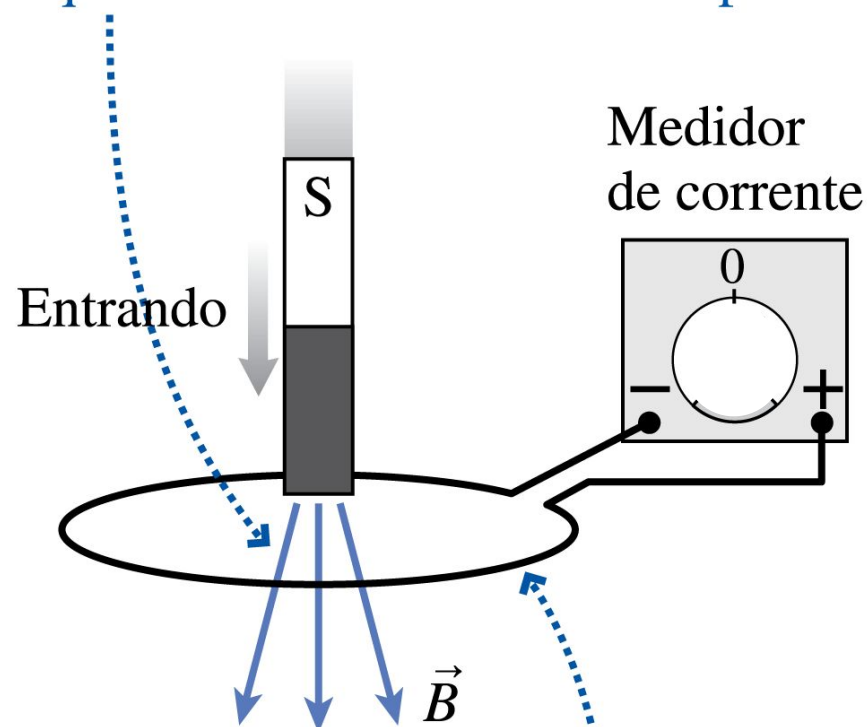
*Existirá uma corrente induzida em uma espira condutora fechada se, e somente se, o fluxo magnético através da mesma estiver variando.
O sentido da corrente é tal que o campo magnético produzido se opõe à variação do fluxo.*



Indução eletromagnética

A Lei de Lenz

Empurrar um ímã em barra para dentro de uma espira aumenta o fluxo através da mesma, o que induz uma corrente na espira.



Pergunta:

A corrente induzida flui em sentido horário ou anti-horário?

A Lei de Lenz

Existirá uma corrente induzida em uma espira condutora fechada se, e somente se, o fluxo magnético através da mesma estiver variando.

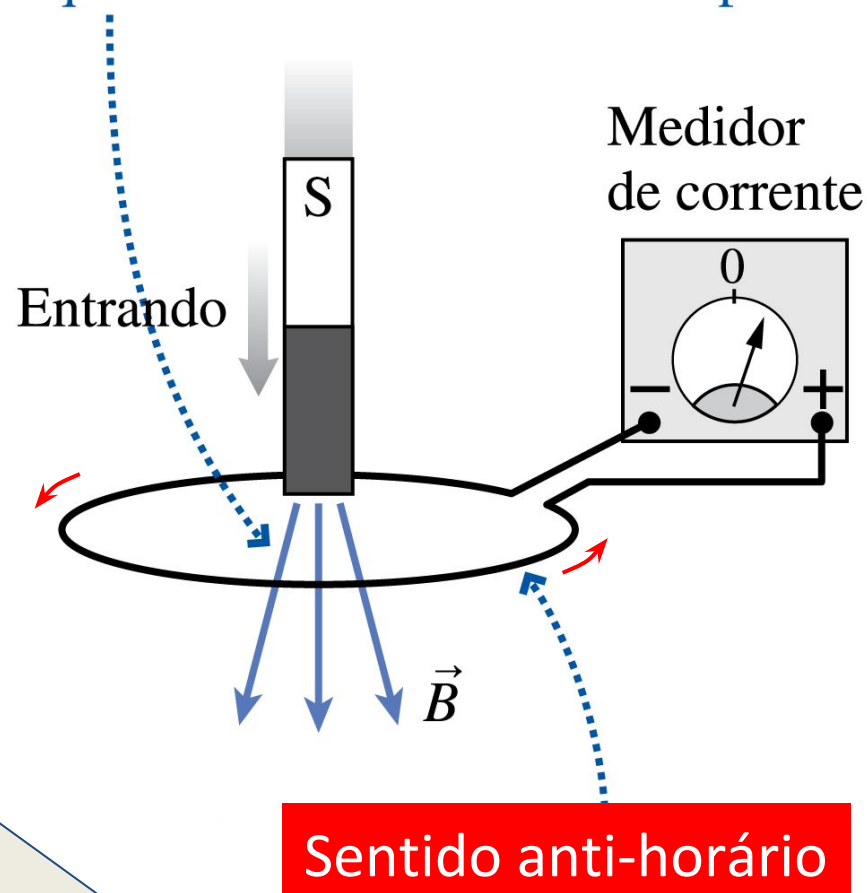
O sentido da corrente é tal que o campo magnético produzido se opõe à variação do fluxo.



Indução eletromagnética

A Lei de Lenz

Empurrar um ímã em barra para dentro de uma espira aumenta o fluxo através da mesma, o que induz uma corrente na espira.



A Lei de Lenz

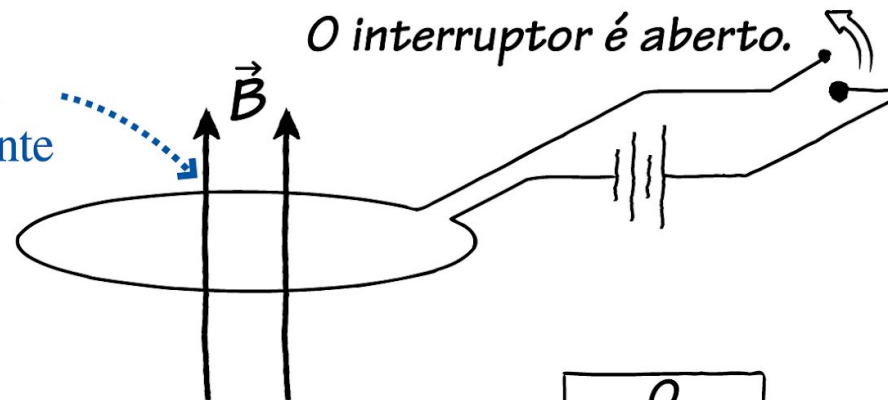
Existirá uma corrente induzida em uma espira condutora fechada se, e somente se, o fluxo magnético através da mesma estiver variando. O sentido da corrente é tal que o campo magnético produzido se opõe à variação do fluxo.



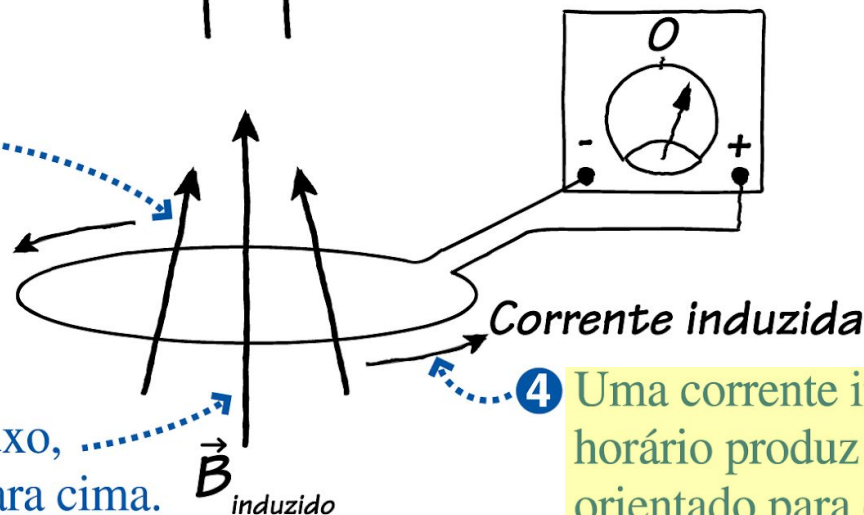
Indução eletromagnética

*O interruptor do circuito superior está fechado há um longo tempo... O que acontecerá no circuito de baixo quando o interruptor for aberto? **Resposta***

- 1 O campo magnético da espira superior aponta para cima, porém está diminuindo enquanto a corrente no circuito rapidamente decresce.



- 2 O fluxo através da espira é de baixo para cima e decrescente.



- 3 A fim de se opor à variação do fluxo, o campo induzido deve apontar para cima.

- 4 Uma corrente induzida em sentido anti-horário produz um campo magnético orientado para cima.

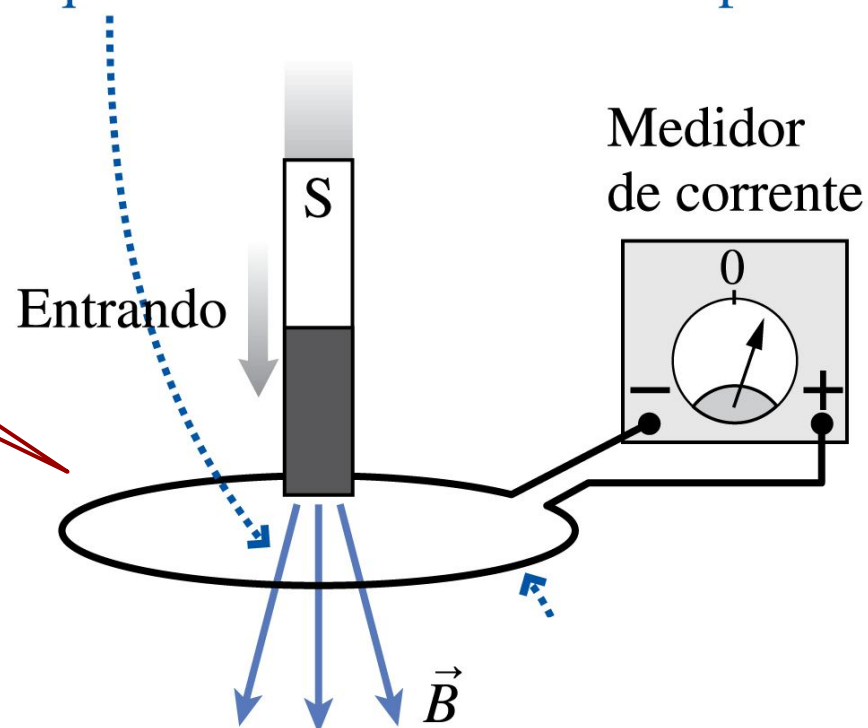
Lei de Lenz

Indução eletromagnética

A Lei de Faraday da Indução

$$\mathcal{E}_{ind} = -\frac{d}{dt}\phi_B$$

Empurrar um ímã em barra para dentro de uma espira aumenta o fluxo através da mesma, o que induz uma corrente na espira.

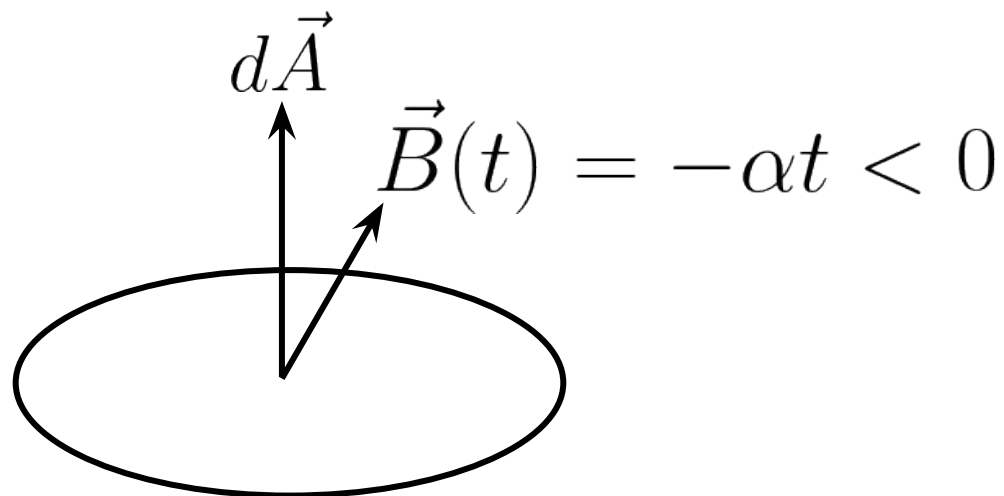


Uma *fem* $\mathcal{E}_{ind}$ será induzida ao longo de uma espira fechada se o fluxo magnético através da mesma sofrer variação. Seu sentido é tal que produz uma corrente induzida no sentido dado pela Lei de Lenz.

Indução eletromagnética

Problema

Dada a espira abaixo imersa num campo magnético $B(t)$ (espacialmente uniforme):



- 1- Determine o sentido da corrente induzida*
- 2- Determine a fem induzida*

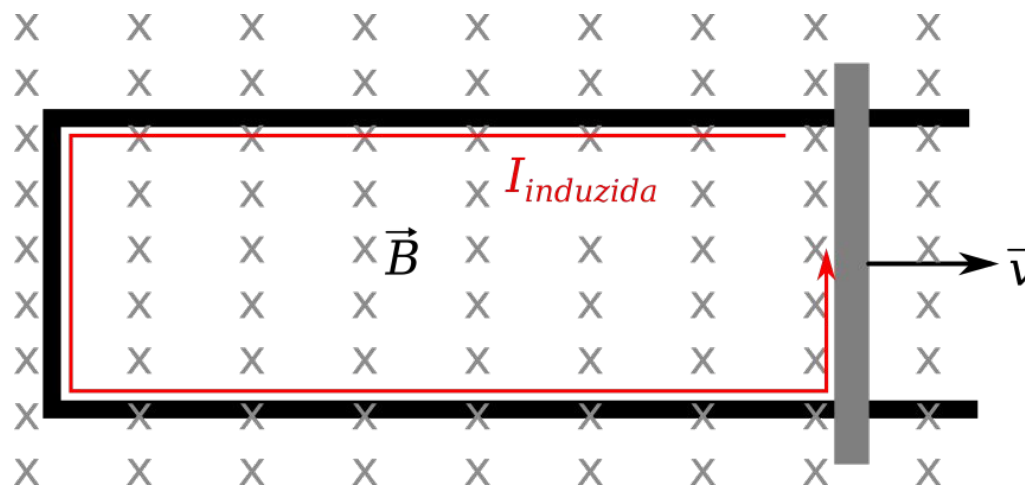
Indução eletromagnética

A Lei de Faraday da Indução

Uma *fem* $\mathcal{E}$ será induzida ao longo de uma espira fechada se o fluxo magnético através da mesma sofrer variação. O módulo da fem é dado por

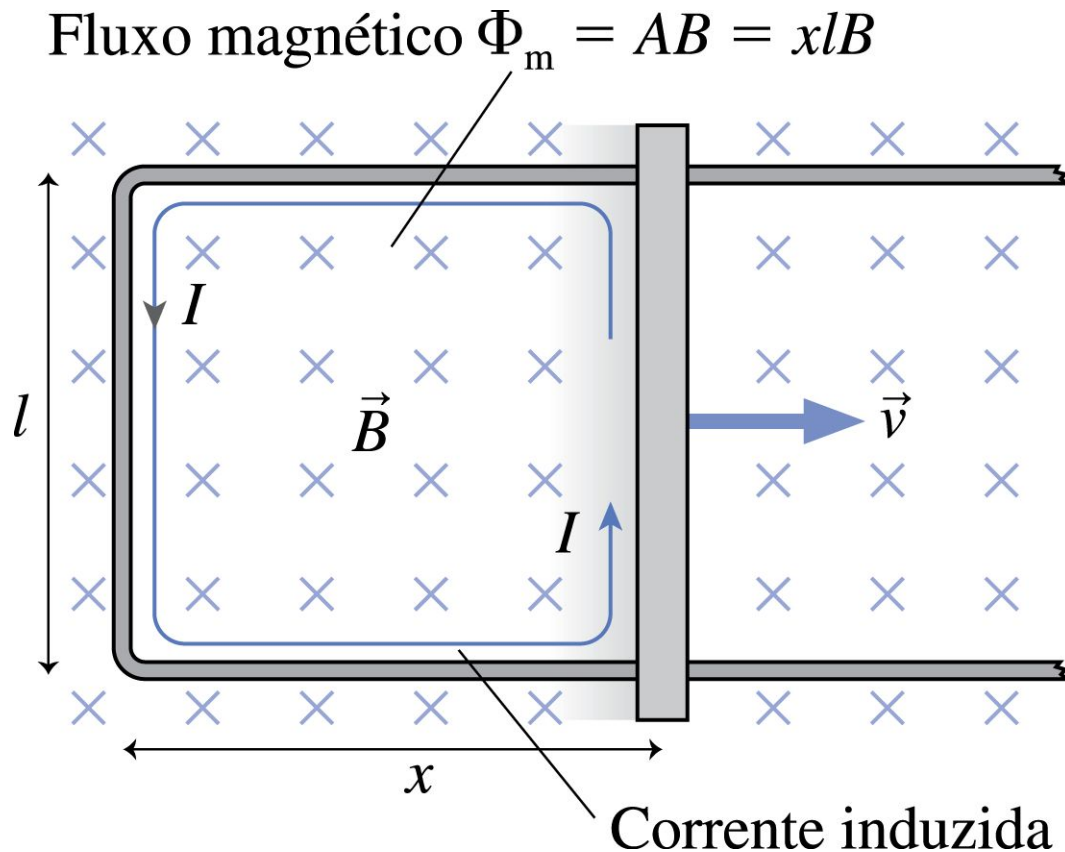
$$\mathcal{E} = - \frac{d\Phi_B}{dt}$$

e seu sentido é tal que produza uma corrente induzida no sentido dado pela Lei de Lenz.



Indução eletromagnética

Corrente Induzida (Variando a área e B constante)



$$\begin{aligned}\mathcal{E} &= \left| \frac{d\Phi_M}{dt} \right| \\ &= \frac{d}{dt}(xlB) \\ &= lB \frac{dx}{dt} = vlB\end{aligned}$$

Considerando o fio com resistência R ,

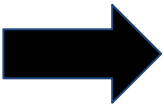
$$I = \frac{\mathcal{E}}{R} = \frac{vlB}{R}$$

Como o fluxo está aumentando dentro da espira e o campo magnético é produzido de forma a opor esse aumento, a corrente flui no sentido anti-horário.

Indução eletromagnética

O que nos diz a Lei de Faraday da Indução eletromagnética???

Todas as correntes induzidas estão associadas a variações do fluxo magnético.


$$\varepsilon = \left| \frac{d\Phi_m}{dt} \right| = \left| \vec{B} \cdot \frac{d\vec{A}}{dt} + \vec{A} \cdot \frac{d\vec{B}}{dt} \right|$$

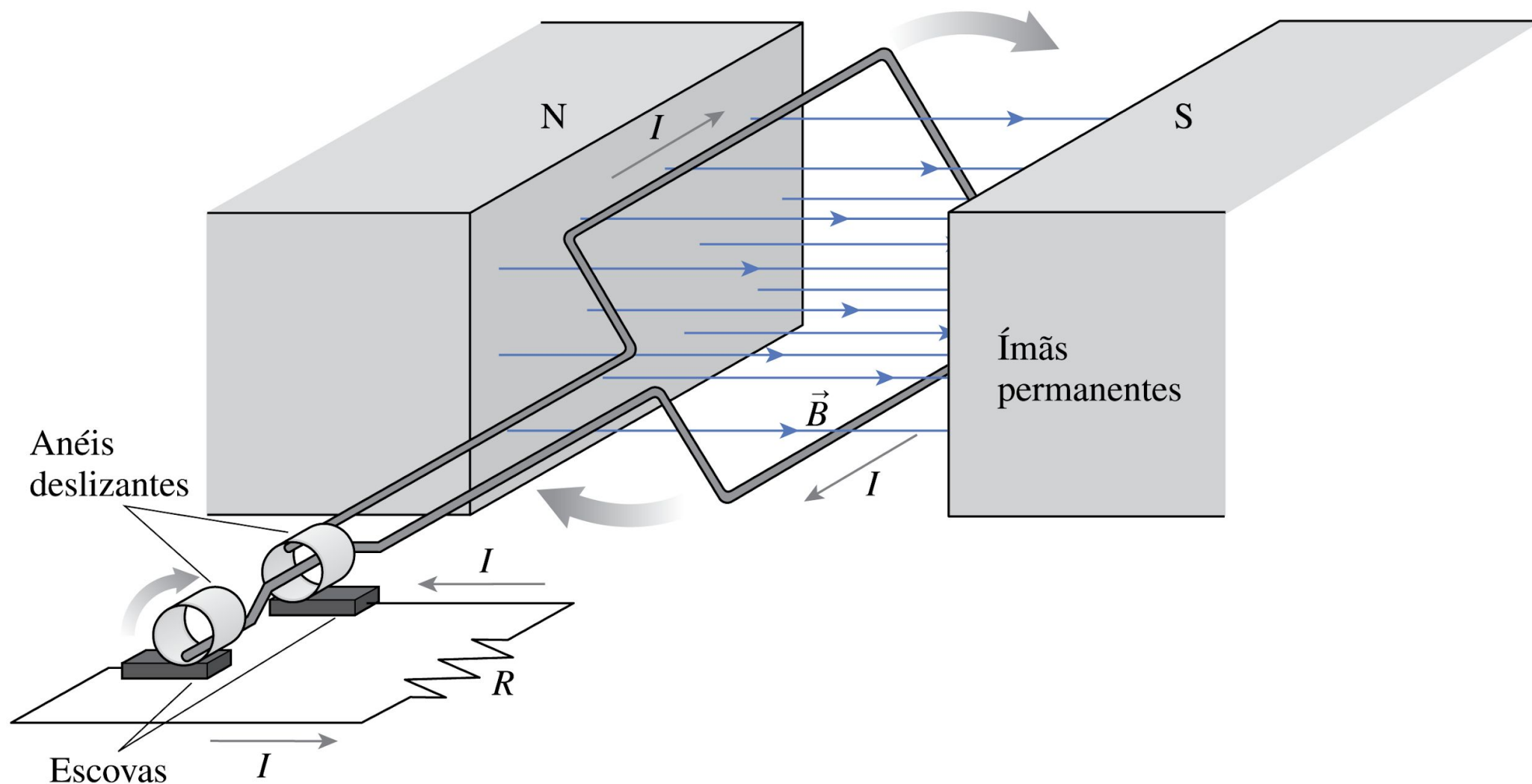
A espira pode se mover, se expandir ou girar, criando uma fem de movimento.

*O campo **B** pode variar**

** O fato de **B** produzir ε nos constituiu uma grande descoberta científica, que não pode ser explicado por nada que sabemos de eletromagnetismo.*

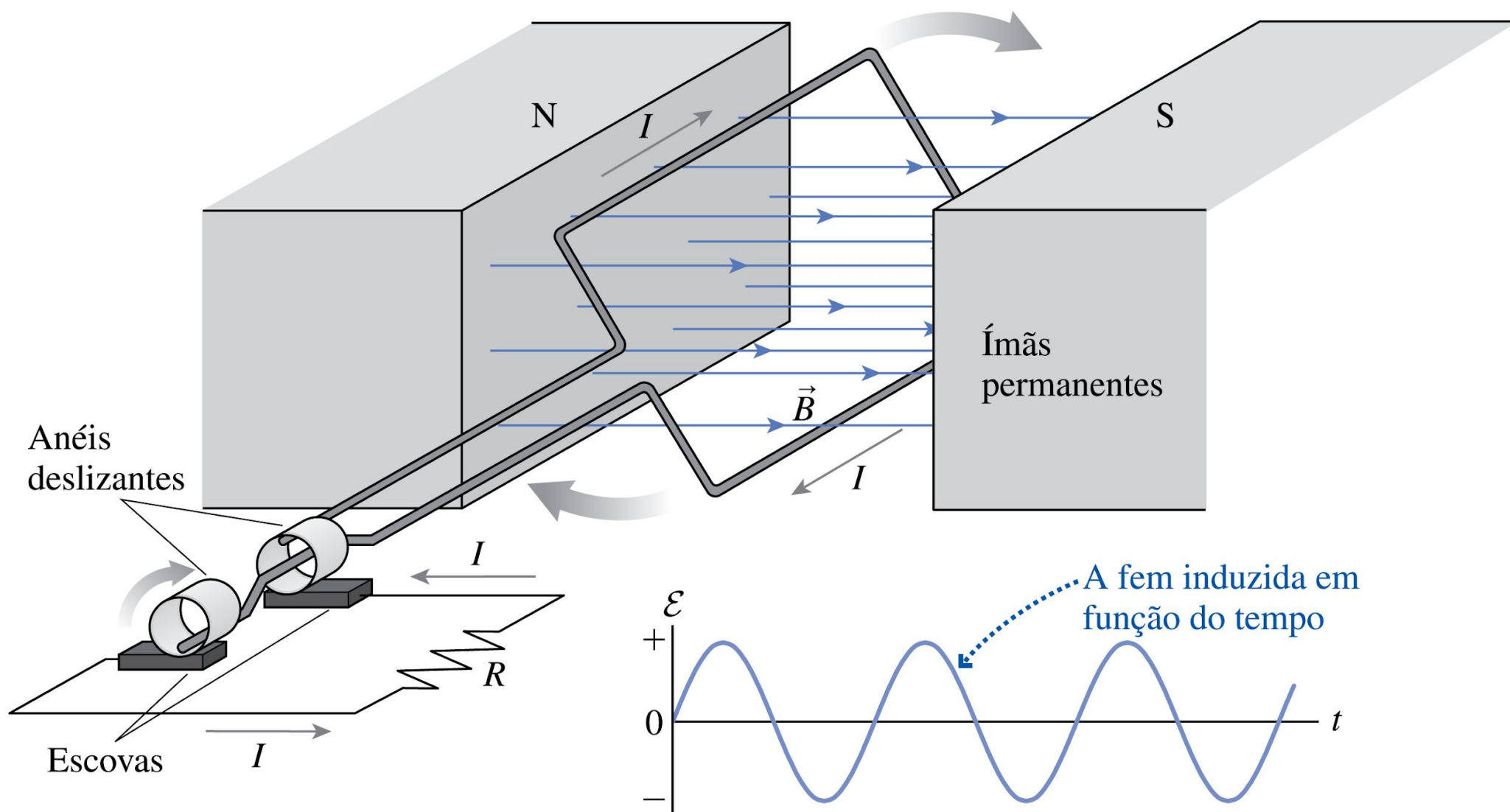
Indução eletromagnética

Fonte de corrente alternada: Fonte CA



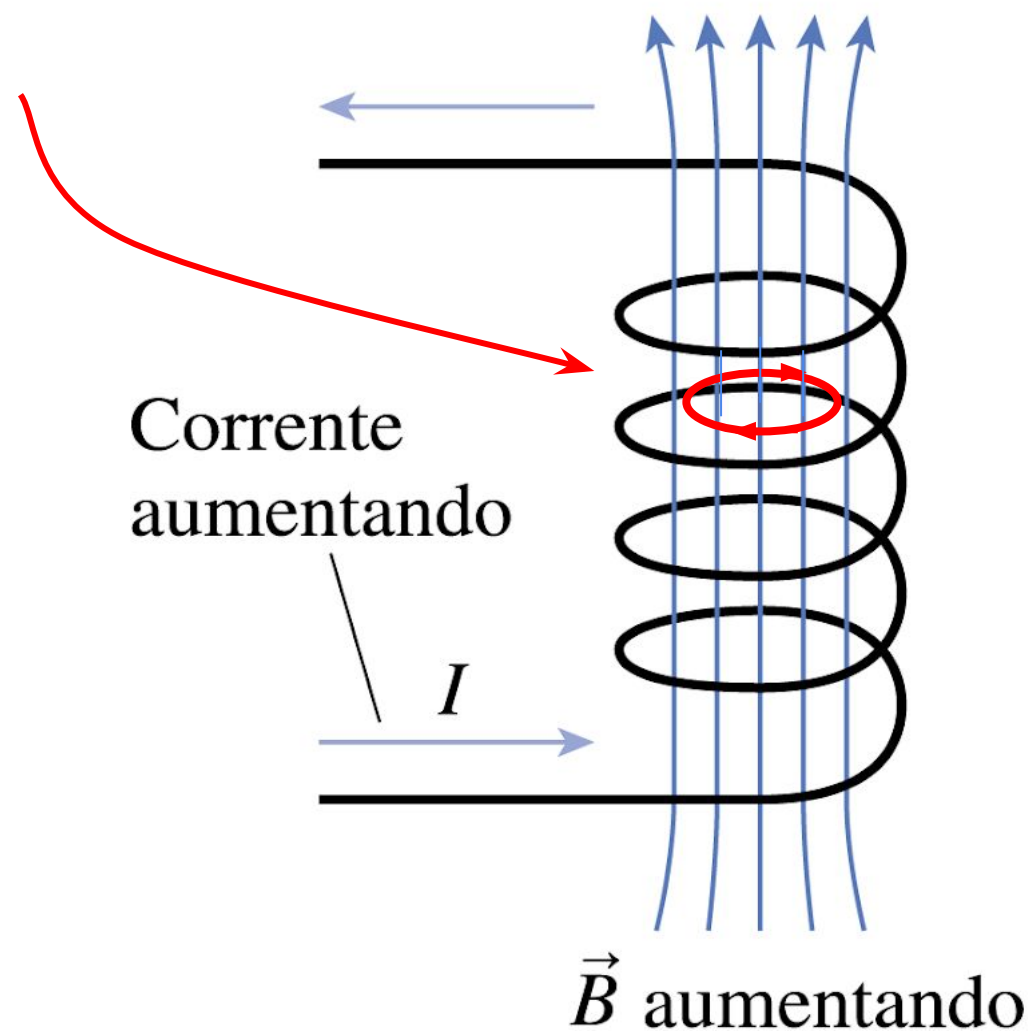
Indução eletromagnética

Fonte de corrente alternada: Fonte CA



Indução eletromagnética

Se houvesse uma espira condutora dentro do solenóide poderíamos usar a Lei de Lenz e determinar a corrente induzida...

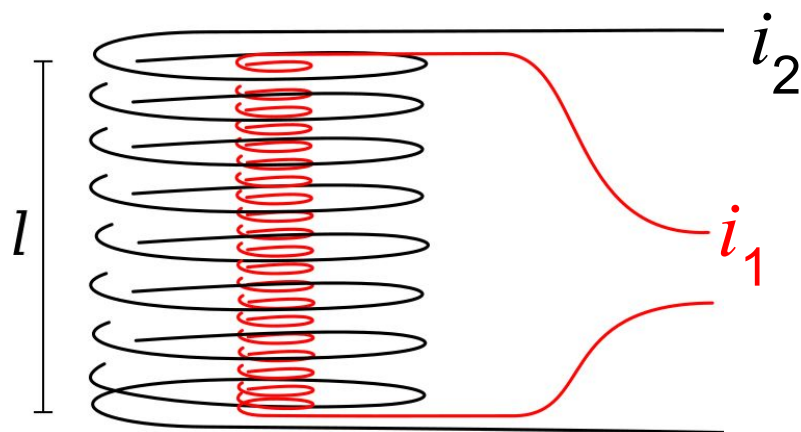




Indução eletromagnética

Considerações sobre a indutância...

Consideramos dois solenóides, um dentro do outro.



- $i_1 \rightarrow B_1$: dentro do solenóide 1
- $i_2 \rightarrow B_2$: dentro do solenóide 2

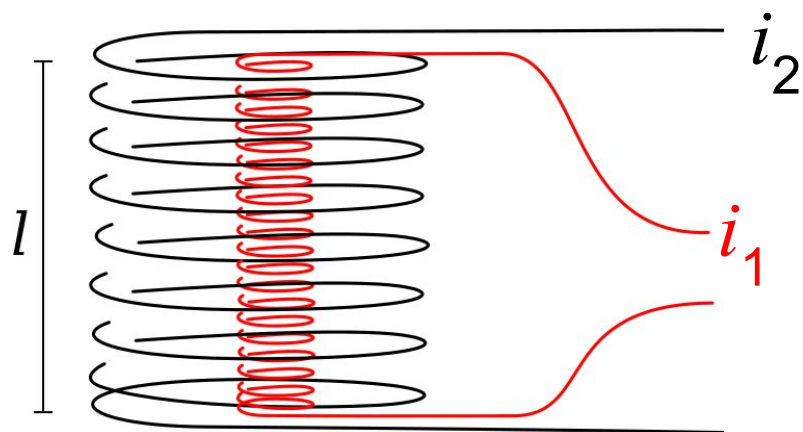
Existe uma indutância mútua entre os dois solenóides

- B_1 variável induz um campo no solenóide 2
- B_2 variável induz um campo no solenóide 1

Indução eletromagnética

Considerações sobre a indutância...

Consideramos dois solenóides, um dentro do outro.



- $i_1 \rightarrow B_1$: dentro do solenóide 1
- $i_2 \rightarrow B_2$: dentro do solenóide 2

Existe uma indutância mútua entre os dois solenóides

- B_1 variável induz um campo no solenóide 2
- B_2 variável induz um campo no solenóide 1

Resultados:

Considerando I_1 estacionária: $\Phi_{21} = \frac{\mu_0 N_1 N_2 A}{l} i_1 \Rightarrow M_{21} = \Phi_{21}/i_1$

Considerando I_2 estacionária: $\Phi_{12} = \frac{\mu_0 N_1 N_2 A}{l} i_2 \Rightarrow M_{12} = \Phi_{12}/i_2$

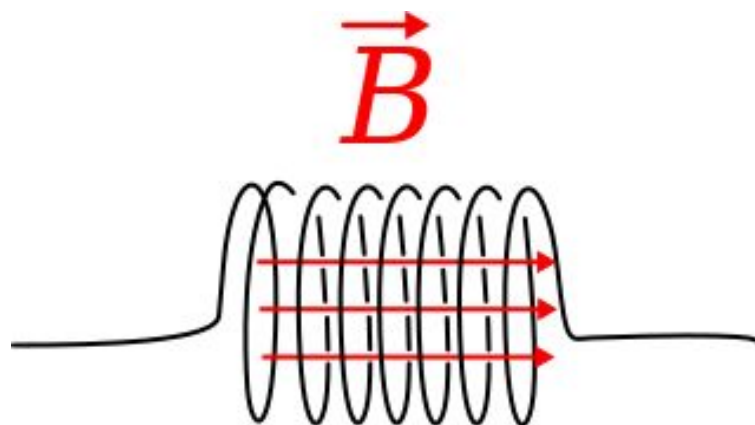
$M_{12} = M_{21} = M \equiv \text{coef. de indução mútua}$



Indução eletromagnética

Considerações sobre a indutância...

Consideramos agora apenas um solenóide.



Existe uma AUTO-indutância no solenóide

- B_1 variável induz um campo no solenóide 1

- $I_1 \rightarrow B_1$: dentro do solenóide 1

Resultados:

Considerando I_1 estacionária: $\Phi_{11} = \frac{\mu_0 N^2 A}{l} I_1 \Rightarrow L_1 = \frac{\Phi_1}{I_1}$

$L_1 \equiv \text{coef. auto-indutância}$



Indução eletromagnética

Considerações sobre a indutância...

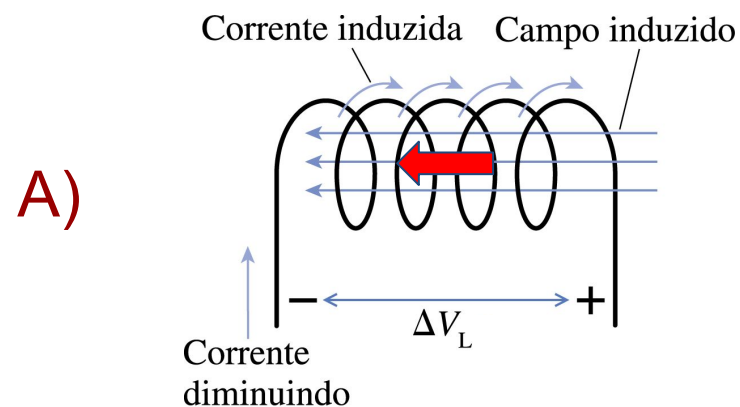
Os coeficientes de auto-indutância e indutância mútua só dependem de propriedades geométricas dos solenóides

área e #espiras.

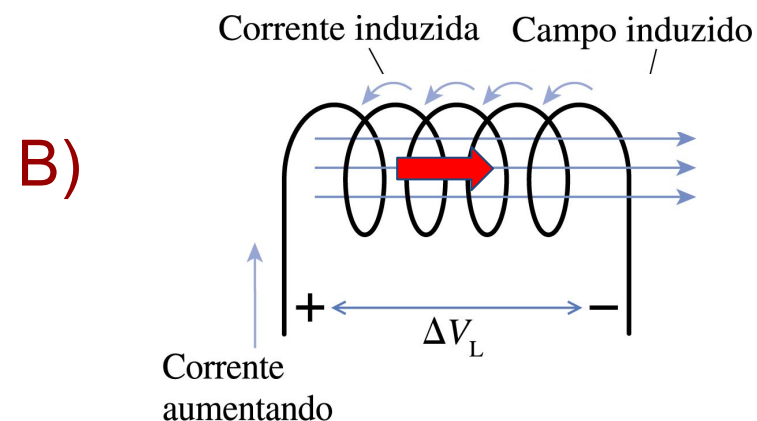
Indução eletromagnética

Considerações sobre a indutância...

Quando a corrente elétrica muda no tempo



$$\varepsilon_L = -L \frac{dI}{dt} > 0$$



$$\varepsilon_L = -L \frac{dI}{dt} < 0$$

Nota: O papel da indutância é suavizar a variação da corrente elétrica.

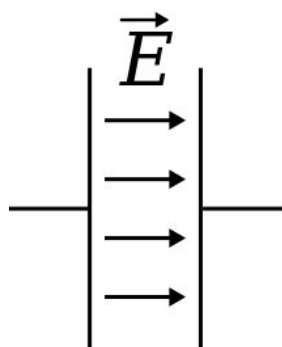


Cap. 34 - Indução eletromagnética

Resumindo...

Os indutores são relacionados com os capacitores

- Capacitor → **capacitância**: capacidade de armazenar carga (e energia) em um dispositivo com campo elétrico uniforme

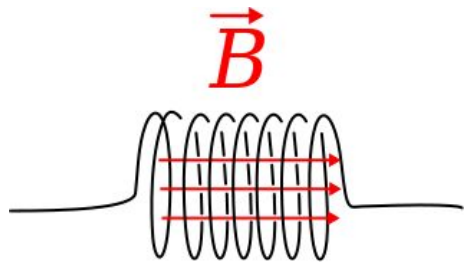


$$C = \frac{Q}{\Delta V} = \frac{\epsilon_0 A}{d}$$

Unidade: 1Coulomb/Volt = 1 Faraday

$$U_C = \frac{1}{2} C \Delta V^2 = \frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 A}{d} (Ed)^2 \dots = \frac{\epsilon_0}{2} (Ad) E^2$$

- Indutor → **indutância**: energia armazenada em um dispositivo com campo magnético uniforme



$$L \equiv \frac{\Phi_m}{I}$$

Unidade: 1Webber/m² = 1 henry

$$U_L = \frac{1}{2} L I^2 = \frac{1}{2} \frac{\mu_0 N^2 A}{2l} I^2 = \frac{1}{2\mu_0} A l B^2$$

Cap. 34 - Indução eletromagnética

Alguns tipos de indutores...

