Capítulo 29 - Indução Eletromagnética

RODRIGO ALVES DIAS

Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF

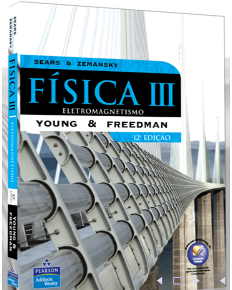
Livro texto: Física 3 - Eletromagnetismo

Autores: Sears e Zemansky

Edição: 12ª

Editora: Pearson - Addisson and Wesley

28 de fevereiro de 2012



Objetivos de Aprendizagem

Ao estudar este capítulo você aprenderá:

- Sobre a evidência empírica de que a variação de um campo magnético induz uma fem.

Objetivos de Aprendizagem

Ao estudar este capítulo você aprenderá:

- Sobre a evidência empírica de que a variação de um campo magnético induz uma fem.
- Como a lei de Faraday relaciona a fem induzida em uma espira à variação de fluxo magnético através da espira.

Objetivos de Aprendizagem

Ao estudar este capítulo você aprenderá:

- Sobre a evidência empírica de que a variação de um campo magnético induz uma fem.
- Como a lei de Faraday relaciona a fem induzida em uma espira à variação de fluxo magnético através da espira.
- Como determinar o sentido de uma fem induzida.

Objetivos de Aprendizagem

Ao estudar este capítulo você aprenderá:

- Sobre a evidência empírica de que a variação de um campo magnético induz uma fem.
- Como a lei de Faraday relaciona a fem induzida em uma espira à variação de fluxo magnético através da espira.
- Como determinar o sentido de uma fem induzida.
- Como calcular a fem induzida em um condutor que se move através de um campo magnético.

Objetivos de Aprendizagem

Ao estudar este capítulo você aprenderá:

- Sobre a evidência empírica de que a variação de um campo magnético induz uma fem.
- Como a lei de Faraday relaciona a fem induzida em uma espira à variação de fluxo magnético através da espira.
- Como determinar o sentido de uma fem induzida.
- Como calcular a fem induzida em um condutor que se move através de um campo magnético.
- Como uma variação no fluxo magnético gera um campo elétrico que é muito diferente daquele produzido por uma combinação de cargas.

Objetivos de Aprendizagem

Ao estudar este capítulo você aprenderá:

- Sobre a evidência empírica de que a variação de um campo magnético induz uma fem.
- Como a lei de Faraday relaciona a fem induzida em uma espira à variação de fluxo magnético através da espira.
- Como determinar o sentido de uma fem induzida.
- Como calcular a fem induzida em um condutor que se move através de um campo magnético.
- Como uma variação no fluxo magnético gera um campo elétrico que é muito diferente daquele produzido por uma combinação de cargas.
- As quatro equações fundamentais que descrevem integralmente a eletricidade e o magnetismo.

Uma usina produz energia elétrica mediante a conversão de outras formas de energia:

- Energia potencial gravitacional em uma usina hidroelétrica.

Uma usina produz energia elétrica mediante a conversão de outras formas de energia:

- Energia potencial gravitacional em uma usina hidroelétrica.
- Energia química em uma usina termoelétrica.

Uma usina produz energia elétrica mediante a conversão de outras formas de energia:

- Energia potencial gravitacional em uma usina hidroelétrica.
- Energia química em uma usina termoelétrica.
- Energia nuclear em uma usina nuclear.

Uma usina produz energia elétrica mediante a conversão de outras formas de energia:

- Energia potencial gravitacional em uma usina hidroelétrica.
- Energia química em uma usina termoelétrica.
- Energia nuclear em uma usina nuclear.
- **Como ocorre essa conversão de energia?**

Uma usina produz energia elétrica mediante a conversão de outras formas de energia:

- Energia potencial gravitacional em uma usina hidroelétrica.
- Energia química em uma usina termoelétrica.
- Energia nuclear em uma usina nuclear.
- **Como ocorre essa conversão de energia?**
- **Qual é a física envolvida na produção de quase toda energia que consumimos?**

Uma usina produz energia elétrica mediante a conversão de outras formas de energia:

- Energia potencial gravitacional em uma usina hidroelétrica.
- Energia química em uma usina termoelétrica.
- Energia nuclear em uma usina nuclear.
- **Como ocorre essa conversão de energia?**
- **Qual é a física envolvida na produção de quase toda energia que consumimos?**

A resposta é um fenômeno chamado *indução eletromagnética*:

- Quando o fluxo magnético varia através de um circuito, ocorre a indução de uma fem e de uma corrente no circuito.

Uma usina produz energia elétrica mediante a conversão de outras formas de energia:

- Energia potencial gravitacional em uma usina hidroelétrica.
- Energia química em uma usina termoelétrica.
- Energia nuclear em uma usina nuclear.
- **Como ocorre essa conversão de energia?**
- **Qual é a física envolvida na produção de quase toda energia que consumimos?**

A resposta é um fenômeno chamado *indução eletromagnética*:

- Quando o fluxo magnético varia através de um circuito, ocorre a indução de uma fem e de uma corrente no circuito.
- Um campo magnético que varia em função do tempo pode atuar como uma fonte de campo elétrico $[\vec{B}(t) \rightarrow \vec{E}(t)]$.

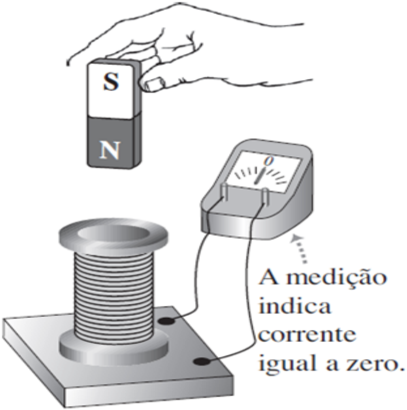
Uma usina produz energia elétrica mediante a conversão de outras formas de energia:

- Energia potencial gravitacional em uma usina hidroelétrica.
- Energia química em uma usina termoelétrica.
- Energia nuclear em uma usina nuclear.
- **Como ocorre essa conversão de energia?**
- **Qual é a física envolvida na produção de quase toda energia que consumimos?**

A resposta é um fenômeno chamado *indução eletromagnética*:

- Quando o fluxo magnético varia através de um circuito, ocorre a indução de uma fem e de uma corrente no circuito.
- Um campo magnético que varia em função do tempo pode atuar como uma fonte de campo elétrico [$\vec{B}(t) \rightarrow \vec{E}(t)$].
- Um campo elétrico que varia em função do tempo pode atuar como uma fonte de campo magnético [$\vec{E}(t) \rightarrow \vec{B}(t)$].
- Ou seja, $\vec{B}(t) \rightleftarrows \vec{E}(t)$.

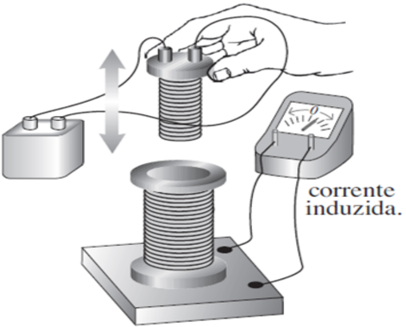
- Um ímã em repouso **não induz** corrente no galvanômetro.



- Um ímã em repouso **não induz** corrente no galvanômetro.
- Um ímã em movimento **induz** corrente no galvanômetro.

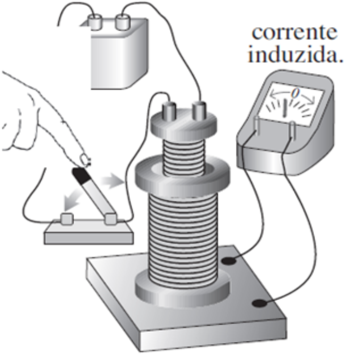
- Um ímã em repouso **não induz** corrente no galvanômetro.
- Um ímã em movimento **induz** corrente no galvanômetro.
- Uma segunda bobina que transporta corrente em movimento **induz** corrente no galvanômetro.

Aproximando ou afastando da primeira bobina uma segunda bobina que transporta corrente

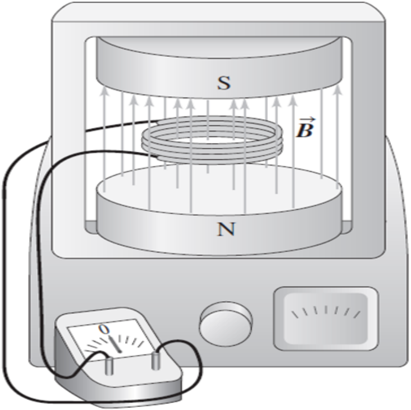


- Um ímã em repouso **não induz** corrente no galvanômetro.
- Um ímã em movimento **induz** corrente no galvanômetro.
- Uma segunda bobina que transporta corrente em movimento **induz** corrente no galvanômetro.
- Variando a corrente na segunda bobina **induz** corrente no galvanômetro.

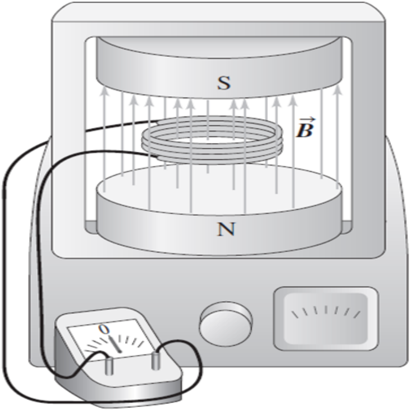
Variando a corrente na segunda bobina (ao fechar ou abrir uma chave).



- Um ímã em repouso **não induz** corrente no galvanômetro.
- Um ímã em movimento **induz** corrente no galvanômetro.
- Uma segunda bobina que transporta corrente em movimento **induz** corrente no galvanômetro.
- Variando a corrente na segunda bobina **induz** corrente no galvanômetro.
- Se $\vec{B} = 0$ ou $\vec{B} = Constante$, **não induz** corrente no galvanômetro.

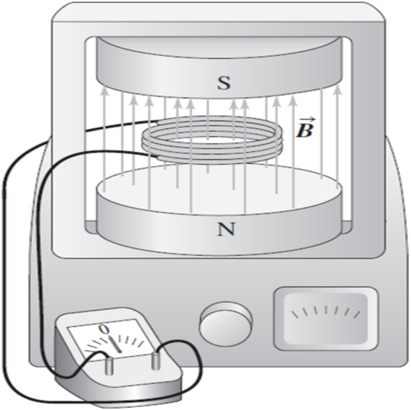


- Um ímã em repouso **não induz** corrente no galvanômetro.
- Um ímã em movimento **induz** corrente no galvanômetro.
- Uma segunda bobina que transporta corrente em movimento **induz** corrente no galvanômetro.
- Variando a corrente na segunda bobina **induz** corrente no galvanômetro.
- Se $\vec{B} = 0$ ou $\vec{B} = Constante$, **não induz** corrente no galvanômetro.
- Se $d\vec{B} \neq 0$, **induz** corrente no galvanômetro.



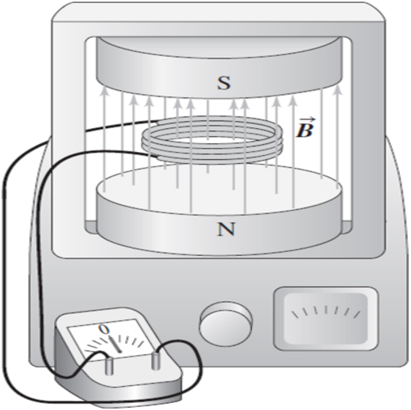
- Um ímã em repouso **não induz** corrente no galvanômetro.
- Um ímã em movimento **induz** corrente no galvanômetro.
- Uma segunda bobina que transporta corrente em movimento **induz** corrente no galvanômetro.
- Variando a corrente na segunda bobina **induz** corrente no galvanômetro.
- Se $\vec{B} = 0$ ou $\vec{B} = Constante$, **não induz** corrente no galvanômetro.
- Se $d\vec{B} \neq 0$, **induz** corrente no galvanômetro.
- Se mudamos a área da bobina, $\Delta A \neq 0$,

  induz corrente no galvanômetro.



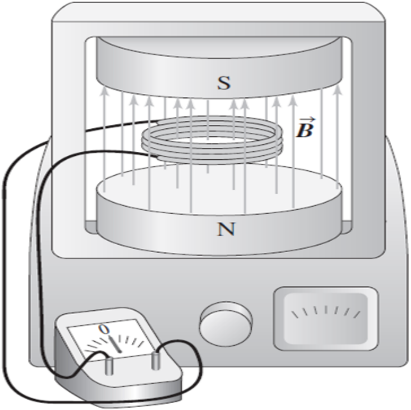
- Um ímã em repouso **não induz** corrente no galvanômetro.
- Um ímã em movimento **induz** corrente no galvanômetro.
- Uma segunda bobina que transporta corrente em movimento **induz** corrente no galvanômetro.
- Variando a corrente na segunda bobina **induz** corrente no galvanômetro.
- Se $\vec{B} = 0$ ou $\vec{B} = Constante$, **não induz** corrente no galvanômetro.
- Se $d\vec{B} \neq 0$, **induz** corrente no galvanômetro.
- Se mudamos a área da bobina, $\Delta A \neq 0$,

  induz corrente no galvanômetro.



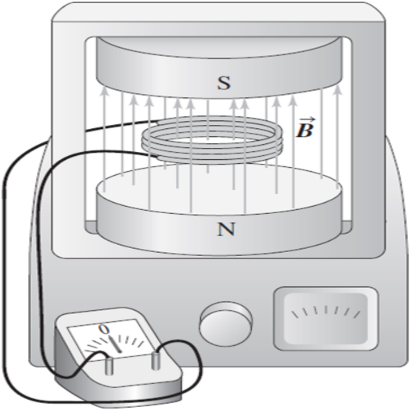
- Se giramos a bobina, **induz** corrente no galvanômetro.

- Um ímã em repouso **não induz** corrente no galvanômetro.
- Um ímã em movimento **induz** corrente no galvanômetro.
- Uma segunda bobina que transporta corrente em movimento **induz** corrente no galvanômetro.
- Variando a corrente na segunda bobina **induz** corrente no galvanômetro.
- Se $\vec{B} = 0$ ou $\vec{B} = Constante$, **não induz** corrente no galvanômetro.
- Se $d\vec{B} \neq 0$, **induz** corrente no galvanômetro.
- Se mudamos a área da bobina, $\Delta A \neq 0$, **induz** corrente no galvanômetro.



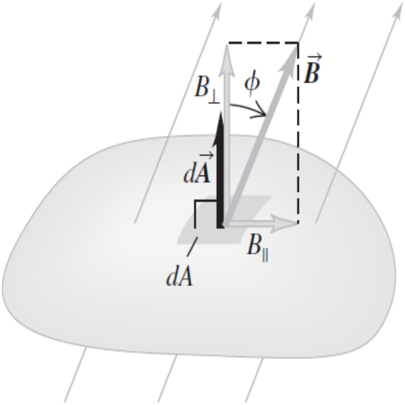
- Se giramos a bobina, **induz** corrente no galvanômetro.
- Se mudamos o numero N de espiras, **induz** corrente no galvanômetro.

- Um ímã em repouso **não induz** corrente no galvanômetro.
- Um ímã em movimento **induz** corrente no galvanômetro.
- Uma segunda bobina que transporta corrente em movimento **induz** corrente no galvanômetro.
- Variando a corrente na segunda bobina **induz** corrente no galvanômetro.
- Se $\vec{B} = 0$ ou $\vec{B} = Constante$, **não induz** corrente no galvanômetro.
- Se $d\vec{B} \neq 0$, **induz** corrente no galvanômetro.
- Se mudamos a área da bobina, $\Delta A \neq 0$, **induz** corrente no galvanômetro.

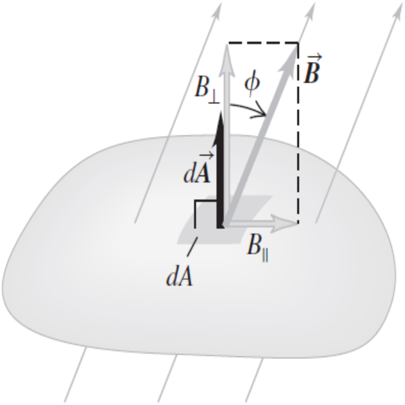


- Se giramos a bobina, **induz** corrente no galvanômetro.
- Se mudamos o numero N de espiras, **induz** corrente no galvanômetro.
- Quanto mais rápido fazemos os experimentos acima, maior é a **indução** de corrente no galvanômetro.

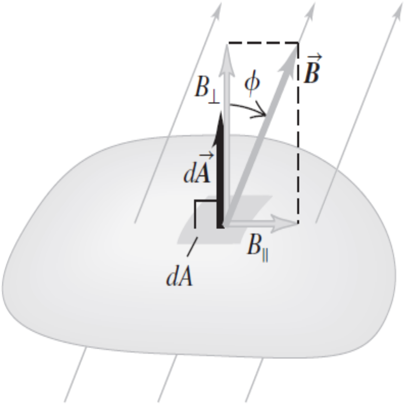
- O fenômeno comum em todos os efeitos de indução é a variação do fluxo magnético através de um circuito.



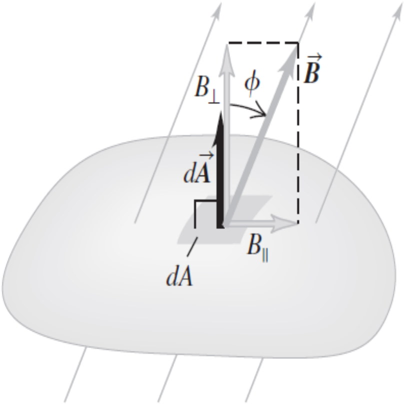
- O fenômeno comum em todos os efeitos de indução é a variação do fluxo magnético através de um circuito.
- Para um elemento de área infinitesimal $d\vec{A}$ em um campo magnético $\vec{B}$, o elemento de fluxo magnético é dado por:



- O fenômeno comum em todos os efeitos de indução é a variação do fluxo magnético através de um circuito.
- Para um elemento de área infinitesimal $d\vec{A}$ em um campo magnético $\vec{B}$, o elemento de fluxo magnético é dado por:
- $d\Phi_B = \vec{B} \cdot d\vec{A} = B_{\perp} dA = BdA \cos\phi$

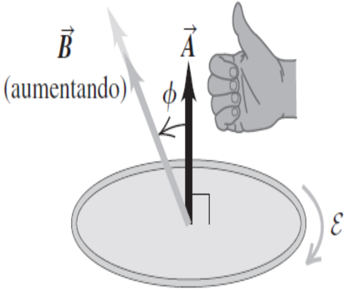


- O fenômeno comum em todos os efeitos de indução é a variação do fluxo magnético através de um circuito.
- Para um elemento de área infinitesimal $d\vec{A}$ em um campo magnético $\vec{B}$, o elemento de fluxo magnético é dado por:
- $d\Phi_B = \vec{B} \cdot d\vec{A} = B_\perp dA = BdA\cos\phi$
- O fluxo total em uma determinada área é dada por, $\Phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{A} = \int BdA\cos\phi$.



- O fenômeno comum em todos os efeitos de indução é a variação do fluxo magnético através de um circuito.
- Para um elemento de área infinitesimal $d\vec{A}$ em um campo magnético $\vec{B}$, o elemento de fluxo magnético é dado por:
- $d\Phi_B = \vec{B} \cdot d\vec{A} = B_{\perp} dA = BdA \cos\phi$
- O fluxo total em uma determinada área é dada por, $\Phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{A} = \int BdA \cos\phi$.
- **A fem induzida em uma espira fechada é dada pela taxa de variação do fluxo magnético, com o sinal negativo, através da área delimitada pela espira.**

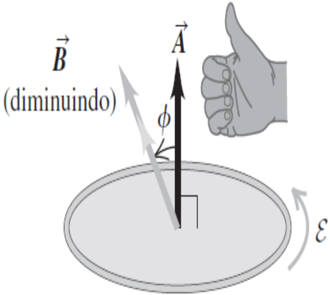
$$\varepsilon = -N\frac{d\Phi_B}{dt}$$



- Fluxo positivo ($\Phi_B > 0$) ...
- ... e tornando-se mais positivo ($d\Phi_B/dt > 0$).
- Fem induzida negativa ($\mathcal{E} < 0$).

- O fenômeno comum em todos os efeitos de indução é a variação do fluxo magnético através de um circuito.
- Para um elemento de área infinitesimal $d\vec{A}$ em um campo magnético $\vec{B}$, o elemento de fluxo magnético é dado por:
- $d\Phi_B = \vec{B} \cdot d\vec{A} = B_{\perp} dA = BdA \cos\phi$
- O fluxo total em uma determinada área é dada por, $\Phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{A} = \int BdA \cos\phi$.
- **A fem induzida em uma espira fechada é dada pela taxa de variação do fluxo magnético, com o sinal negativo, através da área delimitada pela espira.**

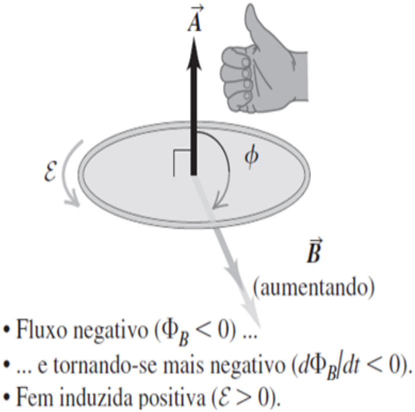
$$\varepsilon = -N\frac{d\Phi_B}{dt}$$



- Fluxo positivo ($\Phi_B > 0$) ...
- ... e tornando-se menos positivo ($d\Phi_B/dt < 0$).
- Fem induzida positiva ($\mathcal{E} > 0$).

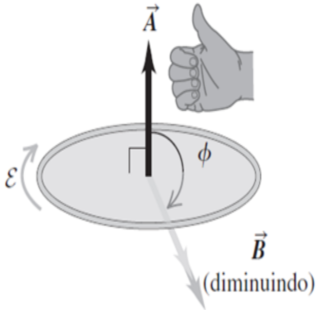
- O fenômeno comum em todos os efeitos de indução é a variação do fluxo magnético através de um circuito.
- Para um elemento de área infinitesimal $d\vec{A}$ em um campo magnético $\vec{B}$, o elemento de fluxo magnético é dado por:
- $d\Phi_B = \vec{B} \cdot d\vec{A} = B_{\perp} dA = BdA \cos\phi$
- O fluxo total em uma determinada área é dada por, $\Phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{A} = \int BdA \cos\phi$.
- **A fem induzida em uma espira fechada é dada pela taxa de variação do fluxo magnético, com o sinal negativo, através da área delimitada pela espira.**

$$\varepsilon = -N\frac{d\Phi_B}{dt}$$



- O fenômeno comum em todos os efeitos de indução é a variação do fluxo magnético através de um circuito.
- Para um elemento de área infinitesimal $d\vec{A}$ em um campo magnético $\vec{B}$, o elemento de fluxo magnético é dado por:
- $d\Phi_B = \vec{B} \cdot d\vec{A} = B_{\perp} dA = BdA\cos\phi$
- O fluxo total em uma determinada área é dada por, $\Phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{A} = \int BdA\cos\phi$.
- **A fem induzida em uma espira fechada é dada pela taxa de variação do fluxo magnético, com o sinal negativo, através da área delimitada pela espira.**

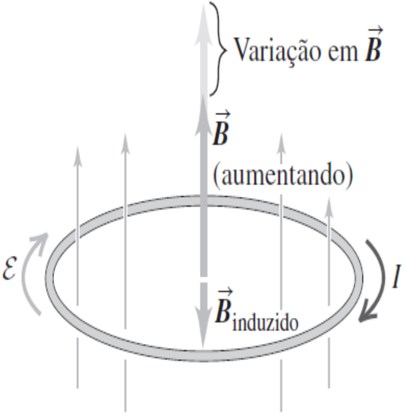
$$\varepsilon = -N\frac{d\Phi_B}{dt}$$



- Fluxo negativo ($\Phi_B < 0$) ...
- ... e tornando-se menos negativo ($d\Phi_B/dt > 0$).
- Fem induzida negativa ($\mathcal{E} < 0$).

Lei de Lenz

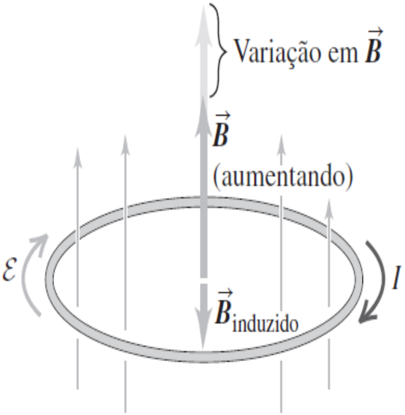
O Sentido de qualquer efeito de indução magnética é tal que ele se opõe à causa que produz o efeito.



Lei de Lenz

O Sentido de qualquer efeito de indução magnética é tal que ele se opõe à causa que produz o efeito.

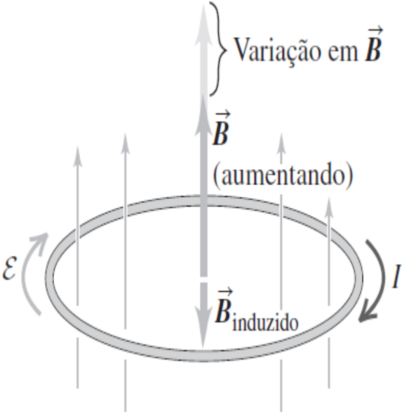
- Quando o fluxo magnético varia em um circuito em repouso, a propria corrente induzida produz um campo magnético.



Lei de Lenz

O Sentido de qualquer efeito de indução magnética é tal que ele se opõe à causa que produz o efeito.

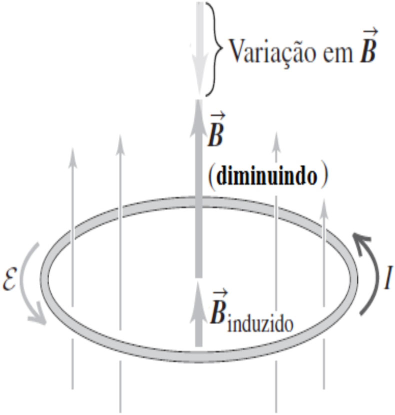
- Quando o fluxo magnético varia em um circuito em repouso, a propria corrente induzida produz um campo magnético.
- No interior da área limitada pelo circuito, esse campo é oposto ao campo original quando ele estiver crescendo.



Lei de Lenz

O Sentido de qualquer efeito de indução magnética é tal que ele se opõe à causa que produz o efeito.

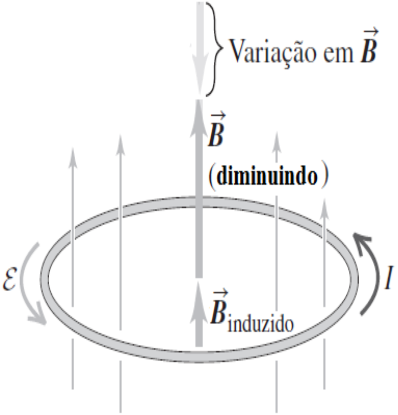
- Quando o fluxo magnético varia em um circuito em repouso, a propria corrente induzida produz um campo magnético.
- No interior da área limitada pelo circuito, esse campo é oposto ao campo original quando ele estiver crescendo.
- No interior da área limitada pelo circuito, esse campo possui o mesmo sentido do campo original quando ele estiver diminuindo.



Lei de Lenz

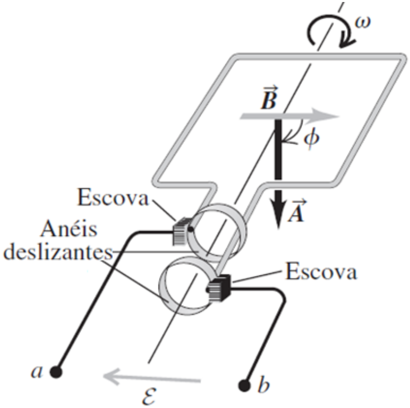
O Sentido de qualquer efeito de indução magnética é tal que ele se opõe à causa que produz o efeito.

- Quando o fluxo magnético varia em um circuito em repouso, a propria corrente induzida produz um campo magnético.
- No interior da área limitada pelo circuito, esse campo é oposto ao campo original quando ele estiver crescendo.
- No interior da área limitada pelo circuito, esse campo possui o mesmo sentido do campo original quando ele estiver diminuindo.
- A corrente induzida se opõe à variação do fluxo magnético através do circuito (e não ao proprio fluxo).



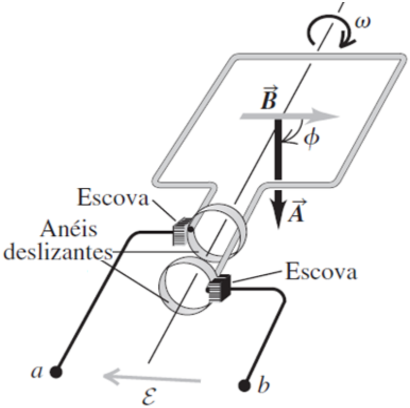
Gerador 1: Um alternador Simples

- Uma versão simples de um alternador é uma bobina quadrada que gira com velocidade angular ω.



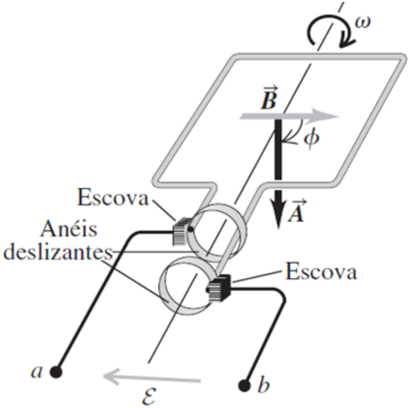
Gerador 1: Um alternador Simples

- Uma versão simples de um alternador é uma bobina quadrada que gira com velocidade angular ω.
- No instante $t = 0$, $\phi = 0$ e $\vec{B}$ é uniforme e constante.



Gerador 1: Um alternador Simples

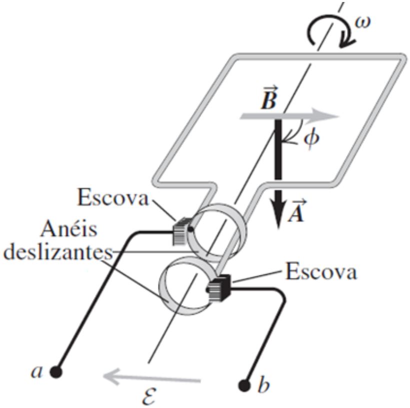
- Uma versão simples de um alternador é uma bobina quadrada que gira com velocidade angular ω.
- No instante $t = 0$, $\phi = 0$ e $\vec{B}$ é uniforme e constante.
- Calcule a fem induzida.



Gerador 1: Um alternador Simples

- Uma versão simples de um alternador é uma bobina quadrada que gira com velocidade angular ω.
- No instante $t = 0$, $\phi = 0$ e $\vec{B}$ é uniforme e constante.
- Calcule a fem induzida.

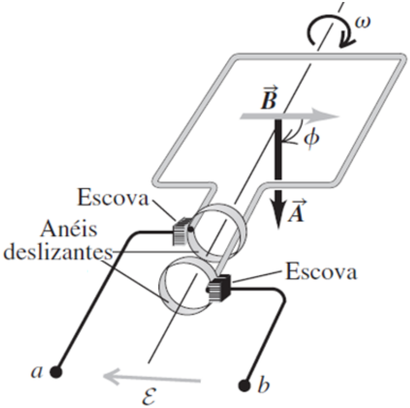
$$\Phi_B = BA\cos(\phi) = BA\cos(\omega t)$$



Gerador 1: Um alternador Simples

- Uma versão simples de um alternador é uma bobina quadrada que gira com velocidade angular ω.
- No instante $t = 0$, $\phi = 0$ e $\vec{B}$ é uniforme e constante.
- Calcule a fem induzida.

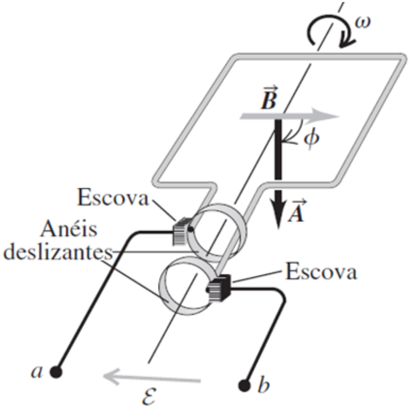
$$\Phi_B = BA\cos(\phi) = BA\cos(\omega t)$$
$$\frac{d\Phi_B}{dt} = -BA\omega\sin(\omega t)$$



Gerador 1: Um alternador Simples

- Uma versão simples de um alternador é uma bobina quadrada que gira com velocidade angular ω.
- No instante $t = 0$, $\phi = 0$ e $\vec{B}$ é uniforme e constante.
- Calcule a fem induzida.

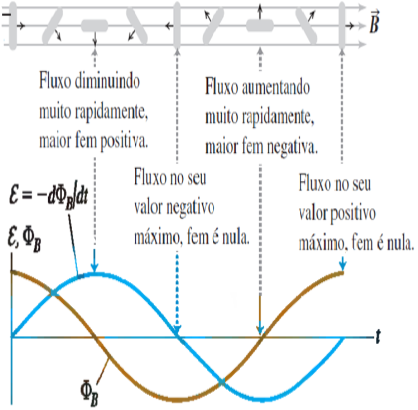
$$\begin{aligned} \Phi_B &= BA\cos(\phi) = BA\cos(\omega t) \\ \frac{d\Phi_B}{dt} &= -BA\omega\sin(\omega t) \\ \varepsilon &= -N\frac{d\Phi_B}{dt} \end{aligned}$$



Gerador 1: Um alternador Simples

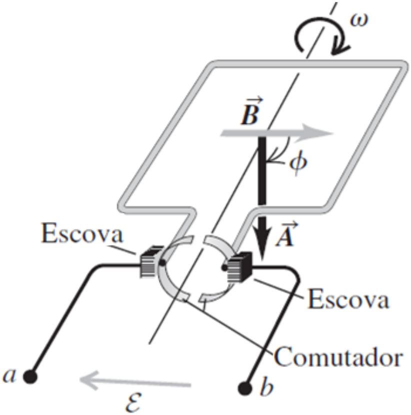
- Uma versão simples de um alternador é uma bobina quadrada que gira com velocidade angular ω.
- No instante $t = 0$, $\phi = 0$ e $\vec{B}$ é uniforme e constante.
- Calcule a fem induzida.

$$\begin{aligned} \Phi_B &= BA\cos(\phi) = BA\cos(\omega t) \\ \frac{d\Phi_B}{dt} &= -BA\omega\sin(\omega t) \\ \varepsilon &= -N\frac{d\Phi_B}{dt} \\ \varepsilon &= NBA\omega\sin(\omega t) \end{aligned}$$



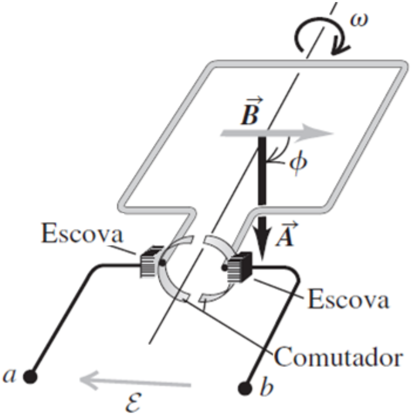
Gerador 2: Um gerador CC e fem de um motor

- Usando um esquema semelhante ao alternador construiremos um gerador de corrente continua(CC) com fem sempre com o mesmo sinal.



Gerador 2: Um gerador CC e fem de um motor

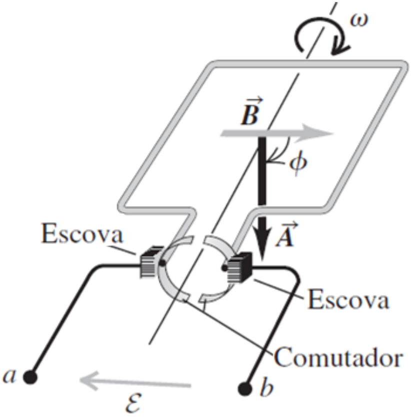
- Usando um esquema semelhante ao alternador construiremos um gerador de corrente continua(CC) com fem sempre com o mesmo sinal.
- Da figura, a fem induzida será,



Gerador 2: Um gerador CC e fem de um motor

- Usando um esquema semelhante ao alternador construiremos um gerador de corrente continua(CC) com fem sempre com o mesmo sinal.
- Da figura, a fem induzida será,

$$|\varepsilon| \quad = \quad NBA\omega|\sin(\omega t)|$$

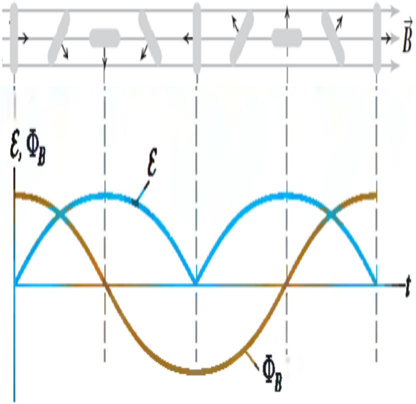


Gerador 2: Um gerador CC e fem de um motor

- Usando um esquema semelhante ao alternador construiremos um gerador de corrente continua(CC) com fem sempre com o mesmo sinal.
- Da figura, a fem induzida será,

$$|\varepsilon| = NBA\omega|\sin(\omega t)|$$

- A fem induzida média é encontrada substituindo $|\sin(\omega t)|$ por seu valor médio.



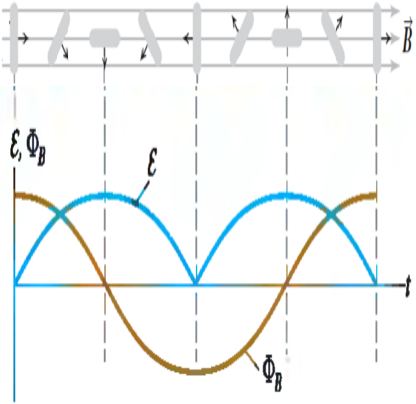
Gerador 2: Um gerador CC e fem de um motor

- Usando um esquema semelhante ao alternador construiremos um gerador de corrente continua(CC) com fem sempre com o mesmo sinal.
- Da figura, a fem induzida será,

$$|\varepsilon| = NBA\omega|\sin(\omega t)|$$

- A fem induzida média é encontrada substituindo $|\sin(\omega t)|$ por seu valor médio.

$$(|\sin(\omega t)|)_{med} = \frac{1}{T/2}\int_0^{T/2} \sin(\omega t)dt$$



Gerador 2: Um gerador CC e fem de um motor

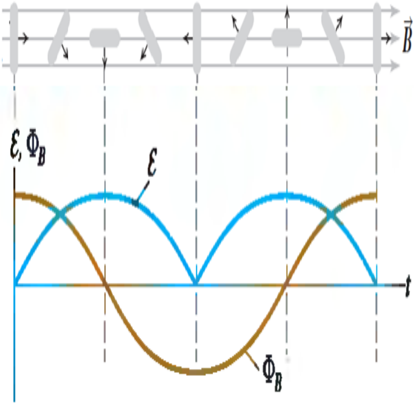
- Usando um esquema semelhante ao alternador construiremos um gerador de corrente continua(CC) com fem sempre com o mesmo sinal.
- Da figura, a fem induzida será,

$$|\varepsilon| = NBA\omega|\sin(\omega t)|$$

- A fem induzida média é encontrada substituindo $|\sin(\omega t)|$ por seu valor médio.

$$(|\sin(\omega t)|)_{med} = \frac{1}{T/2}\int_0^{T/2} \sin(\omega t)dt$$

$$(|\sin(\omega t)|)_{med} = \frac{1}{\pi/\omega}\int_0^{\pi/\omega} \sin(\omega t)dt = \frac{2}{\pi}$$



Gerador 2: Um gerador CC e fem de um motor

- Usando um esquema semelhante ao alternador construiremos um gerador de corrente continua(CC) com fem sempre com o mesmo sinal.
- Da figura, a fem induzida será,

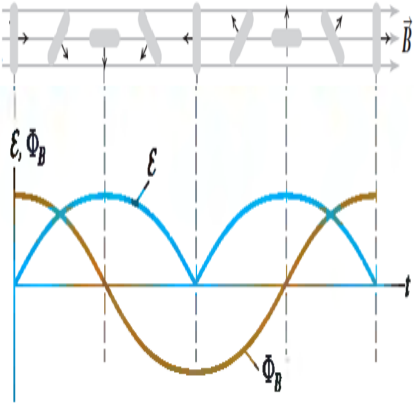
$$|\varepsilon| = NBA\omega|\sin(\omega t)|$$

- A fem induzida média é encontrada substituindo $|\sin(\omega t)|$ por seu valor médio.

$$(|\sin(\omega t)|)_{med} = \frac{1}{T/2}\int_0^{T/2} \sin(\omega t)dt$$

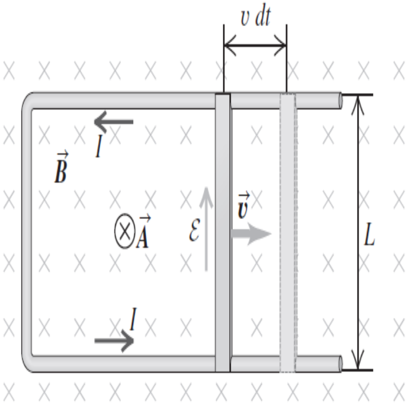
$$(|\sin(\omega t)|)_{med} = \frac{1}{\pi/\omega}\int_0^{\pi/\omega} \sin(\omega t)dt = \frac{2}{\pi}$$

$$\varepsilon_{med} = \frac{2NBA\omega}{\pi} \quad ou \quad \omega = \frac{\pi\varepsilon_{med}}{2NBA}$$



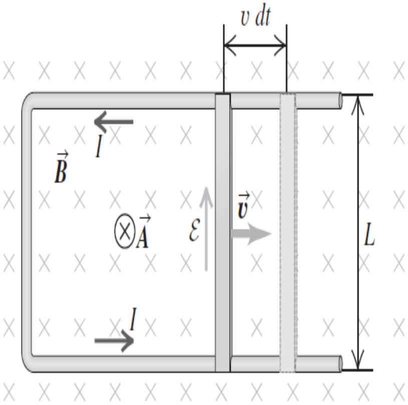
Gerador 3: Um gerador com haste deslizante

- Uma condutor em forma de U está imerso em $\vec{B}$ que é uniforme e constante.



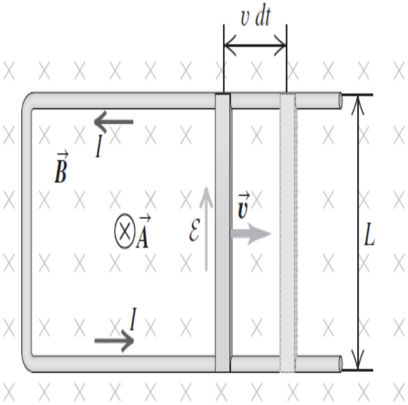
Gerador 3: Um gerador com haste deslizante

- Uma condutor em forma de U está imerso em $\vec{B}$ que é uniforme e constante.
- Uma haste de tamanho L é puxada com $\vec{v}$.



Gerador 3: Um gerador com haste deslizante

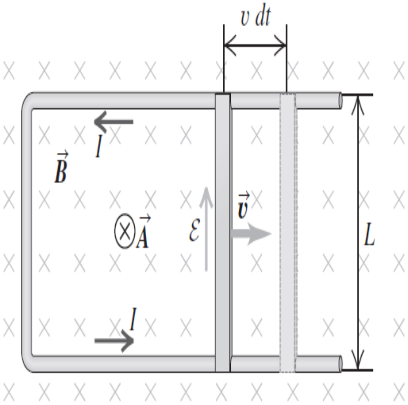
- Uma condutor em forma de U está imerso em $\vec{B}$ que é uniforme e constante.
- Uma haste de tamanho L é puxada com $\vec{v}$.
- Calcule a fem induzida.



Gerador 3: Um gerador com haste deslizante

- Uma condutor em forma de U está imerso em $\vec{B}$ que é uniforme e constante.
- Uma haste de tamanho L é puxada com $\vec{v}$.
- Calcule a fem induzida.

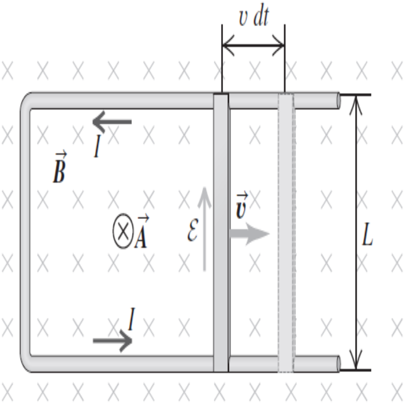
$$d\Phi_B \quad = \quad BdA = B\mathrm{L}vdt$$



Gerador 3: Um gerador com haste deslizante

- Uma condutor em forma de U está imerso em $\vec{B}$ que é uniforme e constante.
- Uma haste de tamanho $\mathtt{L}$ é puxada com $\vec{v}$.
- Calcule a fem induzida.

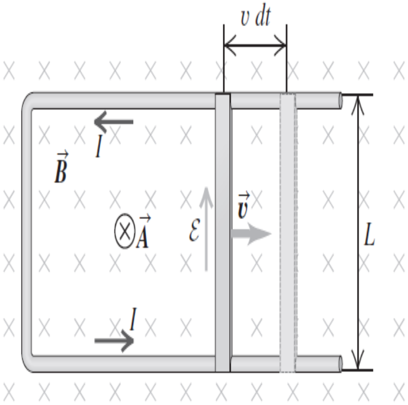
$$\begin{aligned} d\Phi_B &= BdA = B\mathrm{L}vdt \\ \frac{d\Phi_B}{dt} &= B\mathrm{L}v \end{aligned}$$



Gerador 3: Um gerador com haste deslizante

- Uma condutor em forma de U está imerso em $\vec{B}$ que é uniforme e constante.
- Uma haste de tamanho L é puxada com $\vec{v}$.
- Calcule a fem induzida.

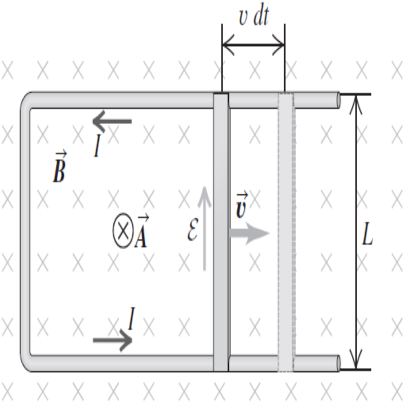
$$
\begin{aligned}
d\Phi_B &= BdA = B\mathrm{L}vdt \\
\frac{d\Phi_B}{dt} &= B\mathrm{L}v \\
\varepsilon &= -N\frac{d\Phi_B}{dt} = -B\mathrm{L}v
\end{aligned}
$$



Gerador 3: Um gerador com haste deslizante

- Uma condutor em forma de U está imerso em $\vec{B}$ que é uniforme e constante.
- Uma haste de tamanho L é puxada com $\vec{v}$.
- Calcule a fem induzida.

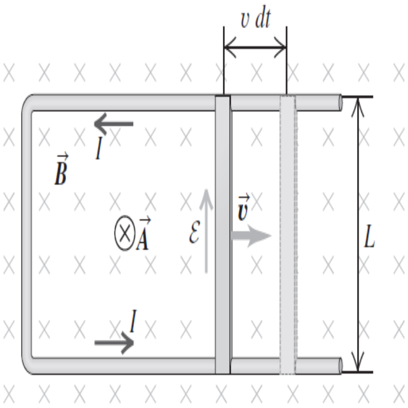
$$\begin{aligned} d\Phi_B &= BdA = B\mathtt{L}vdt \\ \frac{d\Phi_B}{dt} &= B\mathtt{L}v \\ \varepsilon &= -N\frac{d\Phi_B}{dt} = -B\mathtt{L}v \\ \mathtt{I} &= \frac{|\varepsilon|}{R} = \frac{B\mathtt{L}v}{R} \end{aligned}$$



Gerador 3: Um gerador com haste deslizante

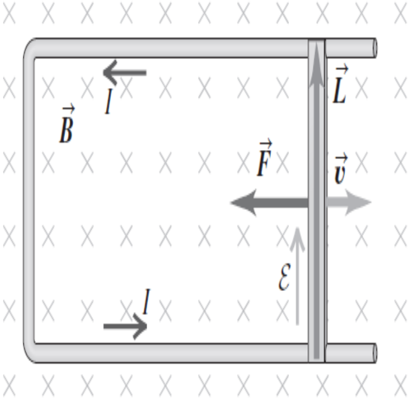
- Uma condutor em forma de U está imerso em $\vec{B}$ que é uniforme e constante.
- Uma haste de tamanho $\mathtt{L}$ é puxada com $\vec{v}$.
- Calcule a fem induzida.

$$\begin{aligned}
d\Phi_B &= BdA = B\mathtt{L}vdt \\
\frac{d\Phi_B}{dt} &= B\mathtt{L}v \\
\varepsilon &= -N\frac{d\Phi_B}{dt} = -B\mathtt{L}v \\
\mathtt{I} &= \frac{|\varepsilon|}{R} = \frac{B\mathtt{L}v}{R} \\
Pot_{diss} &= \mathtt{I}^2 R = \frac{B^2\mathtt{L}^2v^2}{R}
\end{aligned}$$



Gerador 3: Um gerador com haste deslizante

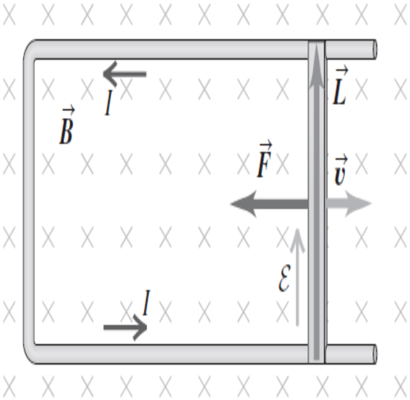
- Uma condutor em forma de U está imerso em $\vec{B}$ que é uniforme e constante.
- Uma haste de tamanho L é puxada com $\vec{v}$.
- Calcule a fem induzida.



$$
\begin{aligned}
d\Phi_B &= BdA = B\mathrm{L}vdt \\
\frac{d\Phi_B}{dt} &= B\mathrm{L}v \\
\varepsilon &= -N\frac{d\Phi_B}{dt} = -B\mathrm{L}v \\
\mathrm{I} &= \frac{|\varepsilon|}{R} = \frac{B\mathrm{L}v}{R} \\
Pot_{diss} &= \mathrm{I}^2R = \frac{B^2\mathrm{L}^2v^2}{R} \\
\vec{F} &= \mathrm{I}\vec{\mathrm{L}} \times \vec{B} \Rightarrow F = \mathrm{ILB}
\end{aligned}
$$

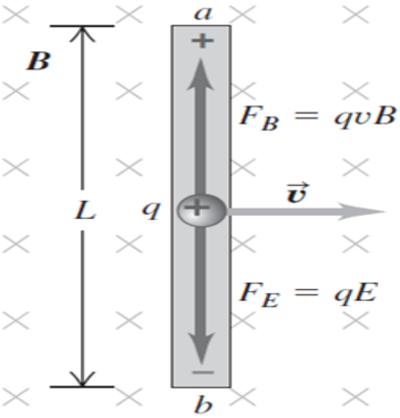
Gerador 3: Um gerador com haste deslizante

- Uma condutor em forma de U está imerso em $\vec{B}$ que é uniforme e constante.
- Uma haste de tamanho $\mathtt{L}$ é puxada com $\vec{v}$.
- Calcule a fem induzida.

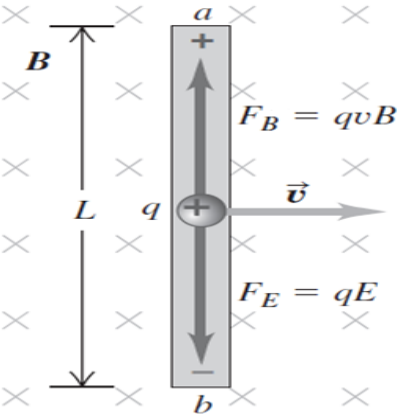


$$\begin{aligned}
d\Phi_B &= BdA = B\mathtt{L}vdt \\
\frac{d\Phi_B}{dt} &= B\mathtt{L}v \\
\varepsilon &= -N\frac{d\Phi_B}{dt} = -B\mathtt{L}v \\
\mathtt{I} &= \frac{|\varepsilon|}{R} = \frac{B\mathtt{L}v}{R} \\
Pot_{diss} &= \mathtt{I}^2 R = \frac{B^2\mathtt{L}^2v^2}{R} \\
\vec{F} &= \mathtt{I}\vec{\mathtt{L}} \times \vec{B} \Rightarrow F = \mathtt{IL}B \\
Pot_{diss} &= Fv = \mathtt{IL}Bv = \frac{B\mathtt{L}v}{R}\mathtt{L}Bv = \frac{B^2\mathtt{L}^2v^2}{R}
\end{aligned}$$

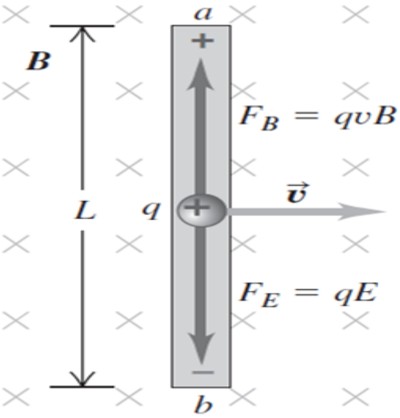
- Quando uma haste se move em um campo magnético as cargas sofrem uma força magnética dada por,
  $\vec{F}_M = q\vec{v} \times \vec{B} \Rightarrow F_M = qvB$.



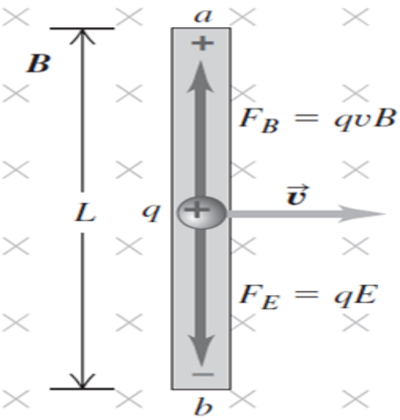
- Quando uma haste se move em um campo magnético as cargas sofrem uma força magnética dada por,
  $\vec{F}_M = q\vec{v} \times \vec{B} \Rightarrow F_M = qvB$.
- Esta força criará uma separação de cargas criado assim uma força elétrica dada por:
  $\vec{F}_E = q\vec{E} \Rightarrow F_E = qE$



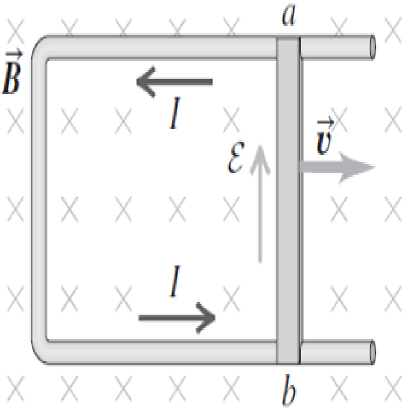
- Quando uma haste se move em um campo magnético as cargas sofrem uma força magnética dada por, $\vec{F}_M = q\vec{v} \times \vec{B} \Rightarrow F_M = qvB$.
- Esta força criará uma separação de cargas criado assim uma força elétrica dada por: $\vec{F}_E = q\vec{E} \Rightarrow F_E = qE$
- No equilíbrio $F_M = F_E$, assim $E = vB$



- Quando uma haste se move em um campo magnético as cargas sofrem uma força magnética dada por,
  $\vec{F}_M = q\vec{v} \times \vec{B} \Rightarrow F_M = qvB$.
- Esta força criará uma separação de cargas criado assim uma força elétrica dada por:
  $\vec{F}_E = q\vec{E} \Rightarrow F_E = qE$
- No equilíbrio $F_M = F_E$, assim $E = vB$
- Para uma haste de tamanho L e puxada com $\vec{v}$, aparece uma diferença de potencial V_{ab} nas extremidades da haste dada por:
  $V_{ab} = EL = vLB$.



- Quando uma haste se move em um campo magnético as cargas sofrem uma força magnética dada por,
  $\vec{F}_M = q\vec{v} \times \vec{B} \Rightarrow F_M = qvB$.
- Esta força criará uma separação de cargas criado assim uma força elétrica dada por:
  $\vec{F}_E = q\vec{E} \Rightarrow F_E = qE$
- No equilíbrio $F_M = F_E$, assim $E = vB$
- Para uma haste de tamanho L e puxada com $\vec{v}$, aparece uma diferença de potencial V_{ab} nas extremidades da haste dada por:
  $V_{ab} = EL = vLB$.
- Quando esta haste for colocada em contato com o metal em forma de U teremos
  $V_{ab} = \varepsilon = vLB = IR$.



Fem do movimento: Forma Generalizada

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

Fem do movimento: Forma Generalizada

$$\begin{aligned} \vec{F} &= q\vec{v} \times \vec{B} \\ dW &= \vec{F} \cdot d\vec{l} \end{aligned}$$

Fem do movimento: Forma Generalizada

$$\begin{aligned} \vec{F} &= q\vec{v} \times \vec{B} \\ dW &= \vec{F} \cdot d\vec{l} \\ dW &= qd\varepsilon \end{aligned}$$

Fem do movimento: Forma Generalizada

$$\begin{aligned}
\vec{F} &= q\vec{v} \times \vec{B} \\
dW &= \vec{F} \cdot d\vec{l} \\
dW &= qd\varepsilon \\
qd\varepsilon &= (q\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l}
\end{aligned}$$

Fem do movimento: Forma Generalizada

$$
\begin{aligned}
\vec{F} &= q\vec{v} \times \vec{B} \\
dW &= \vec{F} \cdot d\vec{l} \\
dW &= q d\varepsilon \\
q d\varepsilon &= (q\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l} \\
d\varepsilon &= (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l}
\end{aligned}
$$

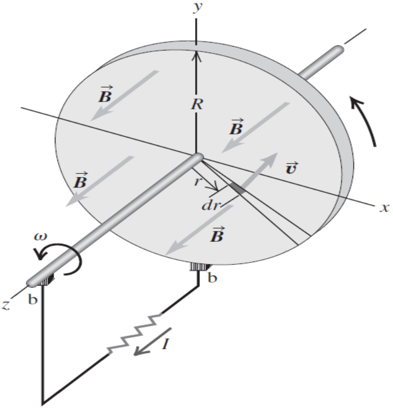
Fem do movimento: Forma Generalizada

$$
\begin{aligned}
\vec{F} &= q\vec{v} \times \vec{B} \\
dW &= \vec{F} \cdot d\vec{l} \\
dW &= qd\varepsilon \\
qd\varepsilon &= (q\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l} \\
d\varepsilon &= (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l} \\
\varepsilon &= \oint (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l}
\end{aligned}
$$

Fem do movimento: Forma Generalizada

$$\begin{aligned}
\vec{F} &= q\vec{v} \times \vec{B} \\
dW &= \vec{F} \cdot d\vec{l} \\
dW &= qd\varepsilon \\
qd\varepsilon &= (q\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l} \\
d\varepsilon &= (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l} \\
\varepsilon &= \oint (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l}
\end{aligned}$$

Considere um disco que gira com velocidade angular ω contante. Calcule a fem.

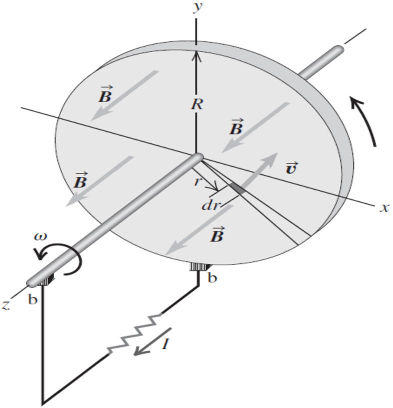


Fem do movimento: Forma Generalizada

$$
\begin{aligned}
\vec{F} &= q\vec{v} \times \vec{B} \\
dW &= \vec{F} \cdot d\vec{l} \\
dW &= q d\varepsilon \\
q d\varepsilon &= (q\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l} \\
d\varepsilon &= (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l} \\
\varepsilon &= \oint (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l}
\end{aligned}
$$

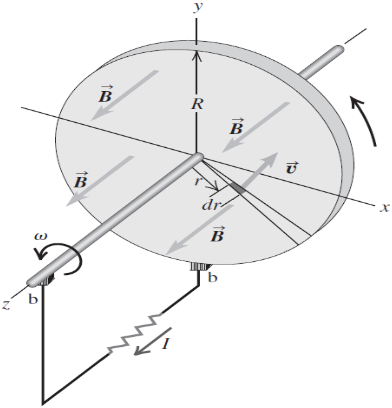
Considere um disco que gira com velocidade angular ω contante. Calcule a fem.

$$
d\varepsilon = (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l} = vB\hat{r} \cdot d\vec{l} = \omega r B dr
$$



Fem do movimento: Forma Generalizada

$$\begin{aligned}
\vec{F} &= q\vec{v} \times \vec{B} \\
dW &= \vec{F} \cdot d\vec{l} \\
dW &= q d\varepsilon \\
q d\varepsilon &= (q\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l} \\
d\varepsilon &= (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l} \\
\varepsilon &= \oint (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l}
\end{aligned}$$

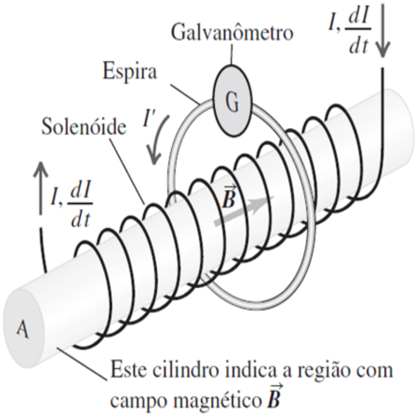


Considere um disco que gira com velocidade angular ω contante. Calcule a fem.

$$\begin{aligned}
d\varepsilon &= (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l} = vB\hat{r} \cdot d\vec{l} = \omega r B dr \\
\varepsilon &= \int_0^R \omega B r dr = \frac{1}{2}\omega B R^2
\end{aligned}$$

O campo $\vec{B}$ gerado por um solenóide com n espiras por unidade de comprimento transportando uma corrente $\mathtt{I}$ é dado por,

$$B = \mu_0 n \mathtt{I}$$

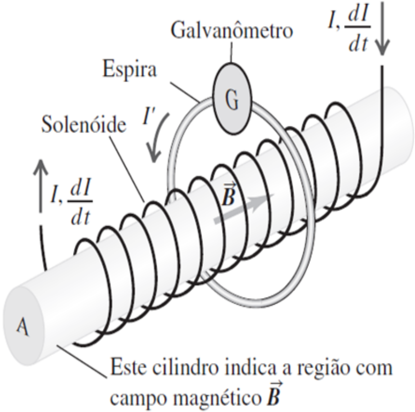


O campo $\vec{B}$ gerado por um solenóide com n espiras por unidade de comprimento transportando uma corrente $\mathtt{I}$ é dado por,

$$B = \mu_0 n \mathtt{I}$$

O fluxo magnético na espira com área $\vec{A}$ tomada na mesma direção e sentido de $\vec{B}$ será,

$$\Phi_B = \vec{B} \cdot \vec{A} = BA = \mu_0 n \mathtt{I} A$$

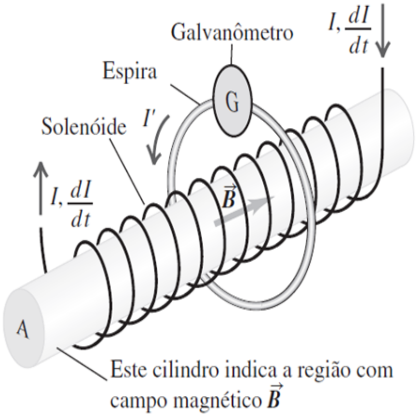


O fluxo magnético na espira com área $\vec{A}$ tomada na mesma direção e sentido de $\vec{B}$ será,

$$\Phi_B = \vec{B} \cdot \vec{A} = BA = \mu_0 n \mathtt{I} A$$

Quando a corrente variar no tempo a fem induzida será,

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi_B}{dt} = -\mu_0 n A \frac{d\mathtt{I}}{dt}$$



O fluxo magnético na espira com área $\vec{A}$ tomada na mesma direção e sentido de $\vec{B}$ será,

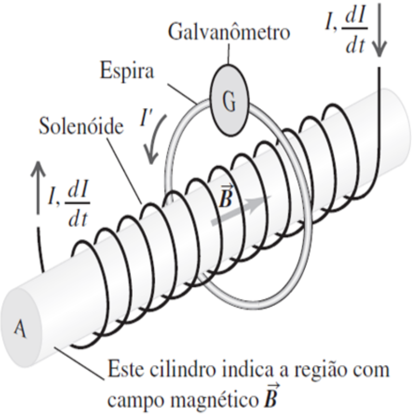
$$\Phi_B = \vec{B} \cdot \vec{A} = BA = \mu_0 n \mathtt{I} A$$

Quando a corrente variar no tempo a fem induzida será,

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi_B}{dt} = -\mu_0 n A \frac{d\mathtt{I}}{dt}$$

Dado a resistência R, da bobina então a corrente induzida $\mathtt{I}'$, será:

$$\mathtt{I}' = \frac{\varepsilon}{R} = -\frac{\mu_0 n A}{R} \frac{d\mathtt{I}}{dt}$$



O fluxo magnético na espira com área $\vec{A}$ tomada na mesma direção e sentido de $\vec{B}$ será,

$$\Phi_B = \vec{B} \cdot \vec{A} = BA = \mu_0 n \mathtt{I} A$$

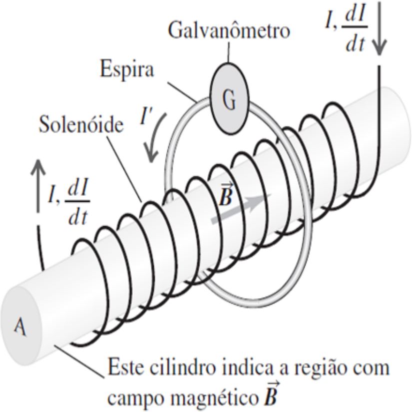
Quando a corrente variar no tempo a fem induzida será,

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi_B}{dt} = -\mu_0 n A \frac{d\mathtt{I}}{dt}$$

Dado a resistência R, da bobina então a corrente induzida $\mathtt{I}'$, será:

$$\mathtt{I}' = \frac{\varepsilon}{R} = -\frac{\mu_0 n A}{R} \frac{d\mathtt{I}}{dt}$$

- **Qual a força que atua sobre as cargas obrigando-as a se mover ao longo do circuito?**



O fluxo magnético na espira com área $\vec{A}$ tomada na mesma direção e sentido de $\vec{B}$ será,

$$\Phi_B = \vec{B}\cdot\vec{A} = BA = \mu_0 n \mathtt{I} A$$

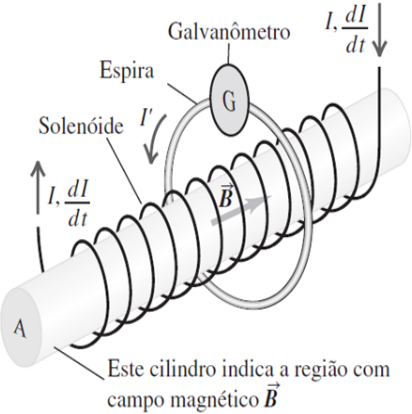
Quando a corrente variar no tempo a fem induzida será,

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi_B}{dt} = -\mu_0 n A\frac{d\mathtt{I}}{dt}$$

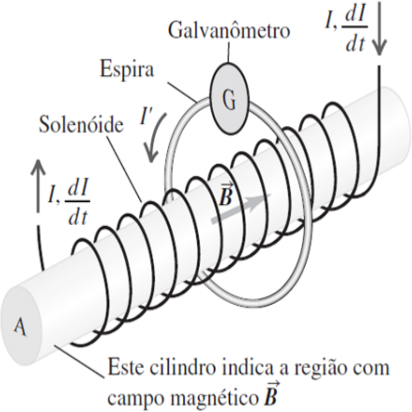
Dado a resistência R, da bobina então a corrente induzida $\mathtt{I}'$, será:

$$\mathtt{I}' = \frac{\varepsilon}{R} = -\frac{\mu_0 n A}{R}\frac{d\mathtt{I}}{dt}$$

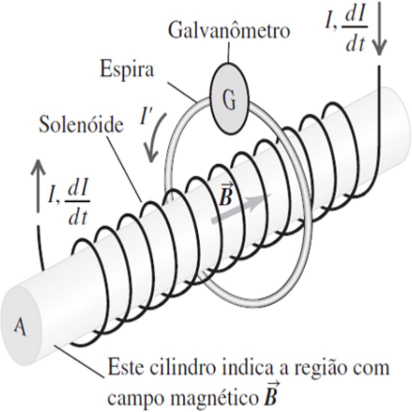
- **Qual a força que atua sobre as cargas obrigando-as a se mover ao longo do circuito?**
- **Somos forçados a concluir que se trata de um campo elétrico induzido no condutor produzido pela variação do fluxo magnético.**



- **Quando uma carga q completa uma volta o $W = q \oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = q\varepsilon$.**



- Quando uma carga q completa uma volta o $W = q \oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = q\varepsilon$.
- Logo o campo elétrico induzido não é conservativo, porque a integral de linha do campo elétrico em um circuito fechada não é igual a zero.



- **Quando uma carga q completa uma volta o $W = q\oint \vec{E}\cdot d\vec{l} = q\varepsilon$.**
- **Logo o campo elétrico induzido não é conservativo, porque a integral de linha do campo elétrico em um circuito fechada não é igual a zero.**
- **No entanto é igual a,**

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

- **Quando uma carga q completa uma volta o $W = q\oint \vec{E}\cdot d\vec{l} = q\varepsilon$.**
- **Logo o campo elétrico induzido não é conservativo, porque a integral de linha do campo elétrico em um circuito fechada não é igual a zero.**
- **No entanto é igual a,**

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

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

- **Quando uma carga q completa uma volta o $W = q\oint \vec{E}\cdot d\vec{l} = q\varepsilon$.**
- **Logo o campo elétrico induzido não é conservativo, porque a integral de linha do campo elétrico em um circuito fechada não é igual a zero.**
- **No entanto é igual a,**

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \oint \vec{E}\cdot d\vec{l} \\ \varepsilon &= -\frac{d\Phi_B}{dt} \\ \oint \vec{E}\cdot d\vec{l} &= -\frac{d\Phi_B}{dt} \end{aligned}$$

Válida somente quando o percurso utilizado na integração permanece constante.

$$
\begin{aligned}
\varepsilon &= \oint \vec{E} \cdot d\vec{l} \\
\varepsilon &= -\frac{d\Phi_B}{dt} \\
\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} &= -\frac{d\Phi_B}{dt}
\end{aligned}
$$

Válida somente quando o percurso utilizado na integração permanece constante.

- **Do teorema de Stokes temos que,**

$$
\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = \int_S (\nabla \times \vec{E}) \cdot d\vec{A}
$$

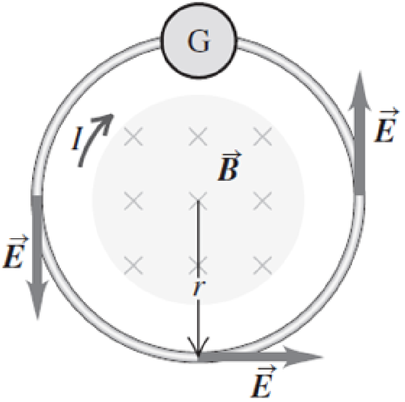
$$\begin{aligned}
\varepsilon &= \oint \vec{E} \cdot d\vec{l} \\
\varepsilon &= -\frac{d\Phi_B}{dt} \\
\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} &= -\frac{d\Phi_B}{dt}
\end{aligned}$$

Válida somente quando o percurso utilizado na integração permanece constante.

- **Do teorema de Stokes temos que,**

$$\begin{aligned}
\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} &= \int_S (\nabla \times \vec{E}) \cdot d\vec{A} \\
-\frac{d\Phi_B}{dt} &= \int_S \left(-\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}\right) \cdot d\vec{A}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\varepsilon &= \oint \vec{E}\cdot d\vec{l}\\ \varepsilon &= -\frac{d\Phi_B}{dt}\\ \oint \vec{E}\cdot d\vec{l} &= -\frac{d\Phi_B}{dt}\end{aligned}$$



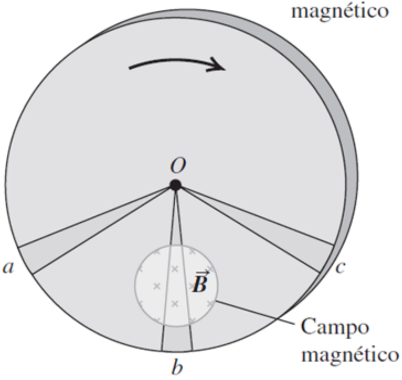
Válida somente quando o percurso utilizado na integração permanece constante.

- **Do teorema de Stokes temos que,**

$$\begin{aligned}\oint \vec{E}\cdot d\vec{l} &= \int_S (\nabla\times\vec{E})\cdot d\vec{A}\\ -\frac{d\Phi_B}{dt} &= \int_S \left(-\frac{\partial\vec{B}}{\partial t}\right)\cdot d\vec{A}\\ \nabla\times\vec{E} &= -\frac{\partial\vec{B}}{\partial t}\end{aligned}$$

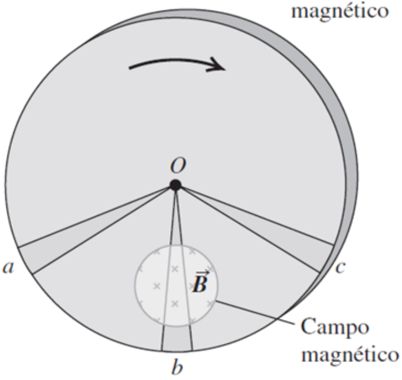
- **O setor *Ob* se desloca através do campo magnético e possui uma fem induzida através dele.**

Um disco metálico girando em um campo magnético

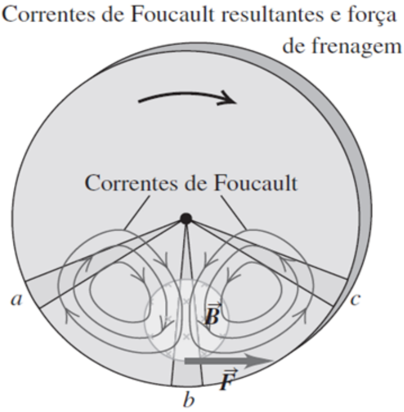


- O setor *Ob* se desloca através do campo magnético e possui uma fem induzida através dele.
- Os setores *Oa* e *Oc* não estão no campo magnético.

Um disco metálico girando em um campo magnético



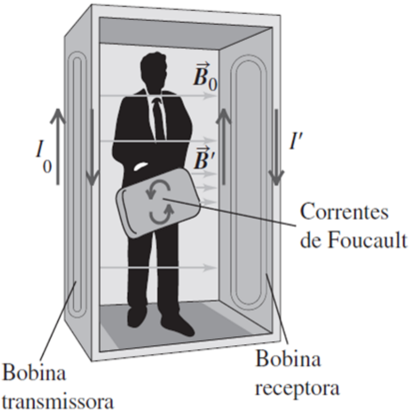
- O setor *Ob* se desloca através do campo magnético e possui uma fem induzida através dele.
- Os setores *Oa* e *Oc* não estão no campo magnético.
- No entanto, permitem um caminho de retorno para as cargas que se deslocaram para *b* retornar para *O*.



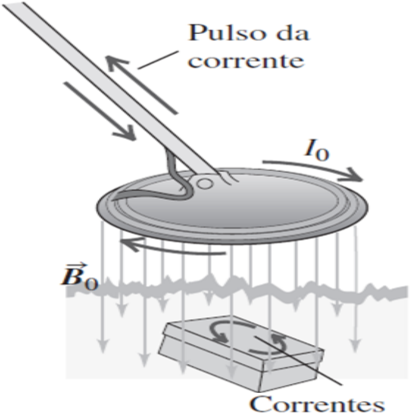
- **O setor Ob se desloca através do campo magnético e possui uma fem induzida através dele.**
- **Os setores Oa e Oc não estão no campo magnético.**
- **No entanto, permitem um caminho de retorno para as cargas que se deslocaram para b retornar para O.**

Exemplo de aplicação:

- Detectores de metais.
- Freios magnéticos.



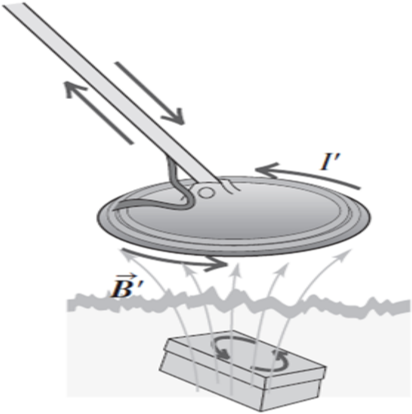
- **O setor *Ob* se desloca através do campo magnético e possui uma fem induzida através dele.**
- **Os setores *Oa* e *Oc* não estão no campo magnético.**
- **No entanto, permitem um caminho de retorno para as cargas que se deslocaram para *b* retornar para *O*.**



Exemplo de aplicação:

- Detectores de metais.
- Freios magnéticos.

- **O setor *Ob* se desloca através do campo magnético e possui uma fem induzida através dele.**
- **Os setores *Oa* e *Oc* não estão no campo magnético.**
- **No entanto, permitem um caminho de retorno para as cargas que se deslocaram para *b* retornar para *O*.**



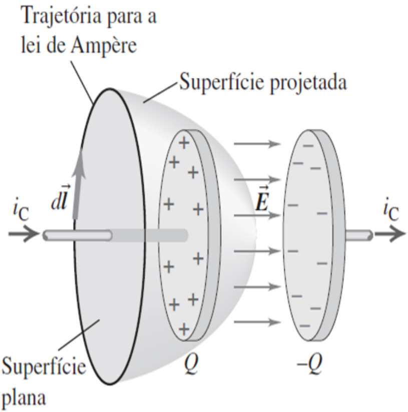
Exemplo de aplicação:

- Detectores de metais.
- Freios magnéticos.

Generalização da Lei de Ampère

- **A lei de Ampere: equação está incompleta!**

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} \quad = \quad \mu_0 \mathrm{I}_{liq}$$

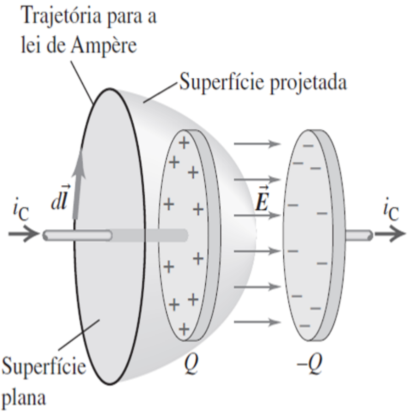


Generalização da Lei de Ampère

- **A lei de Ampere: equação está incompleta!**

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} \quad = \quad \mu_0 \mathrm{I}_{liq}$$

- **Considere o processo de carga de um capacitor.**

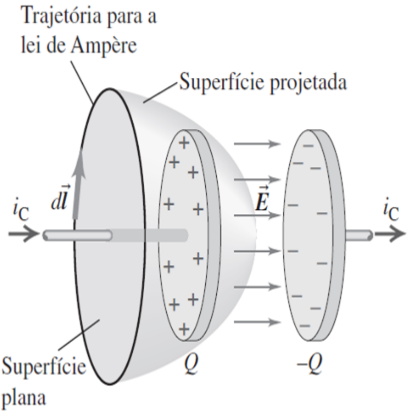


Generalização da Lei de Ampère

- **A lei de Ampere: equação está incompleta!**

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \mathrm{I}_{liq}$$

- **Considere o processo de carga de um capacitor.**
- **Fios conduzem uma corrente de condução i_c de uma placa para outra. A carga Q aumenta e o campo elétrico $\vec{E}$ entre as placas aumenta.**

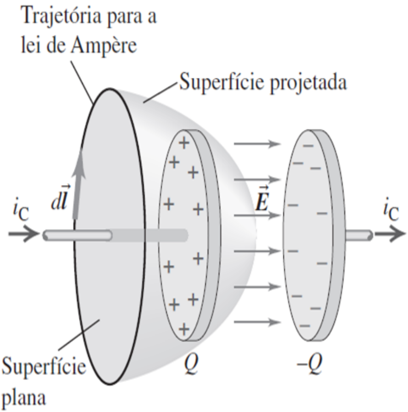


Generalização da Lei de Ampère

- **A lei de Ampere: equação está incompleta!**

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \mathrm{I}_{liq}$$

- **Considere o processo de carga de um capacitor.**
- **Fios conduzem uma corrente de condução i_c de uma placa para outra. A carga Q aumenta e o campo elétrico $\vec{E}$ entre as placas aumenta.**
- **Da superfície plana vemos que:**



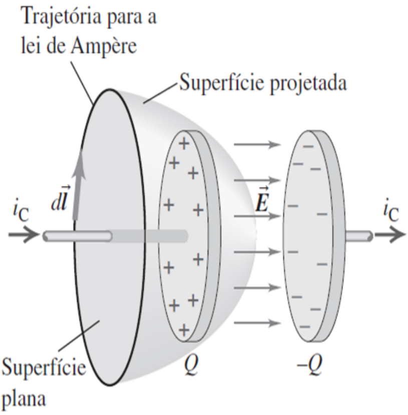
Generalização da Lei de Ampère

- **A lei de Ampere: equação está incompleta!**

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \mathrm{I}_{liq}$$

- **Considere o processo de carga de um capacitor.**
- **Fios conduzem uma corrente de condução i_c de uma placa para outra. A carga Q aumenta e o campo elétrico $\vec{E}$ entre as placas aumenta.**
- **Da superfície plana vemos que:**

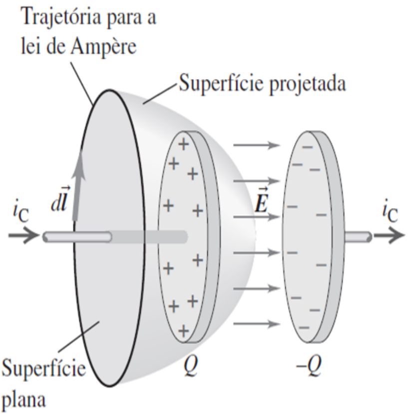
$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 i_c$$



Generalização da Lei de Ampère

- **A lei de Ampere: equação está incompleta!**

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \mathrm{I}_{liq}$$



- **Considere o processo de carga de um capacitor.**
- **Fios conduzem uma corrente de condução i_c de uma placa para outra. A carga Q aumenta e o campo elétrico $\vec{E}$ entre as placas aumenta.**
- **Da superfície plana vemos que:**
- **Da superfície projetada vemos que:**

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 i_c$$

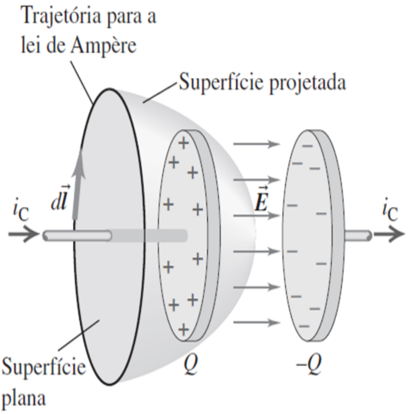
$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = 0$$

Generalização da Lei de Ampère

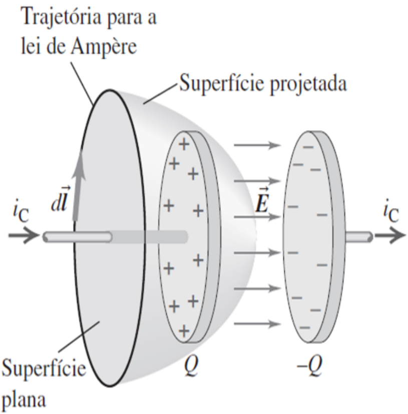
- **Considere o processo de carga de um capacitor.**
- **Fios conduzem uma corrente de condução i_c de uma placa para outra. A carga Q aumenta e o campo elétrico $\vec{E}$ entre as placas aumenta.**
- **Da superfície plana vemos que:**
- **Da superfície projetada vemos que:**
- **Algo está errado, pois o caminho fechado é o mesmo!**

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 i_c$$

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = 0$$

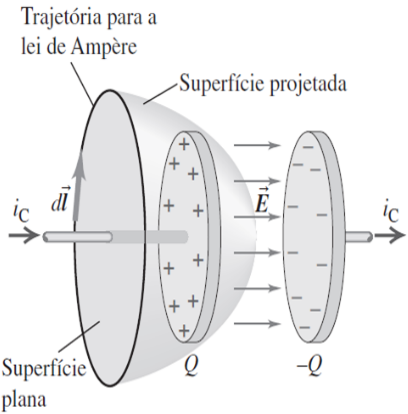


- **Na superfície projetada, a medida que o capacitor carrega o fluxo elétrico Φ_E que atravessa essa superfície aumenta.**



- **Na superfície projetada, a medida que o capacitor carrega o fluxo elétrico Φ_E que atravessa essa superfície aumenta.**

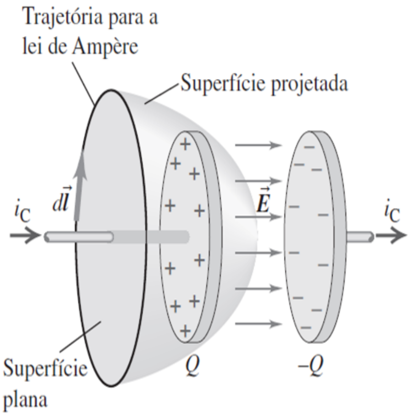
$$q(t) = Cv(t)$$



- **Na superfície projetada, a medida que o capacitor carrega o fluxo elétrico Φ_E que atravessa essa superfície aumenta.**

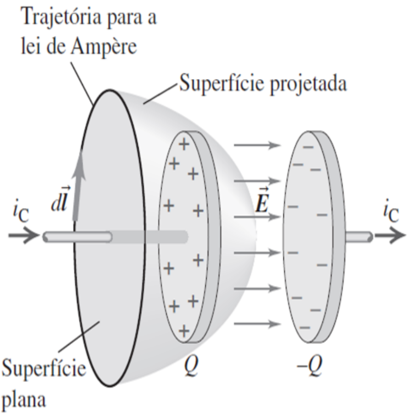
$$q(t) = Cv(t)$$

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{d}$$



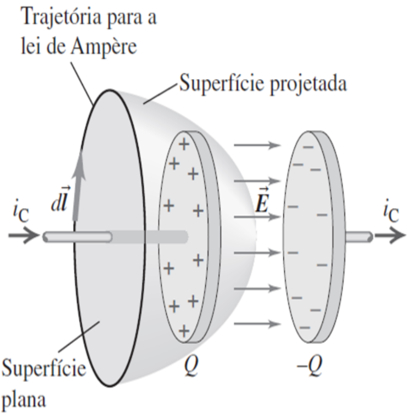
- **Na superfície projetada, a medida que o capacitor carrega o fluxo elétrico Φ_E que atravessa essa superfície aumenta.**

$$
\begin{aligned}
q(t) &= Cv(t) \\
C &= \frac{\epsilon_0 A}{d} \\
v(t) &= E(t)d
\end{aligned}
$$



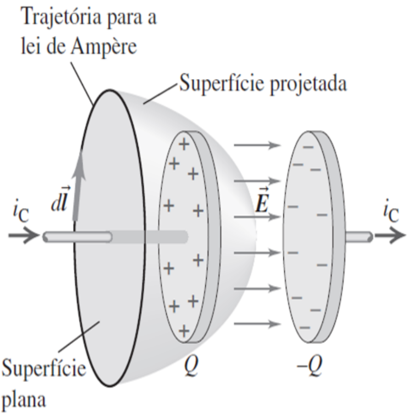
- **Na superfície projetada, a medida que o capacitor carrega o fluxo elétrico Φ_E que atravessa essa superfície aumenta.**

$$
\begin{aligned}
q(t) &= Cv(t) \\
C &= \frac{\epsilon_0 A}{d} \\
v(t) &= E(t)d \\
q(t) &= \frac{\epsilon_0 A}{d} dE(t) = \epsilon_0 AE(t)
\end{aligned}
$$



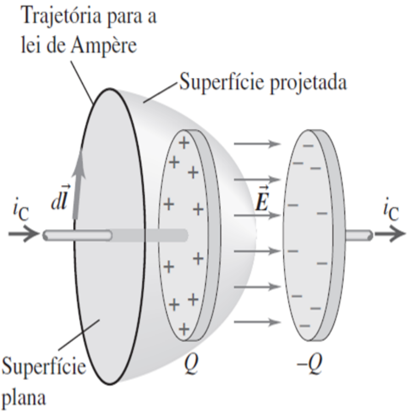
- **Na superfície projetada, a medida que o capacitor carrega o fluxo elétrico Φ_E que atravessa essa superfície aumenta.**

$$
\begin{aligned}
q(t) &= Cv(t) \\
C &= \frac{\epsilon_0 A}{d} \\
v(t) &= E(t)d \\
q(t) &= \frac{\epsilon_0 A}{d} dE(t) = \epsilon_0 AE(t) \\
q(t) &= \epsilon_0 \Phi_E(t) \\
i_c(t) &= \frac{dq(t)}{dt} = \epsilon_0 \frac{d\Phi_E(t)}{dt}
\end{aligned}
$$



- Na superfície projetada, a medida que o capacitor carrega o fluxo elétrico Φ_E que atravessa essa superfície aumenta.

$$
\begin{aligned}
q(t) &= Cv(t) \\
C &= \frac{\epsilon_0 A}{d} \\
v(t) &= E(t)d \\
q(t) &= \frac{\epsilon_0 A}{d} dE(t) = \epsilon_0 A E(t) \\
q(t) &= \epsilon_0 \Phi_E(t) \\
i_c(t) &= \frac{dq(t)}{dt} = \epsilon_0 \frac{d\Phi_E(t)}{dt}
\end{aligned}
$$



- Definiremos que existe uma corrente na região entre as placas, chamada de corrente de deslocamento i_D, dada por:

$$
i_D(t) = \epsilon_0 \frac{d\Phi_E(t)}{dt}
$$

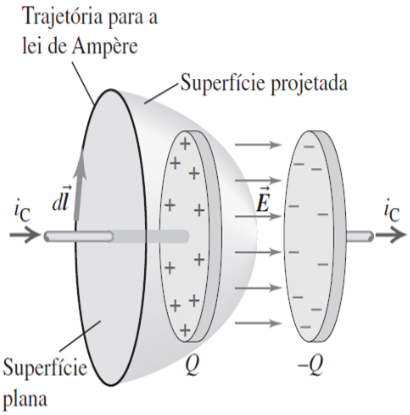
- Definiremos que existe uma corrente na região entre as placas, chamada de corrente de deslocamento i_D, dada por:

$$i_D(t) = \epsilon_0 \frac{d\Phi_E(t)}{dt}$$

- A lei de Ampere se tornará:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 (i_c + i_D)_{lig}$$

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \left(i_c + \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \right)_{liq}$$



- **Definiremos que existe uma corrente na região entre as placas, chamada de corrente de deslocamento i_D, dada por:**

$$i_D(t) = \epsilon_0 \frac{d\Phi_E(t)}{dt}$$

- **A lei de Ampere se tornará:**

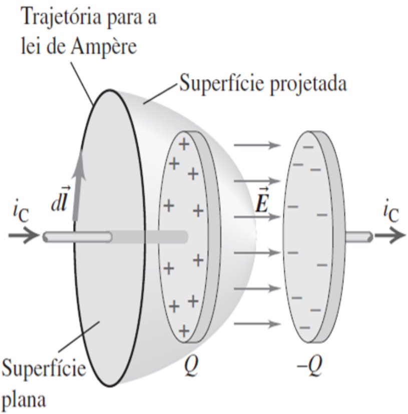
$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 (i_c + i_D)_{lig}$$

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \left(i_c + \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \right)_{liq}$$

- **Podemos definir uma densidade de corrente de deslocamento $\vec{J}_D$ por:**

$$i_D = \int \vec{J}_D \cdot d\vec{A} = \int \left(\epsilon_0 \frac{d\vec{E}}{dt} \right) \cdot d\vec{A}$$

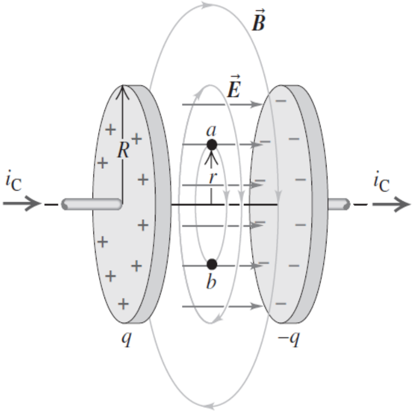
$$\vec{J}_D = \epsilon_0 \frac{d\vec{E}}{dt}$$



A realidade da corrente de deslocamento

- **Aplicando a lei de Ampere em um circulo de raio $r < R$ dentro do capacitor termos:**

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} \quad = \quad 2\pi r B = \mu_0 j_D A$$

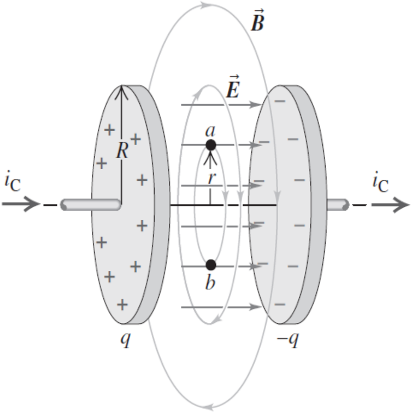


A realidade da corrente de deslocamento

- **Aplicando a lei de Ampere em um circulo de raio $r < R$ dentro do capacitor termos:**

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = 2\pi r B = \mu_0 j_D A$$

$$2\pi r B = \mu_0 \frac{i_c}{\pi R^2} \pi r^2$$



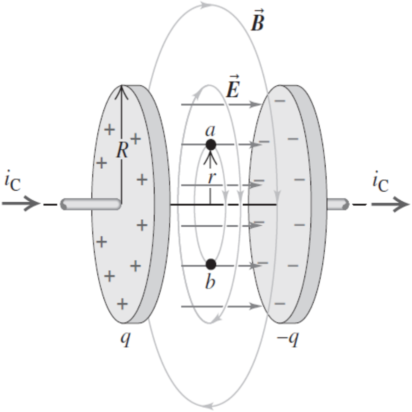
A realidade da corrente de deslocamento

- **Aplicando a lei de Ampere em um circulo de raio $r < R$ dentro do capacitor termos:**

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = 2\pi r B = \mu_0 j_D A$$

$$2\pi r B = \mu_0 \frac{i_c}{\pi R^2} \pi r^2$$

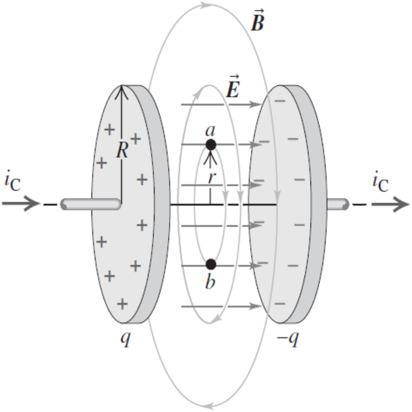
$$B = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{r}{R^2} i_c \quad , se \quad r < R$$



A realidade da corrente de deslocamento

- **Aplicando a lei de Ampere em um circulo de raio $r < R$ dentro do capacitor termos:**

$$
\begin{aligned}
\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} &= 2\pi r B = \mu_0 j_D A \\
2\pi r B &= \mu_0 \frac{i_c}{\pi R^2} \pi r^2 \\
B &= \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{r}{R^2} i_c \quad , se \quad r < R \\
B &= \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{i_c}{R} \quad , se \quad r \geq R
\end{aligned}
$$



A realidade da corrente de deslocamento

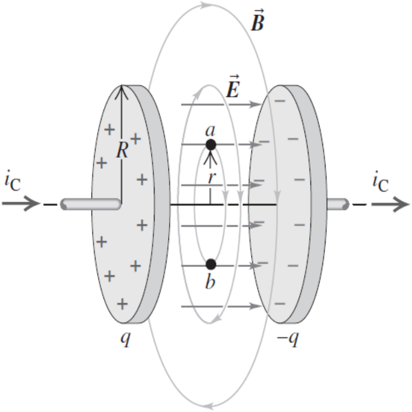
- **Aplicando a lei de Ampere em um circulo de raio $r < R$ dentro do capacitor termos:**

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = 2\pi r B = \mu_0 j_D A$$

$$2\pi r B = \mu_0 \frac{i_c}{\pi R^2} \pi r^2$$

$$B = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{r}{R^2} i_c \quad , se \quad r < R$$

$$B = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{i_c}{R} \quad , se \quad r \geq R$$



- **Esse resultado é confirmado experimentalmente.**

Equações de Maxwell para o Eletromagnetismo

$$\oint \vec{f} \cdot d\vec{A} = \int (\nabla \cdot \vec{f}) dV \quad ; \quad \oint \vec{f} \cdot d\vec{l} = \int (\nabla \times \vec{f}) \cdot d\vec{A}$$

$$Q = \int \rho dV \quad ; \quad \mathtt{I} = \int \vec{\mathtt{J}} \cdot d\vec{A} \quad ; \quad \Phi_f = \int \vec{f} \cdot d\vec{A}$$

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q_{Lig}}{\epsilon_0} \qquad \nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

Equações de Maxwell para o Eletromagnetismo

$$\oint \vec{f} \cdot d\vec{A} = \int (\nabla \cdot \vec{f}) dV \quad ; \quad \oint \vec{f} \cdot d\vec{l} = \int (\nabla \times \vec{f}) \cdot d\vec{A}$$

$$Q = \int \rho dV \quad ; \quad \mathtt{I} = \int \vec{\mathtt{J}} \cdot d\vec{A} \quad ; \quad \Phi_f = \int \vec{f} \cdot d\vec{A}$$

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q_{Lig}}{\epsilon_0} \qquad \nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0 \qquad \nabla \cdot \vec{B} = 0$$

Equações de Maxwell para o Eletromagnetismo

$$\oint \vec{f} \cdot d\vec{A} = \int (\nabla \cdot \vec{f}) dV \quad ; \quad \oint \vec{f} \cdot d\vec{l} = \int (\nabla \times \vec{f}) \cdot d\vec{A}$$

$$Q = \int \rho dV \quad ; \quad \mathrm{I} = \int \vec{\mathrm{J}} \cdot d\vec{A} \quad ; \quad \Phi_f = \int \vec{f} \cdot d\vec{A}$$

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q_{Lig}}{\epsilon_0} \qquad \nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0 \qquad \nabla \cdot \vec{B} = 0$$

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi_B}{dt} \qquad \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

Equações de Maxwell para o Eletromagnetismo

$$\oint \vec{f}\cdot d\vec{A} = \int (\nabla\cdot\vec{f})dV \quad ; \quad \oint \vec{f}\cdot d\vec{l} = \int (\nabla\times\vec{f})\cdot d\vec{A}$$

$$Q = \int \rho dV \quad ; \quad \mathrm{I} = \int \vec{\mathrm{J}}\cdot d\vec{A} \quad ; \quad \Phi_f = \int \vec{f}\cdot d\vec{A}$$

$$\oint \vec{E}\cdot d\vec{A} = \frac{Q_{Lig}}{\epsilon_0}$$

$$\oint \vec{B}\cdot d\vec{A} = 0$$

$$\oint \vec{E}\cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

$$\oint \vec{B}\cdot d\vec{l} = \mu_0\left(\mathrm{I}_c + \epsilon_0\frac{d\Phi_E}{dt}\right)_{liq}$$

$$\nabla\cdot\vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\nabla\cdot\vec{B} = 0$$

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

$$\nabla\times\vec{B} = \mu_0\vec{\mathrm{J}}_c + \mu_0\epsilon_0\frac{\partial\vec{E}}{\partial t}$$

A luz como uma onda eletromagnética

- **No vácuo, não existe carga assim, $\rho = 0$ e $\vec{J}_c = 0$.**

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0$$

A luz como uma onda eletromagnética

- **No vácuo, não existe carga assim, $\rho = 0$ e $\vec{J}_c = 0$.**

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \vec{E} &= 0 \\ \nabla \cdot \vec{B} &= 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \nabla \times (\nabla \times \vec{E}) &= \nabla(\nabla \cdot \vec{E}) - \nabla^2 \vec{E} = -\nabla^2 \vec{E} \\ \nabla \times (\nabla \times \vec{B}) &= \nabla(\nabla \cdot \vec{B}) - \nabla^2 \vec{B} = -\nabla^2 \vec{B} \end{aligned}$$

A luz como uma onda eletromagnética

- **No vácuo, não existe carga assim, $\rho = 0$ e $\vec{J}_c = 0$.**

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \vec{E} &= 0 \\ \nabla \cdot \vec{B} &= 0 \\ \nabla \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \nabla \times (\nabla \times \vec{E}) &= \nabla(\nabla \cdot \vec{E}) - \nabla^2 \vec{E} = -\nabla^2 \vec{E} \\ \nabla \times (\nabla \times \vec{B}) &= \nabla(\nabla \cdot \vec{B}) - \nabla^2 \vec{B} = -\nabla^2 \vec{B} \\ \nabla \times (\nabla \times \vec{E}) &= \nabla \times (-\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}) = -\frac{\partial(\nabla \times \vec{B})}{\partial t} \\ \nabla \times (\nabla \times \vec{B}) &= \nabla \times (\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}) = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial(\nabla \times \vec{E})}{\partial t} \end{aligned}$$

A luz como uma onda eletromagnética

- **No vácuo, não existe carga assim, $\rho = 0$ e $\vec{J}_c = 0$.**

$$\begin{aligned}
\nabla \cdot \vec{E} &= 0 \\
\nabla \cdot \vec{B} &= 0 \\
\nabla \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\
\nabla \times \vec{B} &= \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) &= \nabla(\nabla \cdot \vec{E}) - \nabla^2 \vec{E} = -\nabla^2 \vec{E} \\
\nabla \times (\nabla \times \vec{B}) &= \nabla(\nabla \cdot \vec{B}) - \nabla^2 \vec{B} = -\nabla^2 \vec{B} \\
\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) &= \nabla \times (-\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}) = -\frac{\partial (\nabla \times \vec{B})}{\partial t} \\
\nabla \times (\nabla \times \vec{B}) &= \nabla \times (\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}) = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial (\nabla \times \vec{E})}{\partial t} \\
\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) &= -\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \\
\nabla \times (\nabla \times \vec{B}) &= -\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2}
\end{aligned}$$

A luz como uma onda eletromagnética

- **No vácuo, não existe carga assim, $\rho = 0$ e $\vec{J}_c = 0$.**

$$\begin{aligned}
\nabla \cdot \vec{E} &= 0 \\
\nabla \cdot \vec{B} &= 0 \\
\nabla \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\
\nabla \times \vec{B} &= \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) &= \nabla(\nabla \cdot \vec{E}) - \nabla^2 \vec{E} = -\nabla^2 \vec{E} \\
\nabla \times (\nabla \times \vec{B}) &= \nabla(\nabla \cdot \vec{B}) - \nabla^2 \vec{B} = -\nabla^2 \vec{B} \\
\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) &= \nabla \times (-\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}) = -\frac{\partial(\nabla \times \vec{B})}{\partial t} \\
\nabla \times (\nabla \times \vec{B}) &= \nabla \times (\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}) = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial(\nabla \times \vec{E})}{\partial t} \\
\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) &= -\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \\
\nabla \times (\nabla \times \vec{B}) &= -\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} \\
-\nabla^2 \vec{E} &= -\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \\
-\nabla^2 \vec{B} &= -\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2}
\end{aligned}$$

$$\frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2}$$

Equação de Onda