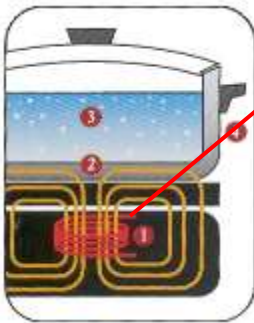


7 - Indução electromagnética

Força electromotriz induzida num circuito: Lei de Faraday e Lei de Lenz



Placas de indução



São utilizadas bobinas (1), que quando são percorridas por uma corrente eléctrica variável, criam um campo magnético variável. Quando os recipientes (com bases ricas em materiais ferromagnéticos) são colocados sobre a placa, actuam como um condutor e dá-se o aparecimento de correntes induzidas. Por efeito Joule (e também por perdas devido a histerese) há transferência de energia, como calor, da base do recipiente (2) para os alimentos.

Correntes eléctricas \Rightarrow criam campos magnéticos (cap. 6: e.g. Biot-Savart).

E acontece o efeito contrário?



Faraday (1791-1867)

Nos início dos anos 30 do séc. XIX, Michael Faraday, em Inglaterra, e Joseph Henry, nos Estados Unidos, descobriram outros efeitos interessantes entre a eletricidade e o magnetismo.



Henry (1797- 1878)

1ª experiência

https://phet.colorado.edu/sims/html/faradays-law/latest/faradays-law_en.html



Quando o **ímã** é **deslocado no sentido da bobina**, a **agulha do galvanómetro desvia-se num sentido.**



Quando o **ímã** é mantido **em repouso**, em relação à bobina, **não há desvio da agulha do galvanómetro.**



Quando o **ímã** é **deslocado no sentido oposto** da bobina, a **agulha do galvanómetro desvia-se no outro sentido**

A partir destas observações, concluímos que o circuito "sabe" que o ímã está a ser movimentado, em que sentido

Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 7: Indução eletromagnética

3

- Verifica-se o **aparecimento de uma corrente** quando existe **movimento relativo entre a bobina e o ímã.**
- Não existe corrente quando não existe movimento relativo
- Quanto **mais rápido for o movimento relativo maior é a intensidade da corrente.**
- O **sentido da corrente depende da orientação relativa do ímã em relação à bobina.**

↓
Processo de Indução

A corrente produzida no circuito é uma corrente induzida



Quando o **fluxo do campo magnético** através de uma espira varia no tempo, surge na espira uma corrente eléctrica (**corrente induzida**).

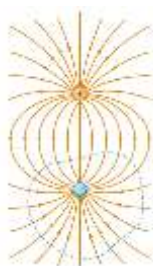
Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 7: Indução eletromagnética

<http://phet.colorado.edu/index.php>

fluxo do campo eléctrico

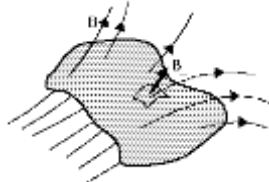


$$\Phi_E = \oint \vec{E} \cdot d\vec{A}$$



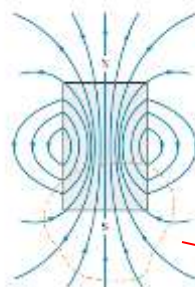
Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 7: Indução eletromagnética

fluxo do campo magnético



$$\Phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{A}$$

$$\Phi_B = B A \cos\theta$$



Unidade SI: Wb (Weber)
(Tesla metro quadrado)

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

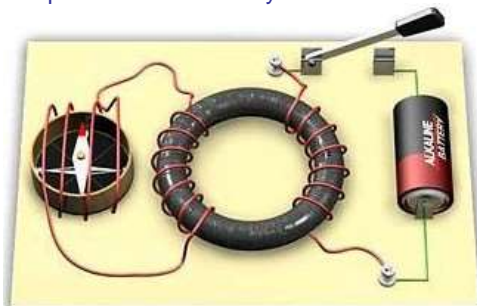
Através de uma
superfície fechada

5

2ª experiência

<https://phet.colorado.edu/pt/simulation/legacy/faraday>

Experiência de Faraday



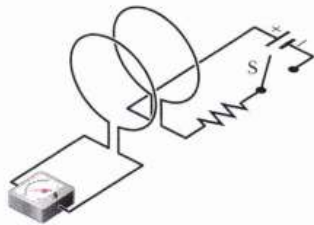
- Se **fechamos** o **interruptor**, verificamos que a **agulha** da bússola se **move**, regressando de seguida à posição inicial.
- **Nada** acontece enquanto a **corrente** no primeiro circuito se mantém **estacionária (constante)**
- Quando se **abre** o **interruptor** acontece algo **semelhante** ao que acontece quando se **liga** o circuito, com a diferença da **agulha** se **deslocar para o sentido oposto** ao inicial.

Que se passa?



Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 7: Indução eletromagnética

6



Quando se fecha o circuito da bobina do lado direito, verifica-se que há uma corrente induzida na bobina do lado esquerdo.

Mantendo o circuito fechado (mantendo a corrente na bobina da direita constante) não se verifica a existência de corrente induzida, na bobina da esquerda.

Quando se abre o circuito, verifica-se de novo que há corrente induzida na bobina do lado esquerdo.



Só há corrente induzida, quando há variação na corrente do circuito primário

Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 7: Indução eletromagnética

7

Michael Faraday e Joseph Henry descobriram que **campos magnéticos variáveis** criam correntes elétricas num fio condutor – **Correntes induzidas**.

Como se podem criar campos magnéticos variáveis?



Através do movimento relativo entre condutores e magnetes, ou através dos campos magnéticos variáveis produzidos por correntes variáveis.

Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 7: Indução eletromagnética

8

Quando o fluxo do campo magnético através de uma espira varia no tempo, surge na espira uma corrente eléctrica (**corrente induzida**).

Chama-se **força eletromotriz induzida** ao trabalho realizado por unidade de carga durante o movimento dos portadores de carga que constituem a corrente induzida.

Quando o número de linhas de campo que atravessa uma espira se altera, surge na espira uma força eletromotriz induzida.

- Nas duas experiências descritas houve uma *fem* induzida num circuito quando o fluxo magnético (Φ_B) através do circuito variou no tempo.
- Uma corrente eléctrica pode ser produzida por um campo magnético variável. Uma força eletromotriz (\mathcal{E}) induzida produz-se no circuito secundário em virtude do campo magnético variável.
- A *fem* induzida num circuito é directamente proporcional à taxa temporal de variação do Φ_B através do circuito.

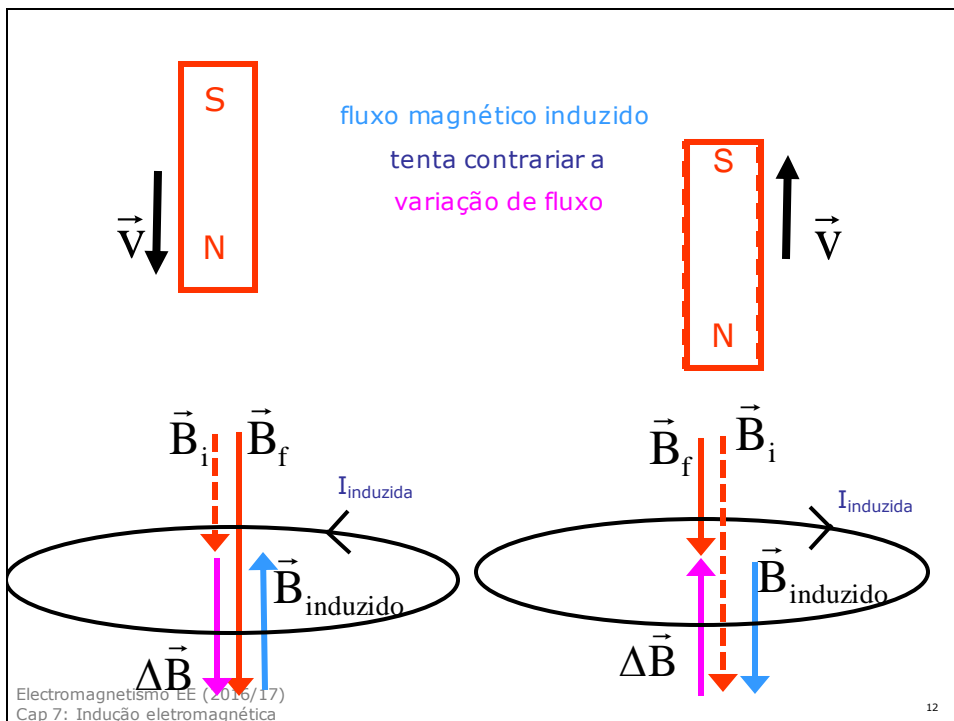
Lei de Faraday da indução magnética

A *fem* induzida instantaneamente num circuito corresponde à taxa de variação do fluxo magnético através do circuito

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

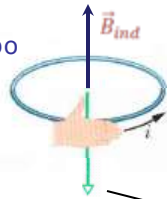
Lei de Lenz:

O sentido da *fem* induzida é tal que produz uma corrente eléctrica cujo campo magnético se opõe à variação do fluxo magnético através da espira. Isto significa que a corrente induzida tende a manter o fluxo inicial através do circuito.

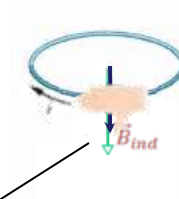


Indução

1º caso: o campo magnético aumenta no sentido "para baixo"...

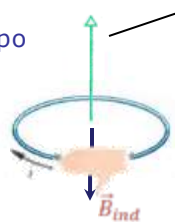


2º caso: o campo magnético diminui no sentido "para baixo"...

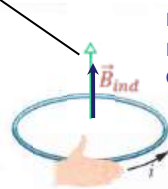


Variação do campo magnético

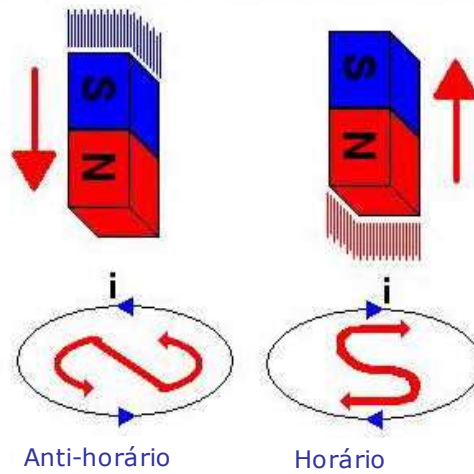
3º caso: o campo magnético aumenta no sentido "para cima"...



3º caso: o campo magnético diminui no sentido "para cima"...

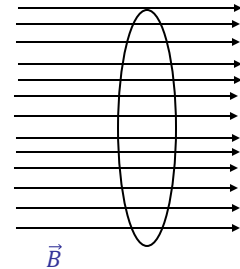
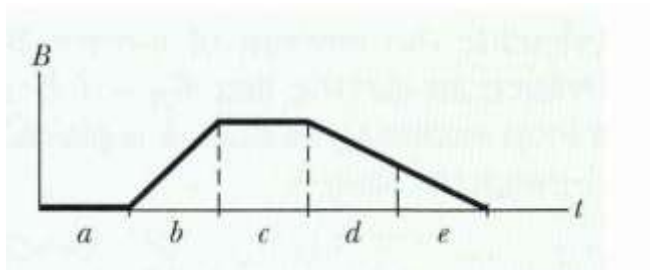


Sentido da Corrente Induzida



Checkpoint

O gráfico mostra a variação do campo magnético que existe uma região onde se encontra uma espira condutora. A direção do campo magnético é perpendicular ao plano da espira. Os intervalos de tempo a , b , c , d e e são iguais. Ordene as 5 regiões por ordem crescente do módulo da fem induzida.



Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 7: Indução eletromagnética

15

Ponto da situação

Indução electromagnética

Quando o **fluxo do campo magnético** através de uma espira varia no tempo, surge na espira uma corrente eléctrica.



À corrente eléctrica produzida no circuito chama-se
"corrente induzida"



Indução electromagnética

Chama-se **força electromotriz induzida** ao trabalho realizado por unidade de carga durante o movimento dos portadores de carga que constituem a corrente induzida.

Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 7: Indução eletromagnética

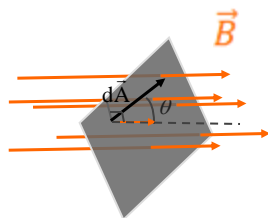
16

A lei de Lenz permite prever o **sentido da corrente** induzida

$$\varepsilon = -N \frac{d\Phi_B}{dt} \quad N - \text{n}^\circ \text{ de espiras}$$

- A corrente induzida deve ter uma direcção tal que o fluxo que ela gera se oponha à variação do Φ_B externo.
- A corrente induzida tende a manter o fluxo original através do circuito.

Como se geram correntes induzidas?



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

$$\varepsilon = -N \frac{d}{dt} (B \cdot A \cdot \cos \theta)$$

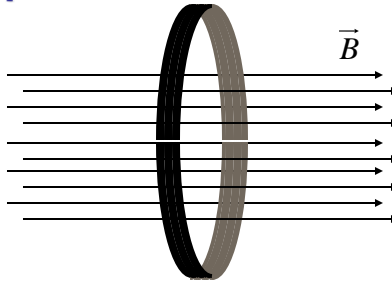
É possível induzir uma *fem* num circuito de diversas maneiras:

- 1) O módulo de B pode variar com o tempo;
- 2) a área limitada pelo circuito pode variar com o tempo;
- 3) o ângulo, θ , entre B e dA pode variar com o tempo
- 4) qualquer combinação destas situações.

Checkpoint

Um enrolamento circular de um fio conductor tem 100 voltas e um raio de 30 cm. Este enrolamento está sujeito a um campo magnético externo perpendicular à espira que inicialmente tem uma magnitude de 0.30 T e o sentido indicado na figura. O campo magnético varia para -0.20 T em 1.5 s.

- Calcule a intensidade da FEM média induzida na espira durante este intervalo de tempo.
- Se a resistência da espira for 10 Ω , qual o valor da corrente induzida? E qual o sentido dessa corrente?

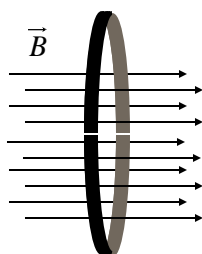


Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 7: Indução eletromagnética

19

Dados:

$r = 0.30 \text{ m}$
 $B_i = 0.30 \text{ T}$
 $B_f = -0.20 \text{ T}$
 $\Delta t = 1.5 \text{ s}$
 $N = 100$
 $R = 10 \Omega$



A espira é perpendicular aos campos aplicados $\Rightarrow \cos \theta = 1$. O fluxo magnético é: $\Phi = BA = B\pi r^2$

Fluxo magnético inicial.

$$\Phi_i = (0.30 \text{ T}) \pi (0.30 \text{ m})^2 = 0.085 \text{ T} \cdot \text{m}^2$$

Fluxo magnético final.

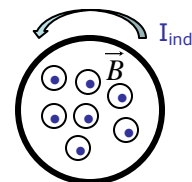
$$\Phi_f = (-0.20 \text{ T}) \pi (0.30 \text{ m})^2 = -0.057 \text{ T} \cdot \text{m}^2$$

Magnitude da FEM induzida:

$$\begin{aligned} \varepsilon &= -N \frac{\Delta \Phi_m}{\Delta t} = -N \frac{\Phi_m(f) - \Phi_m(i)}{\Delta t} = -100 \frac{-0.057 - 0.085}{1.5} \\ &= -\frac{-14.2}{1.5} \text{ V} = 9.5 \text{ V} \end{aligned}$$

Intensidade da corrente induzida:

$$I = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{9.5 \text{ V}}{10 \Omega} = 0.95 \text{ A}$$



Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 7: Indução eletromagnética

20

Como se explica a queda mais lenta do magnete de Nd no tubo de Cobre?

Queda livre e não livre



- O Cu ou o Al, por exemplo, são condutores mas não magnéticos.

- Uma peça de aço cai, no interior do tubo, com uma aceleração igual à aceleração gravítica.

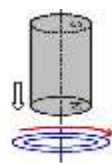


- Um magnete, num tubo de acrílico, cai com uma aceleração igual à aceleração gravítica



Um magnete forte (neodímio) cai, no interior do tubo de Cu ou de Al, com aceleração inferior à aceleração gravítica.

O Cu ou o Al “*sente*” o campo magnético a variar. Esta variação de campo (e fluxo) magnético induz uma corrente no tubo de Cu ou Al.



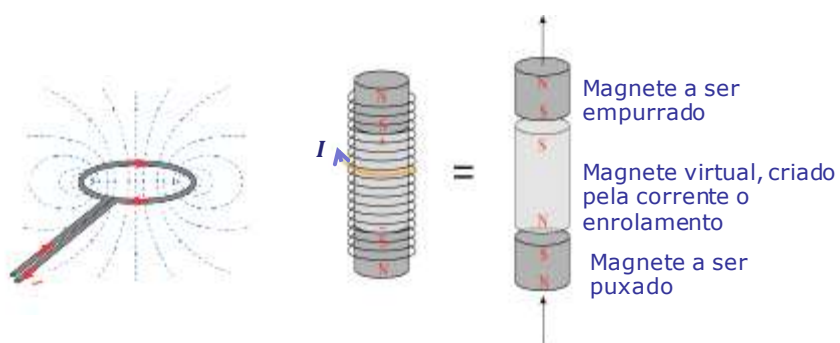
A corrente induzida tem um sentido que produz um campo magnético que se opõe à variação do fluxo magnético.

Material:

- 1 tubo de Cu ou Al
- 1 tubo de acrílico
- magnete de neodímio

O que faz andar a pilha e magnetes no interior do enrolamento de cobre?

“Comboio” magnético



Material:

- 2 discos magnéticos de neodímio (15 x 8 mm)
- Pilha (1,5 V)
- Fio de cobre não revestido (0,8 mm a 1,1 mm de diâmetro)
- Enrolamento de fio de cobre com ≈ 16 mm de diâmetro

Forma geral da Lei de Faraday

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

- Uma variação do fluxo do campo magnético produz um campo eléctrico.
- O campo eléctrico produzido existe, mesmo que o circuito não esteja lá (se não existir um condutor, não existe corrente eléctrica, mas o campo eléctrico continua a existir)
- O campo eléctrico induzido é não conservativo. O campo definido pela lei de Faraday não é um campo electrostático. Se fosse electrostático e conservativo o integral $\vec{E} \cdot d\vec{s}$ ao longo de uma linha fechada seria nulo.

Indução e Transferência de Energia

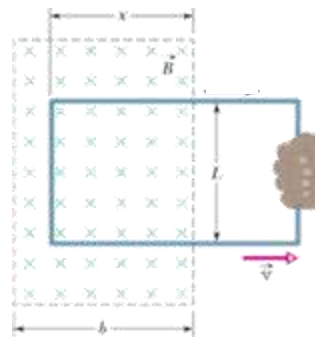
Considere a espira da figura que é movida, com velocidade constante, para a direita por uma força exterior.

Se a força aplicada pela mão for constante, o trabalho realizado pela força aplicada é:

$$W = \int \vec{F} \cdot d\vec{r} = F\Delta r \cos 0 = F\Delta r$$

A energia transferida por unidade de tempo (potência) pela força aplicada é:

$$P = \frac{W}{\Delta t} = \frac{F\Delta r}{\Delta t} = Fv$$



Quando a espira se move o fluxo do campo magnético através da espira diminui, e surge uma corrente induzida na espira.

O fluxo magnético através da espira é:

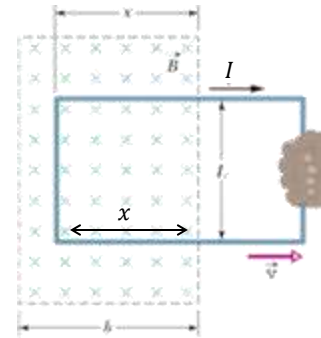
$$\Phi_B = B \cdot A = B \cdot L \cdot x$$

O fluxo diminui com o tempo, a força electromotriz induzida, vem:

$$|\varepsilon| = \frac{d(B \cdot L \cdot x)}{dt} \Leftrightarrow |\varepsilon| = BL \frac{dx}{dt} \Leftrightarrow |\varepsilon| = BLv$$

Se a resistência da espira for R , a corrente da espira será:

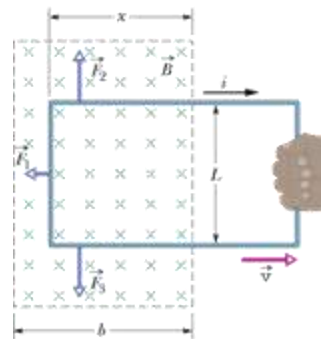
$$|\varepsilon| = RI \Leftrightarrow I = \frac{BLv}{R}$$



A presença de corrente na espira, numa região onde existe campo magnético leva ao aparecimento de forças nos lados da espira. Em cada aresta:

$$\vec{F} = I\vec{L} \times \vec{B}$$

Qual a causa dessas forças?



Se a força exterior tiver a mesma magnitude de F_1 , a resultante das forças é nula e a velocidade da espira é constante. Sendo os lados da espira perpendiculares ao campo

$$F = ILB \sin 90^\circ = ILB$$

Tinha-se visto que: $I = \frac{BLv}{R}$

Então: $F = \frac{B^2 L^2 v}{R}$

Daqui podemos obter a Potência em função do Campo:

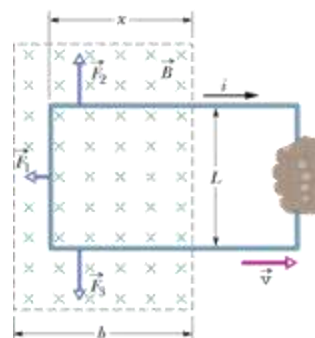
$$P = Fv = \frac{B^2 L^2 v^2}{R}$$

Esta é a taxa a que se produz trabalho quando se puxa a espira através do campo magnético com velocidade constante.

Comparando com a taxa a que se produz energia térmica por efeito Joule ($P = RI^2$), sabendo que $I = \frac{BLv}{R}$:

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

Que é exatamente a mesma. A taxa a que se fornece energia por aplicação da força é a mesma que se transforma em energia térmica, devido ao efeito Joule.

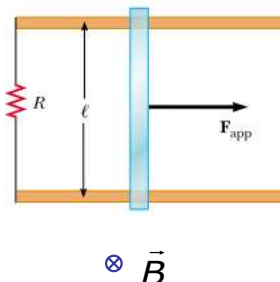


Exemplo 2

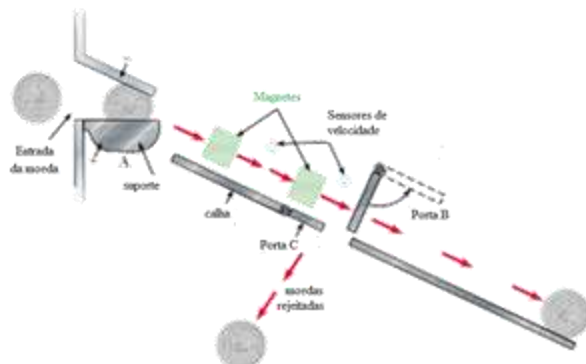
Considere o esquema da figura, em que uma barra condutora pode ser deslocada sem atrito. O circuito encontra-se localizado numa região onde existe um campo magnético uniforme de 2.5 T, com sentido "para dentro".

Admita que a resistência $R = 6.00 \, \Omega$, $l = 1.20 \, \text{m}$.

- A que velocidade constante deve ser movida a barra para que a corrente na resistência seja de 0.50 A? (R: 1 m/s)
- Qual o sentido da corrente?
- Qual o valor da F_{app} ? (R: 1.5 N)
- Qual a potência dissipada? Compare com o valor da potência resultante da aplicação de F_{app} na barra condutora. (R: 1.5 W)

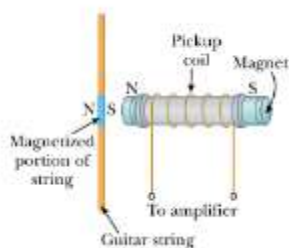


Máquinas de moedas



- Quando a moeda entra na máquina, uma diferença de potencial é aplicada através da moeda e a sua resistência eléctrica é medida.
- Se a resistência medida for aceitável, a plataforma desce e a moeda rola pela calha.
- Dois magnetes produzem correntes induzidas na moeda, o que faz com que surjam forças magnéticas que controlam a velocidade durante a descida. Se a velocidade for a esperada a porta B abre e a moeda é aceite. Se a velocidade não for a correcta, abre a porta C e a moeda é rejeitada.

Guitarra eléctrica



Na guitarra eléctrica a vibração de uma corda induz uma *fem* na bobina.

microfone



No microfone os sons (vibração mecânica) são “traduzidos” em sinais eléctricos, que são mais facilmente transportado ou transformados.

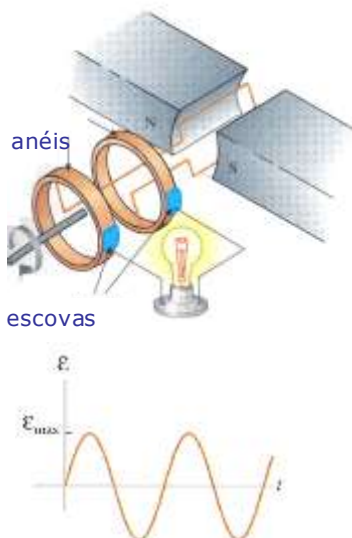
As ondas sonoras fazem vibrar uma membrana.

A vibração do diafragma é transmitida a uma bobina, que se move “de acordo” com as características da onda sonora.

A bobina está sob a influência do campo magnético de um ímã, e o seu movimento irá originar variações do fluxo magnético gerando impulsos eléctricos.

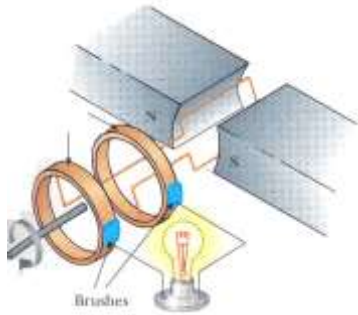
Gerador AC

<https://phet.colorado.edu/pt/simulation/legacy/faraday>



- Num gerador de corrente alternada (AC) simples a espira condutora é posta a girar num campo magnético, por um agente externo (queda de água, vapor de água, pedais de uma bicicleta, etc).
- Quando a espira gira no campo, o fluxo magnético através dela varia em função do tempo, originando no circuito externo uma força eletromotriz e uma corrente induzida.

Um gerador converte energia mecânica em energia eléctrica.



$$\Phi_B = B \cdot A \cdot \cos \theta$$

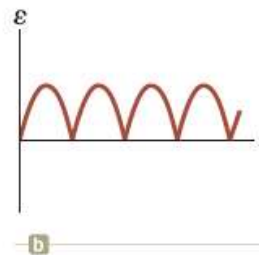
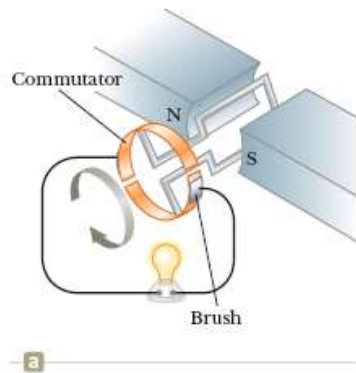
$$\Phi_B = B \cdot A \cdot \cos \omega t$$

$$\varepsilon = -N \frac{d\Phi_B}{dt} = -NAB \frac{d}{dt} \cos \omega t$$

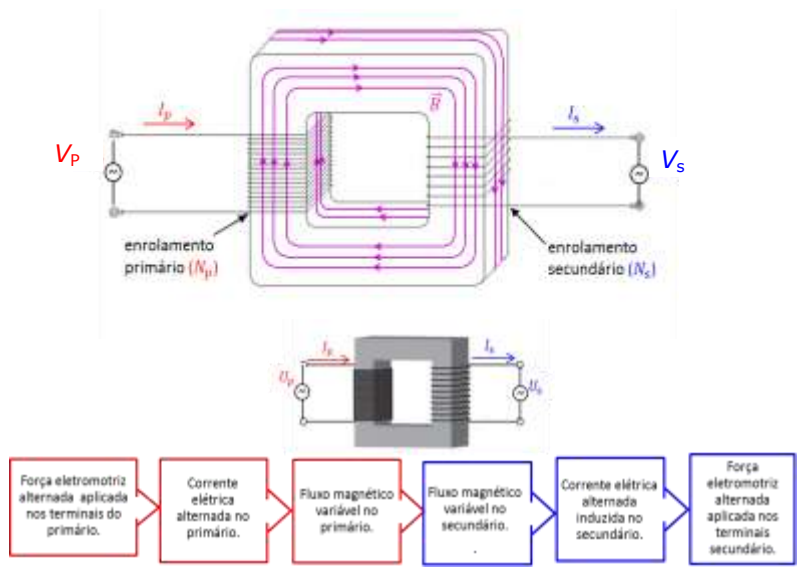
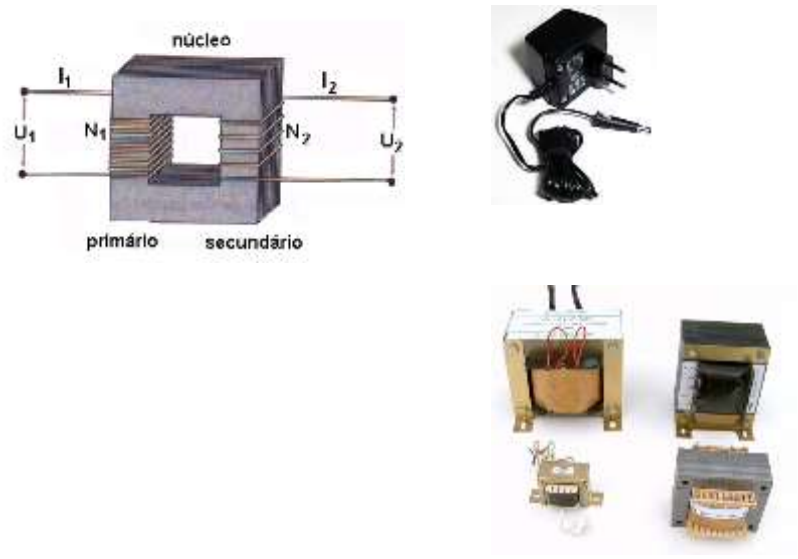
$$\varepsilon = NAB\omega \sin \omega t$$

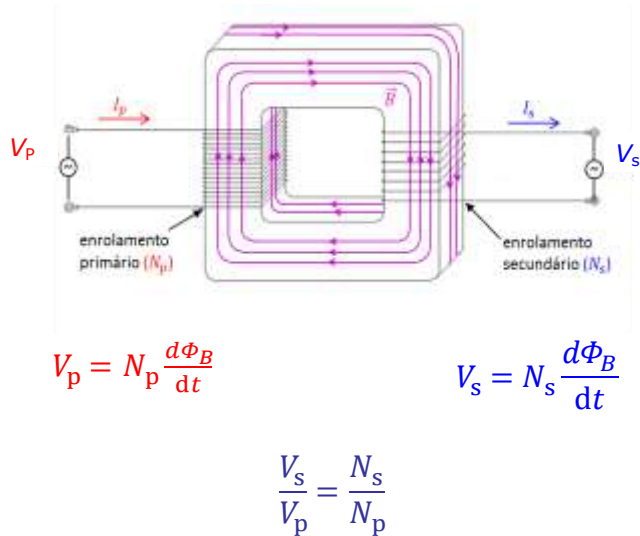
$$\varepsilon_{Max} = NAB\omega$$

Gerador DC



Transformador <https://phet.colorado.edu/pt/simulation/legacy/faraday>



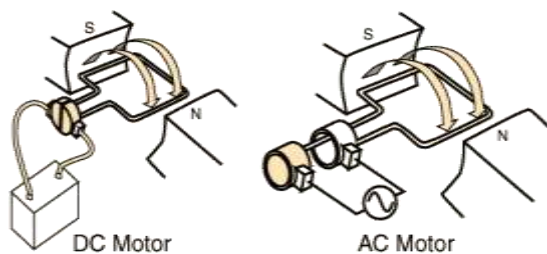


Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 7: Indução eletromagnética

39

Motores

Um motor utiliza energia eléctrica para produzir movimento (geralmente a rotação de um eixo)

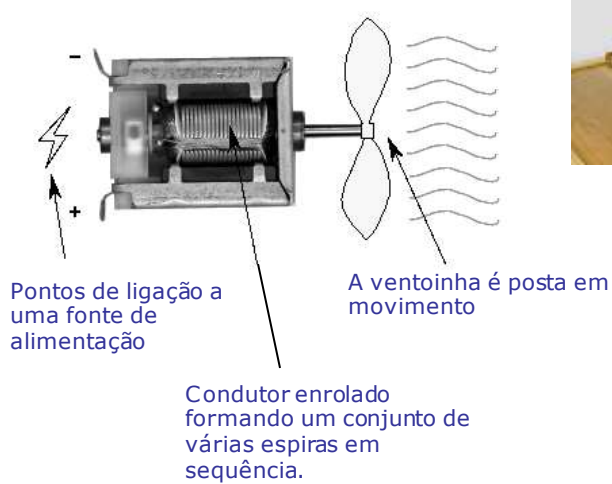
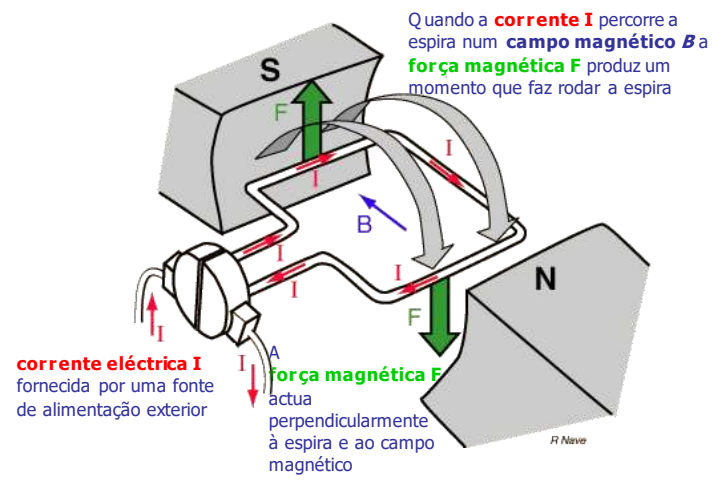


- Na sua essência, um motor é um gerador que opera de modo inverso: em lugar de se gerar uma corrente, pela rotação duma bobina, fornece-se uma corrente à bobina, mediante uma bateria, e o momento que actua sobre a bobina percorrida pela corrente provoca a rotação.

Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 7: Indução eletromagnética

40

motores



Fluxo do campo magnético:

Através do movimento relativo entre condutores e magnetes, ou através dos campos magnéticos variáveis produzidos por correntes variáveis, criam-se correntes eléctricas induzidas.

Lei de Faraday-Lenz: A *fem* induzida instantaneamente num circuito corresponde à taxa de variação do fluxo magnético através do circuito. O sentido da *fem* induzida é tal que produz uma corrente eléctrica cujo campo magnético se opõe à variação do fluxo magnético através da espira.

$$\Phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{A}$$

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