

2.7- Variação do Fluxo Magnético (ϕ)

É quantificado pelo **número de linhas de campo que atravessam a área de uma superfície**. Quanto mais linhas, maior o Fluxo Magnético.

$$\phi = B \cdot A \cdot \sin\theta$$

B - vetor densidade de campo magnético [T]

A - área de incidência das linhas [m^2]

θ - ângulo de incidência das linhas de campo com a superfície [° ou rad]

ϕ - Fluxo Magnético [Wb]

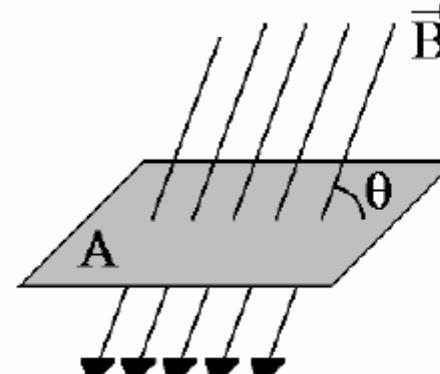
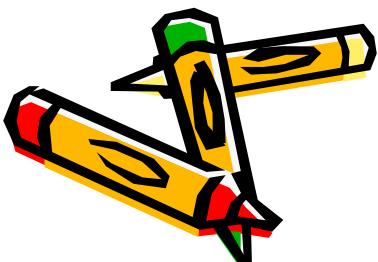


Figura 6.1 - Linhas de Campo Magnético atingindo uma superfície produzem fluxo magnético





Formas para se variar o fluxo magnético:

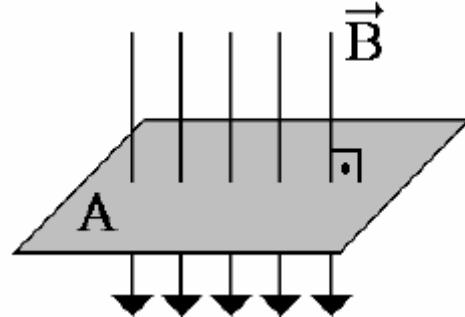


Figura 6.3 – Fluxo Máximo: Linhas de Campo Magnético incidindo perpendicularmente à superfície.

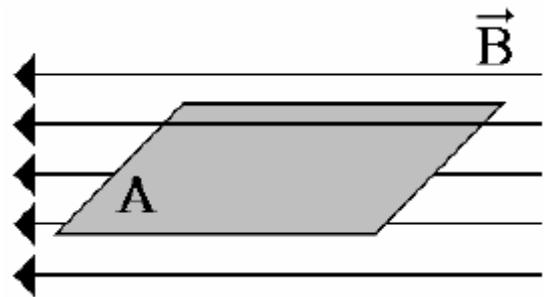
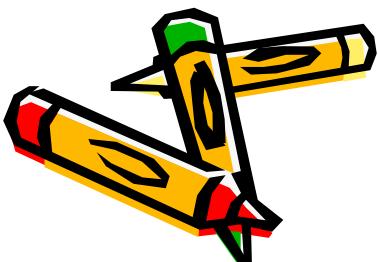


Figura 6.4 – Fluxo Nulo: Linhas de Campo Magnético incidindo paralelamente à superfície.



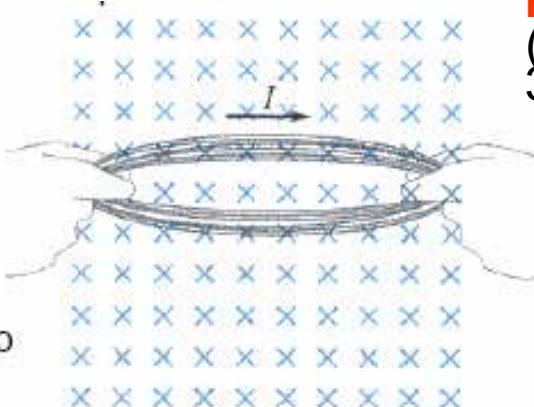
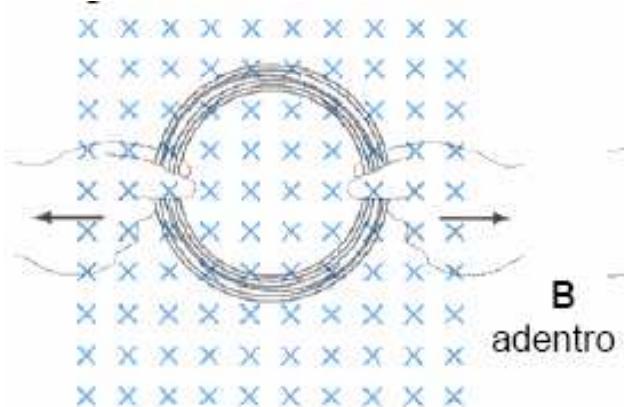
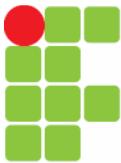


Figura 6.5 – variação de fluxo magnético pela redução da área
(Fonte: Giancoli, 3ed.)

Fluxo na bobina diminuindo

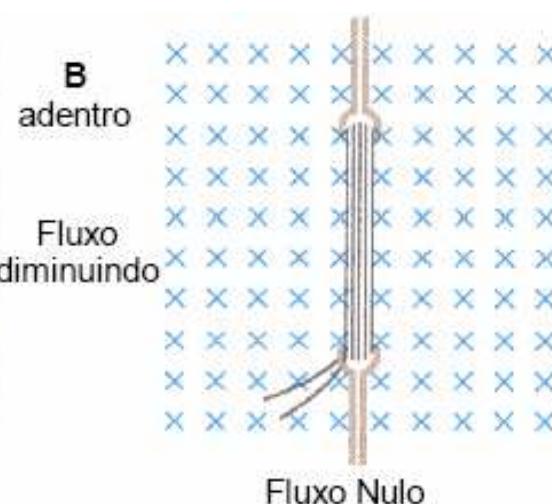
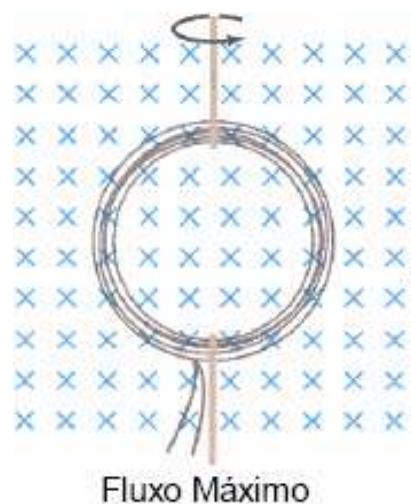
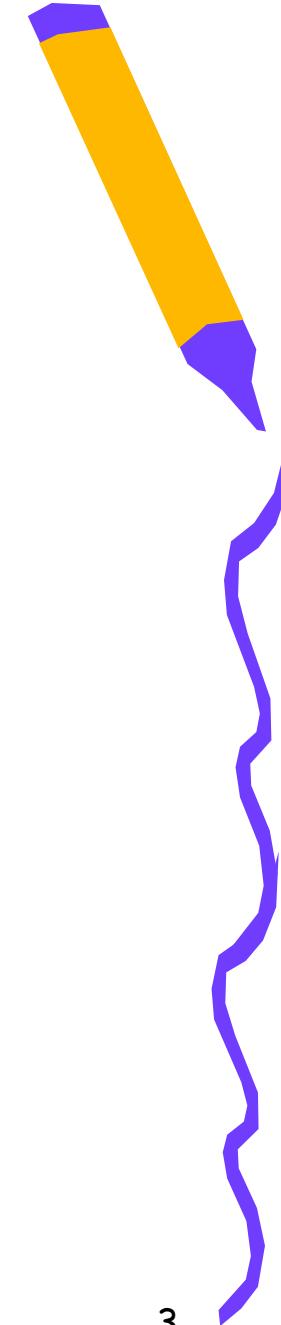


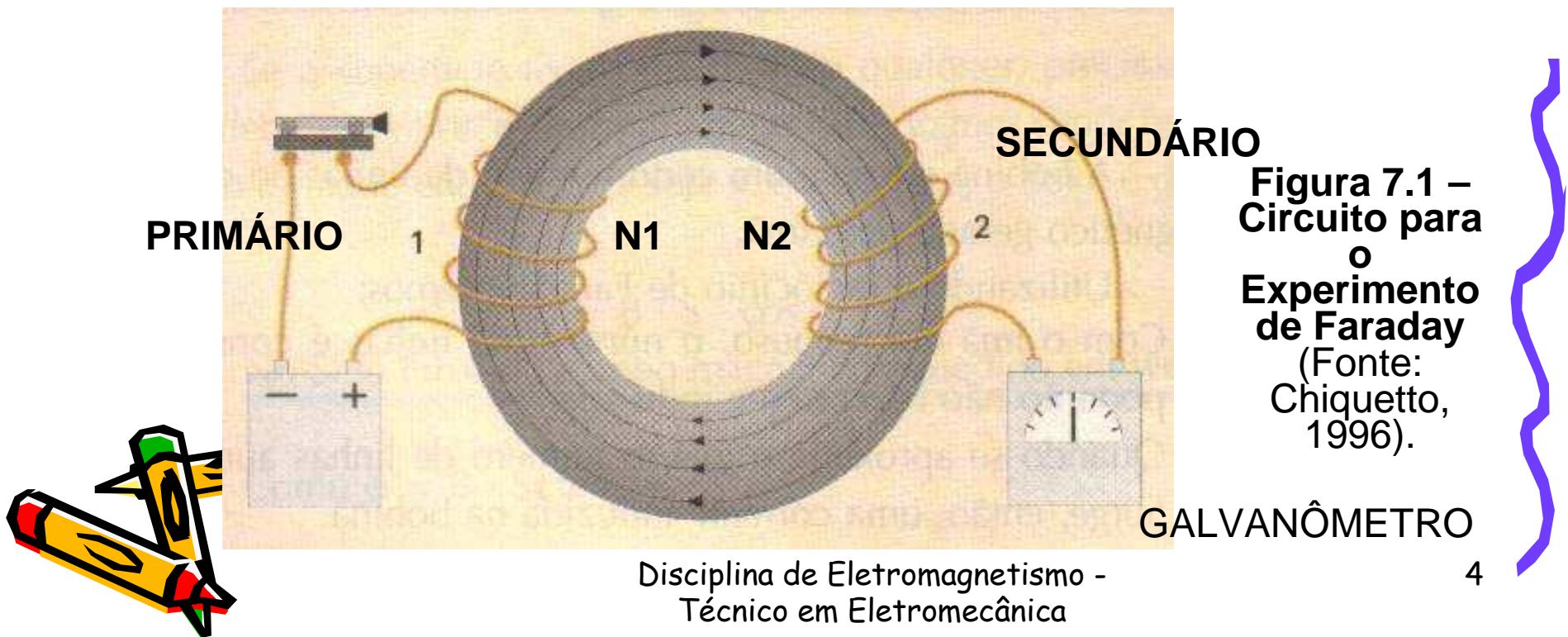
Figura 6.6 – variação do fluxo magnético numa bobina girando
(Fonte: Giancoli, 3ed.)



2.8- Indução Eletromagnética

Em 1819 Oersted descobriu que uma **corrente elétrica** produz campo magnético.

A partir dessa descoberta, em 1831, o inglês **Michael Faraday** e o americano **Joseph Henry** dedicaram-se a obter o **efeito inverso**, ou seja, obter **corrente elétrica** a partir do **campo magnético**.



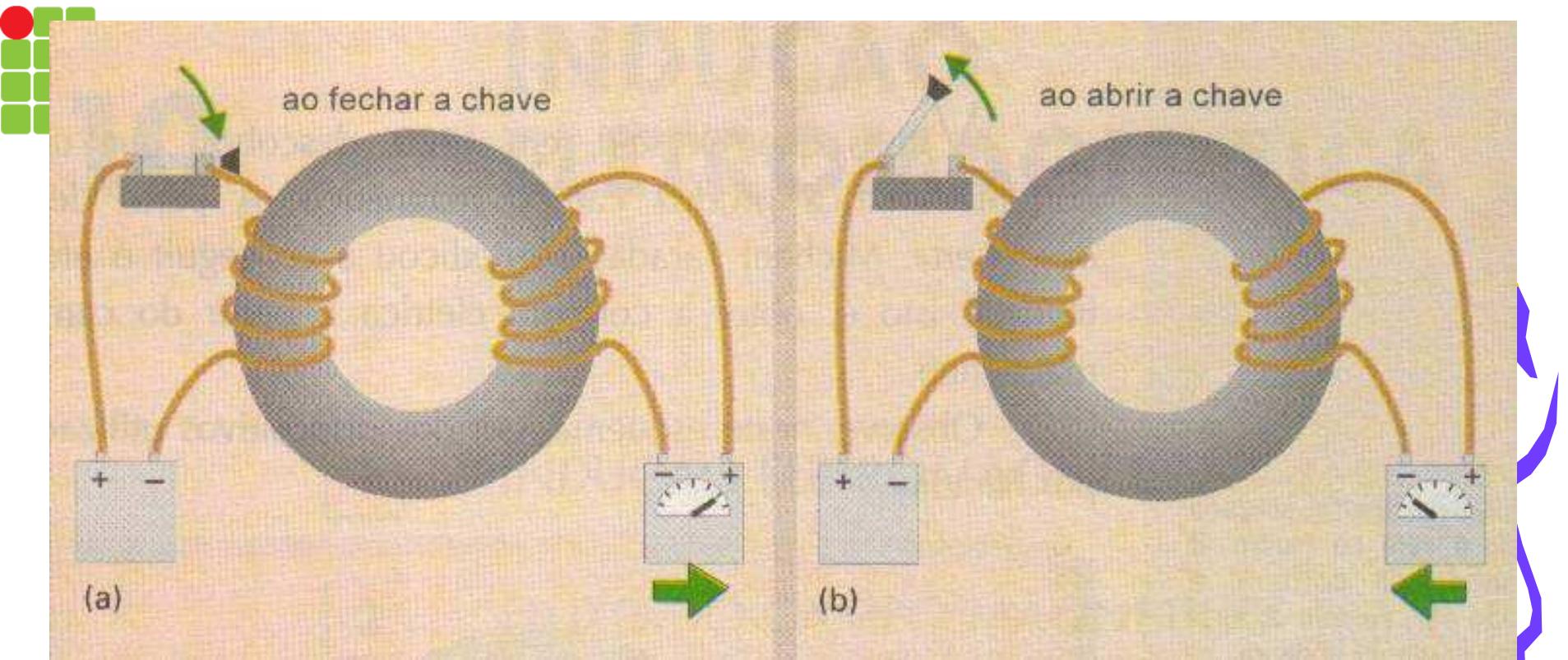


Figura 7.2 – Experimento de Faraday; a) ao fechar a chave; b) ao abrir a chave (Fonte: Chiquetto, 1996).

<http://micro.magnet.fsu.edu/electromag/java/faraday/index.html>

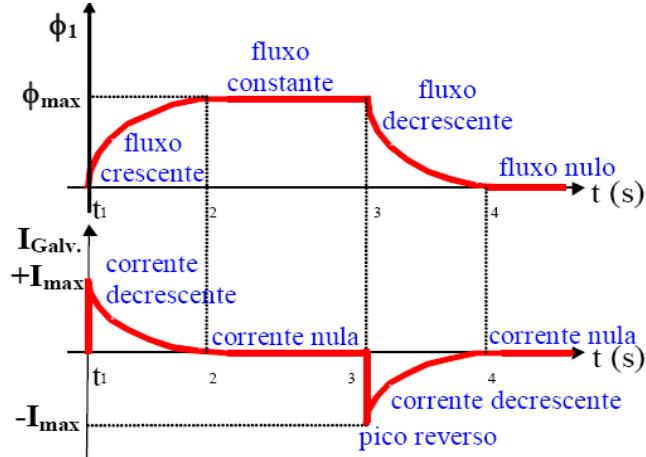
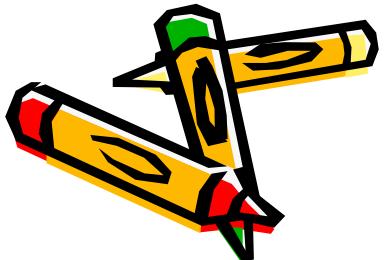


Figura 7.3 - Comportamento do Fluxo Magnético e da Corrente no Galvanômetro para o Experimento de Faraday.

A indução eletromagnética é regida por duas leis: **Lei de Faraday** e **Lei de Lenz**.

$$\overline{e} = -N \cdot \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

LEI DE FARADAY

Em todo condutor enquanto sujeito a uma variação de fluxo magnético é estabelecida uma força eletromotriz (tensão) induzida.

<http://micro.magnet.fsu.edu/electromag/java/faraday2/index.html>

LEI DE LENZ

O sentido da corrente induzida é tal que origina um fluxo magnético induzido, que se opõe à variação do fluxo magnético indutor.



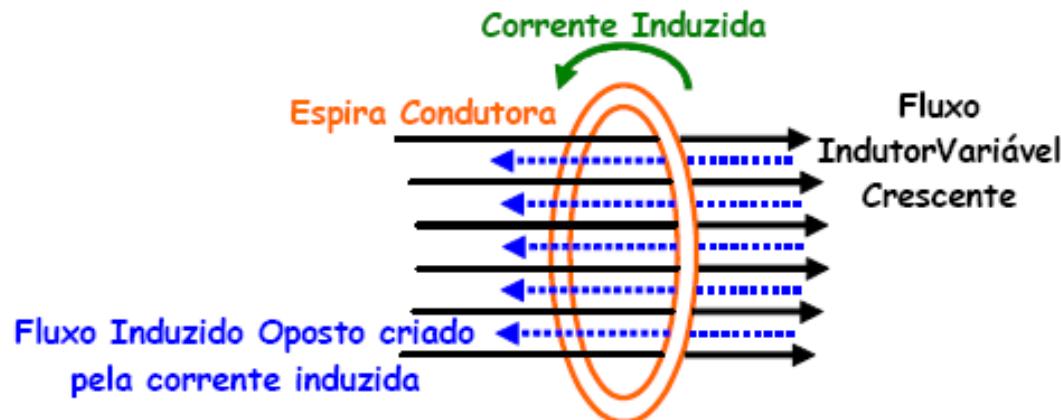


Figura 7.4 - Fluxo indutor variável crescente induz uma corrente que produz um fluxo induzido oposto.

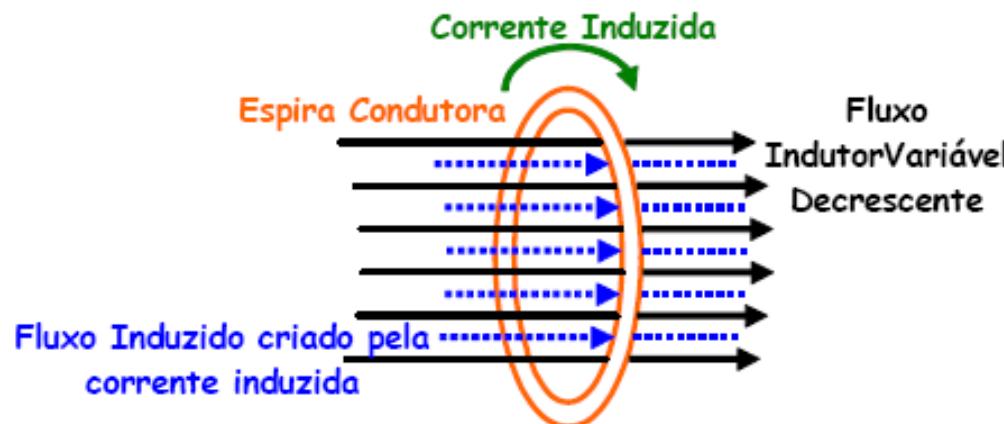
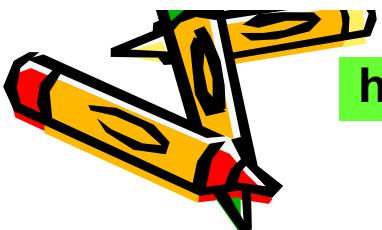


Figura 7.5 - Fluxo indutor variável decrescente induz uma corrente que produz um fluxo induzido do mesmo sentido.



<http://micro.magnet.fsu.edu/electromag/java/lenzlaw/index.html>

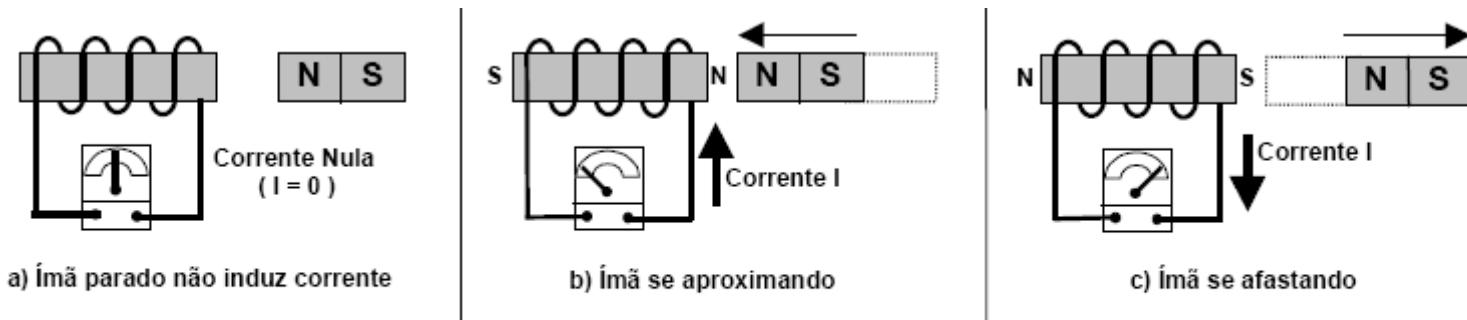


Figura 7.6 - Indução Eletromagnética

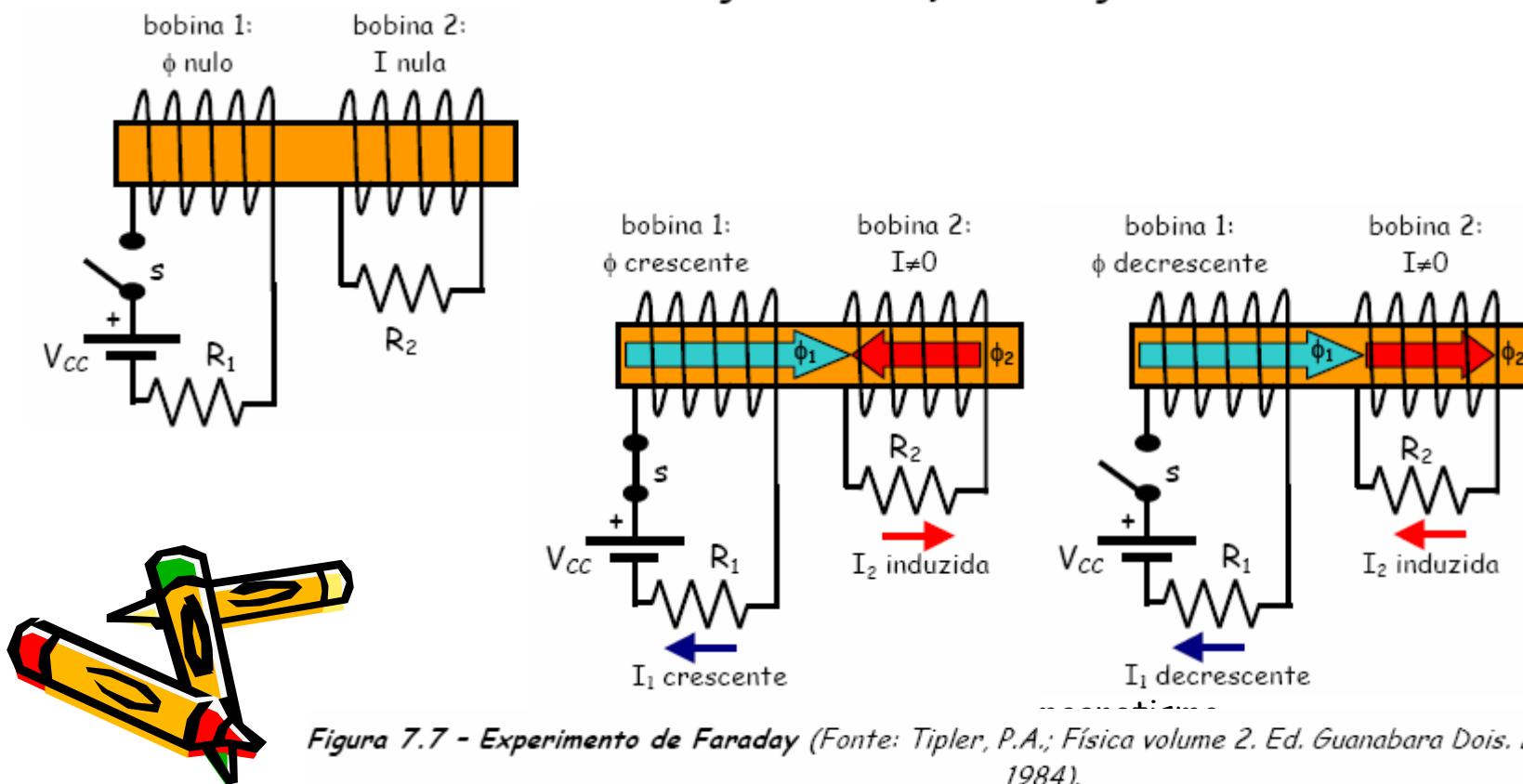


Figura 7.7 - Experimento de Faraday (Fonte: Tipler, P.A.; Física volume 2. Ed. Guanabara Dois. 2 ed. Rio de Janeiro, 1984).

2.8.1 - Tensão Induzida em Condutores que Cortam um Campo Magnético

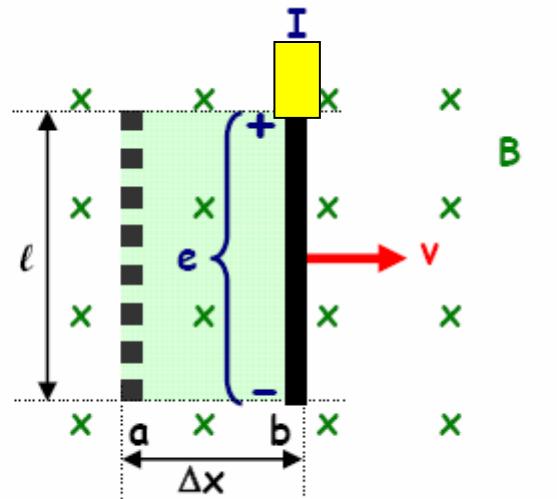
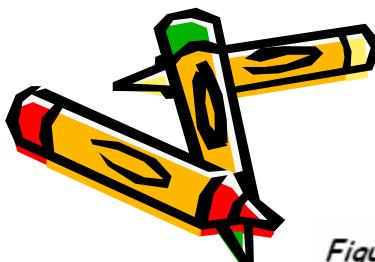


Figura 7.11 - Condutor em movimento dentro de um campo magnético induz força eletromotriz.



Disciplina de Eletromagnetismo

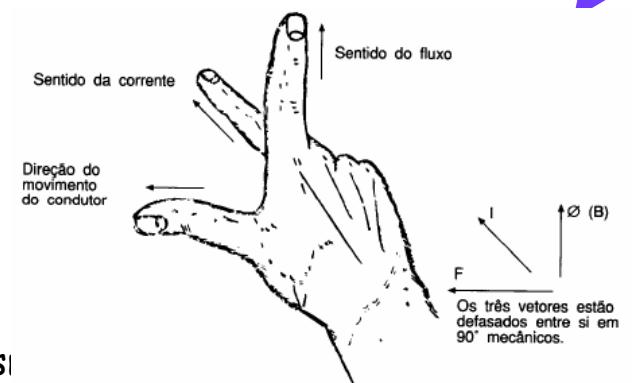


Figura 7.12 - Determinação do sentido da corrente induzida com o uso da Regra de Fleming - Ação Geradora.

Como calcular a tensão induzida?

$$\bar{e} = -B \cdot l \cdot v \cdot \sin\theta$$

onde:

\bar{e} - Força Eletromotriz induzida média num condutor que corta um campo magnético [V];

B - Densidade de Fluxo Magnético [T];

l - comprimento ativo do condutor no campo magnético [m];

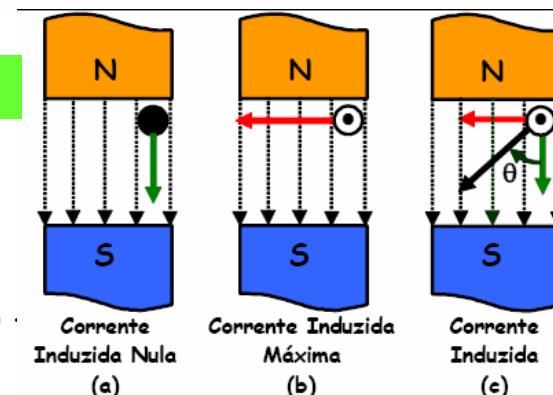
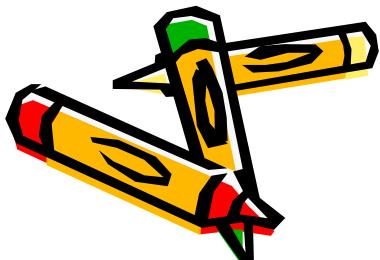
v - velocidade média do condutor [m/s];

θ - ângulo do deslocamento com as linhas de campo.

Dessa forma podemos concluir que a corrente pode ser induzida em um condutor através de três maneiras:

- a) O condutor é movido através de um campo magnético estacionário. Este princípio se aplica nos geradores de corrente contínua, por exemplo.
- b) O condutor está estacionário e o campo magnético se movimenta. Este princípio se aplica nos geradores de corrente alternada, por exemplo.
- c) O condutor e o eletroímã que gera o campo magnético estão estacionários e a corrente alternando do estado ligado para desligado causa a pulsação do campo magnético. Este princípio se aplica nas bobinas das velas de ignição nos motores dos automóveis e também nos transformadores.

http://www.walter-fendt.de/ph14e/generator_e.htm



Disciplina de Eletromagnetismo
Técnico em Eletromecânica

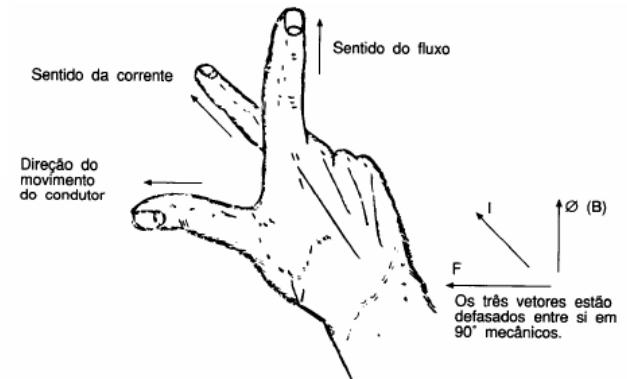
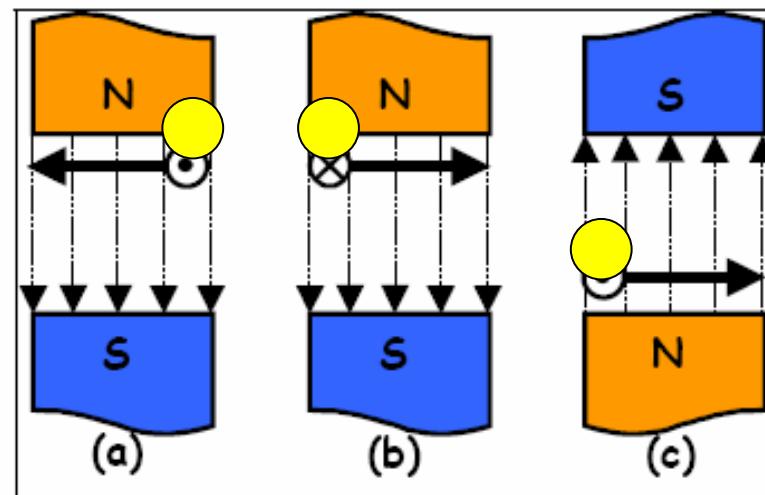


Figura 7.13 - Mudar a direção do movimento ou a polaridade do campo muda o sentido da corrente induzida.

EXEMPLOS:

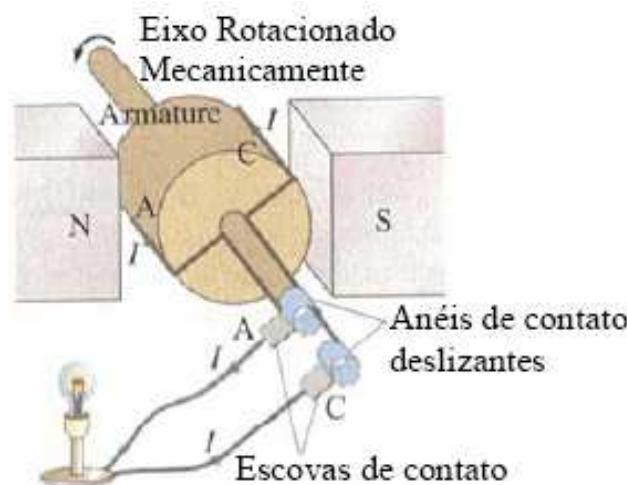
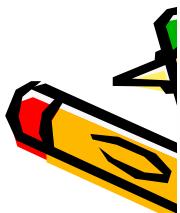


Figura 7.15 - Gerador Simplificado com campo magnético no estator e bobina indutora (armadura) no rotor.

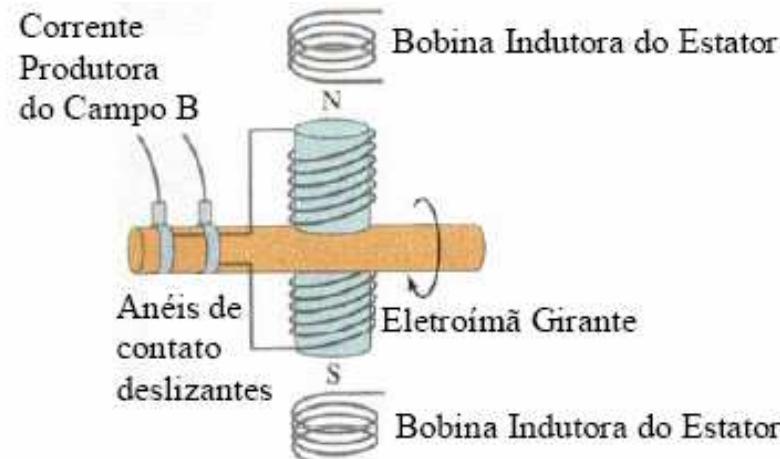


Figura 7.16 - Gerador Simplificado com campo eletromagnético girante no rotor e bobina indutora no estator.

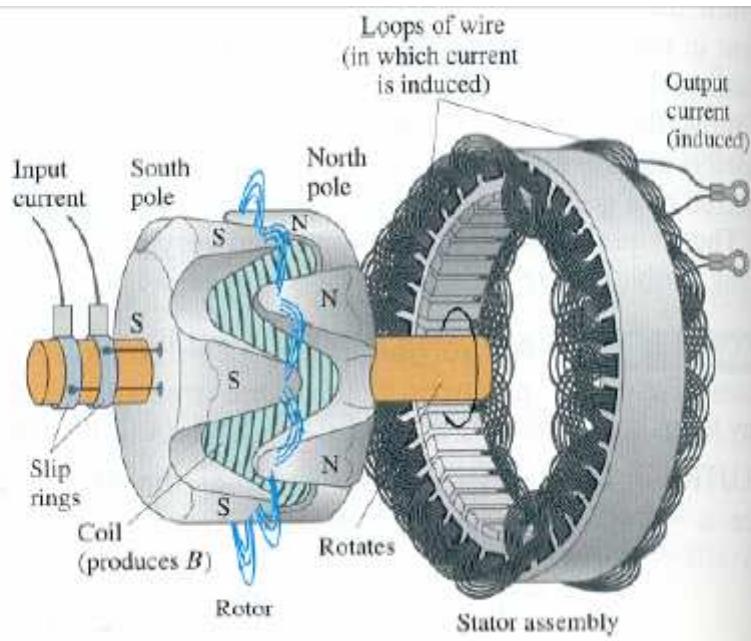
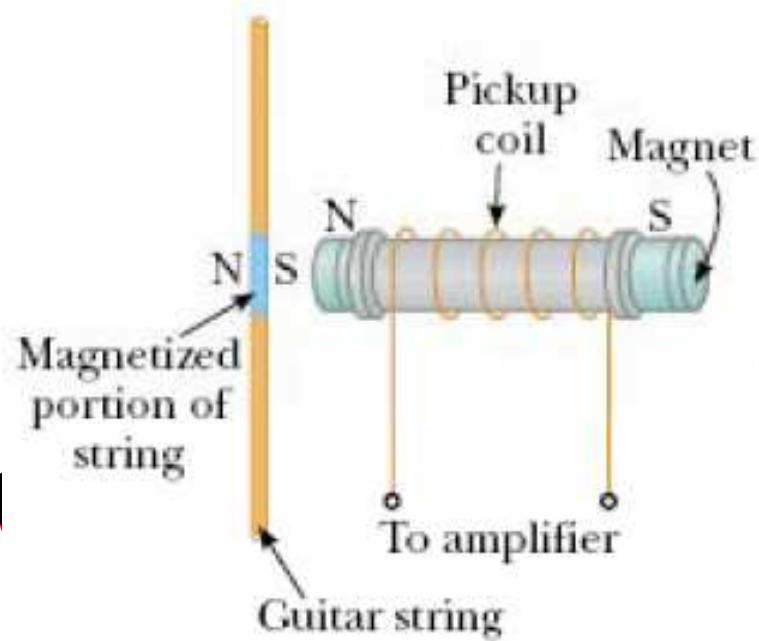
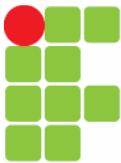


Figura 7.17 - Estrutura de um gerador comercial com campo girante no rotor e bobinas indutoras no estator.

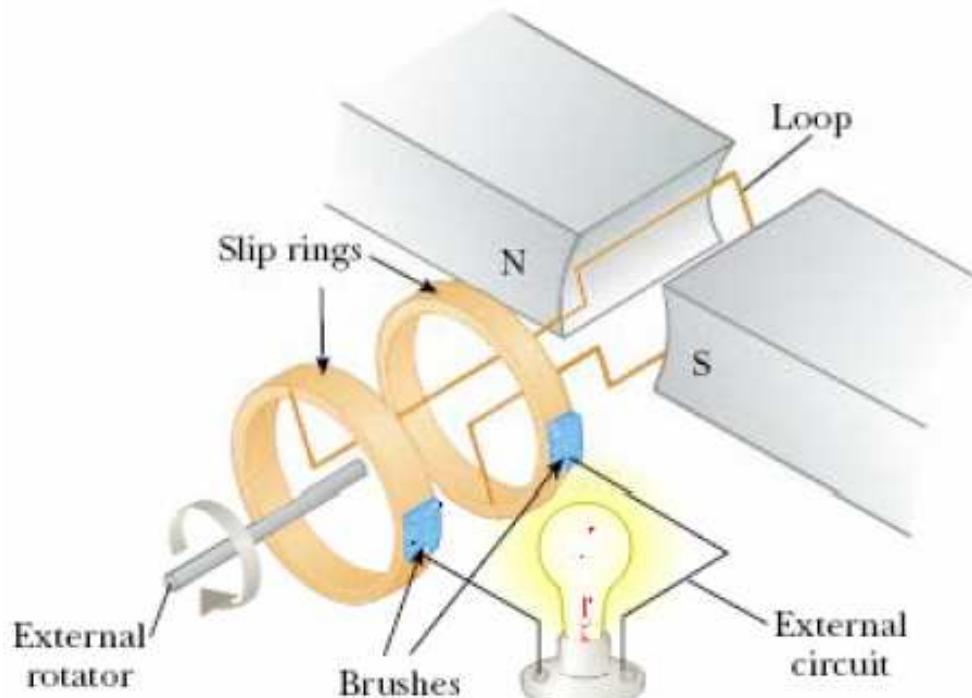


Aplicações – Guitarra elétrica

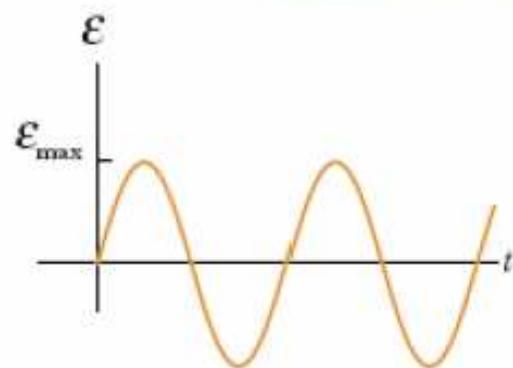
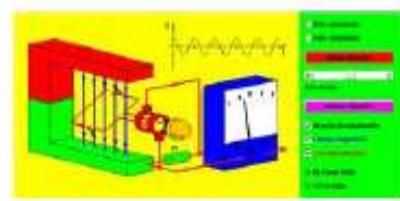




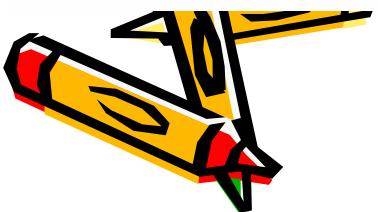
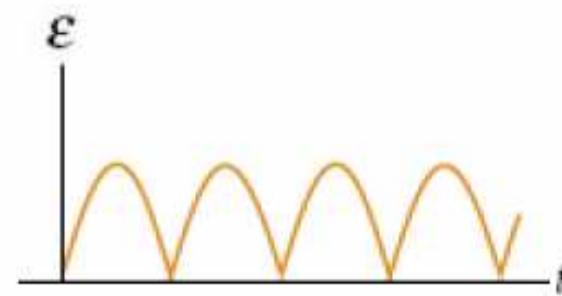
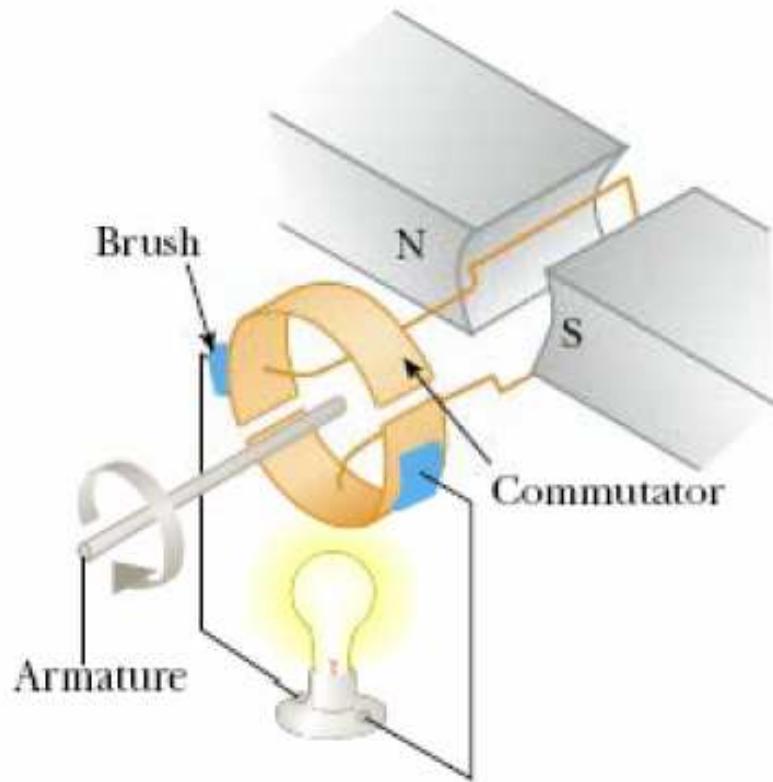
Aplicações – Geração de CA



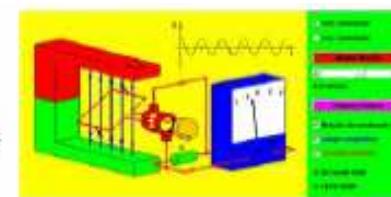
Applets em java →



Aplicações – Gerador CC

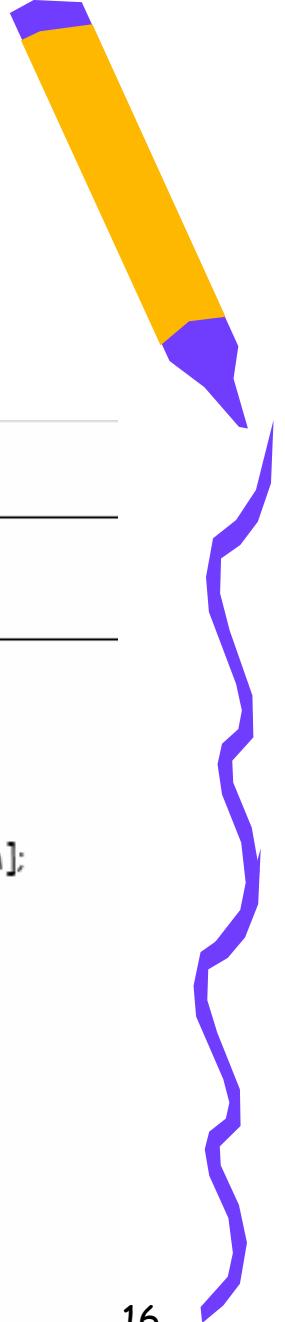


Discip
Técnica Applets em java →





2.9- Indutores



É uma **bobina** composta por um **fio** condutor isolado (geralmente fio de cobre esmaltado) **enrolado** sobre **um núcleo de ar ou de material ferromagnético** (por exemplo, ferro doce ou ferrite).

Assim, a **Indutância de um Indutor** pode ser dada pela expressão:

$$L = \frac{\mu \cdot N^2 \cdot A}{\ell}$$

Onde:

L - Indutância da bobina indutora, [Henry, H];

A - área das espiras da bobina [metros quadrados, m²];

ℓ - comprimento longitudinal da bobina, [metros, m];

μ - permeabilidade magnética do meio no núcleo da bobina [Henry por metro, H/m];

N - número de espiras

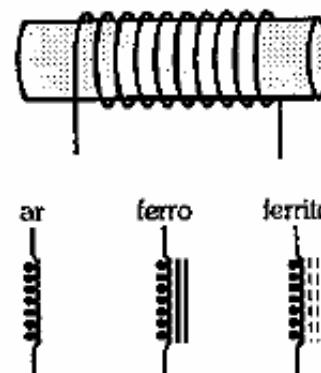
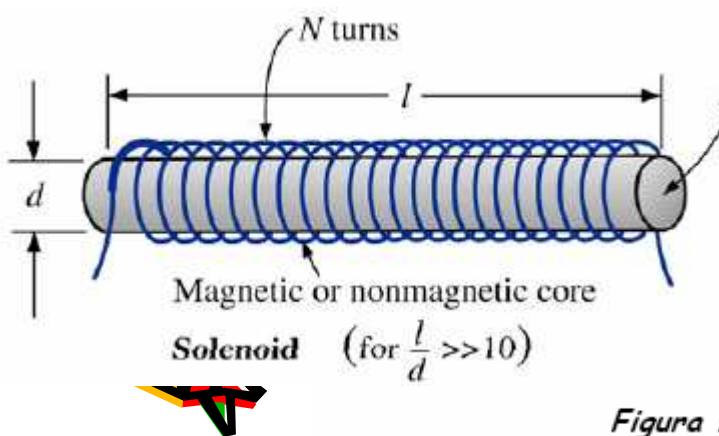


Figura 9.1 - Aparência e Símbologias dos Indutores (Fonte: Markus, 2001).

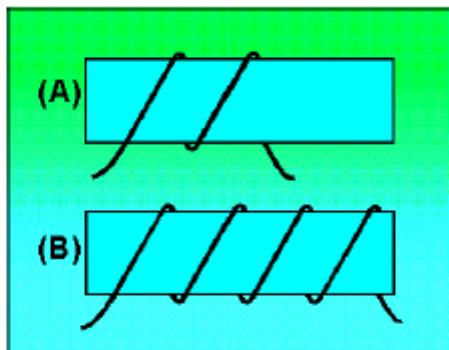


Figura 9.2 - indutor: (a) duas espiras; (b) quatro espiras.

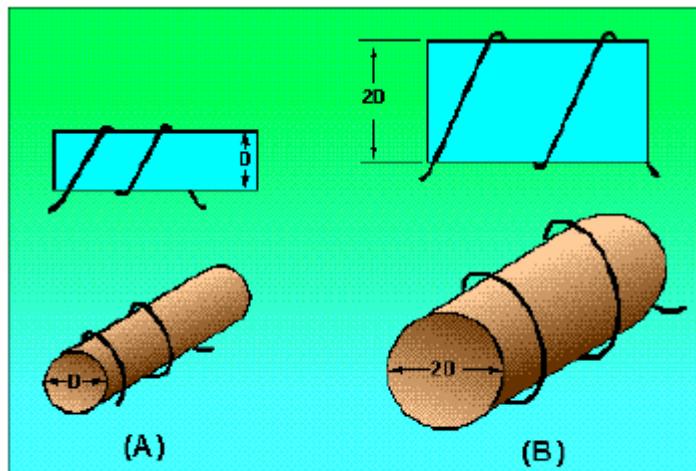


Figura 9.3 - indutor: (a) diâmetro D ; (b) diâmetro $2D$.

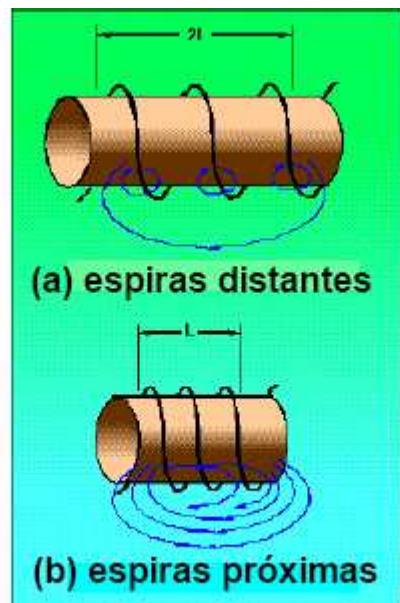


Figura 9.4 - indutor: (a) longo, bobinas espaçadas; (b) curto, bobinas próximas. gnetismo -
Técnico em Eletromecânica

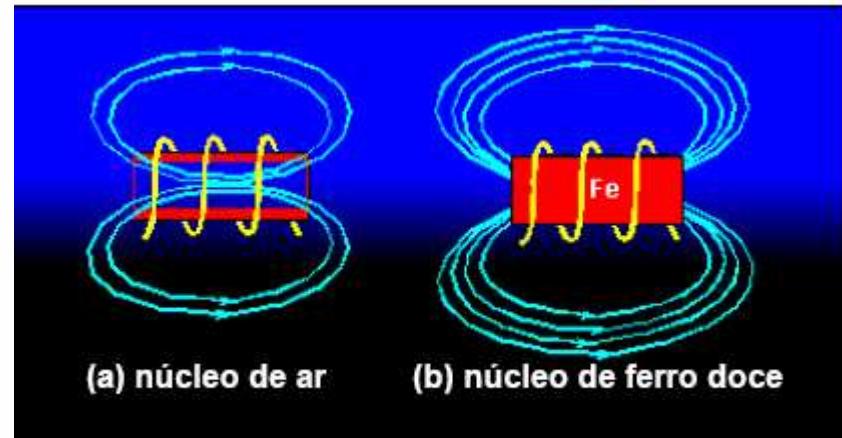
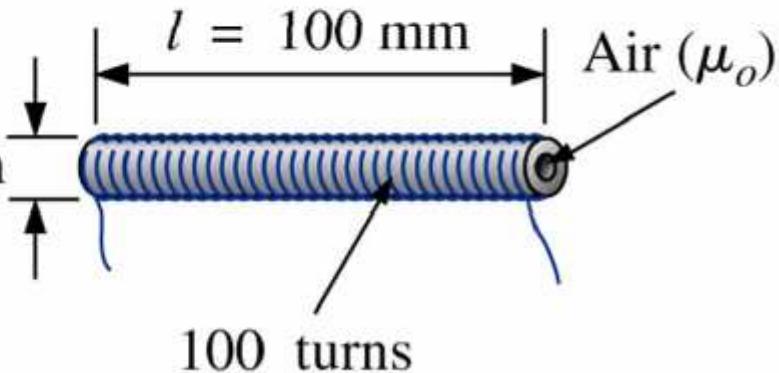


Figura 9.5 - tipo de núcleo: (a) ar; (b) ferro doce.

Exemplo 12.1: Determine a indutância da bobina de núcleo de ar da figura abaixo:

$$\mu_r = 1$$

$$d = 4 \text{ mm}$$

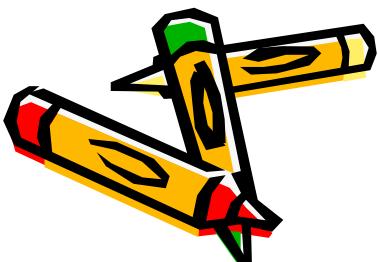


$$\mu = \mu_r \cdot \mu_o = 1 \cdot \mu_o = \mu_o$$

$$A = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot (4 \cdot 10^{-3})^2}{4}$$

$$L = \frac{N^2 \cdot \mu \cdot A}{l}$$

$$A = 12,57 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \quad L = \frac{100^2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 12,57 \cdot 10^{-6}}{0,1} = 1,58 \mu\text{H}$$



2.9.1 - Especificações de indutores

Tabela 9.1 Valores Múltiplos Padronizados de Indutores ($\text{em } \mu\text{H}$)											
1,0	1,2	1,5	1,8	2,2	2,7	3,3	3,9	4,7	5,6	6,8	8,2

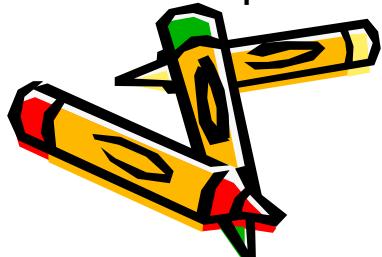
A **tolerância** dos indutores em geral varia entre $\pm 1\%$ e $\pm 20\%$.

A **Resistência Ôhmica** é a resistência imposta pelo condutor do enrolamento do indutor.

A **capacidade de corrente** máxima que pode atravessar o indutor é função da **bitola** e das **características** do **condutor** utilizado.

Tipos de indutores tais como **axiais**, **radiais**, **toroidais**, **encapsulados** e **blindados**. Geralmente os **núcleos** são de **ferrite** e em alguns casos de **ferro**.

Aplicações: os indutores têm muitas aplicações entre elas circuitos de áudio, radiofreqüência (RF), circuitos de acionamento e controle, sensores, etc.



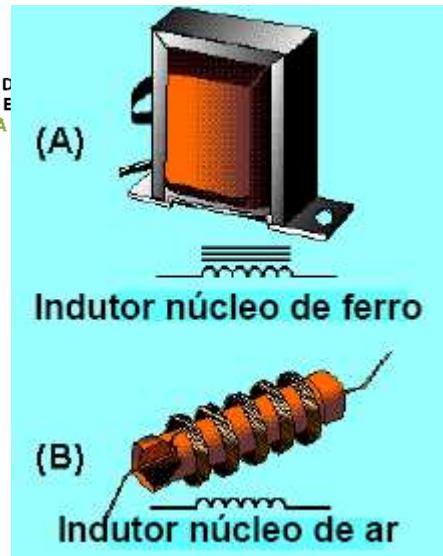


Figura 9.9 - Indutores: (a) núcleo de ferro; (b) núcleo de ar

Indutores na prática

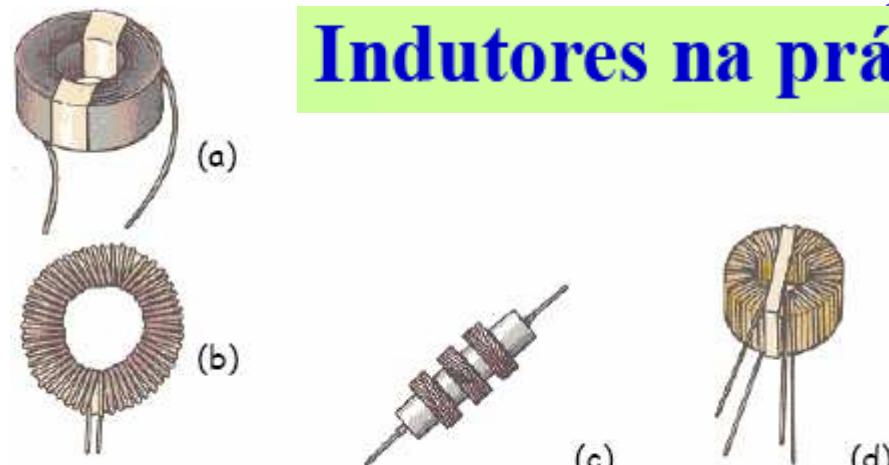


Figura 9.11 - tipos comuns de indutores (fonte: Boylestad)

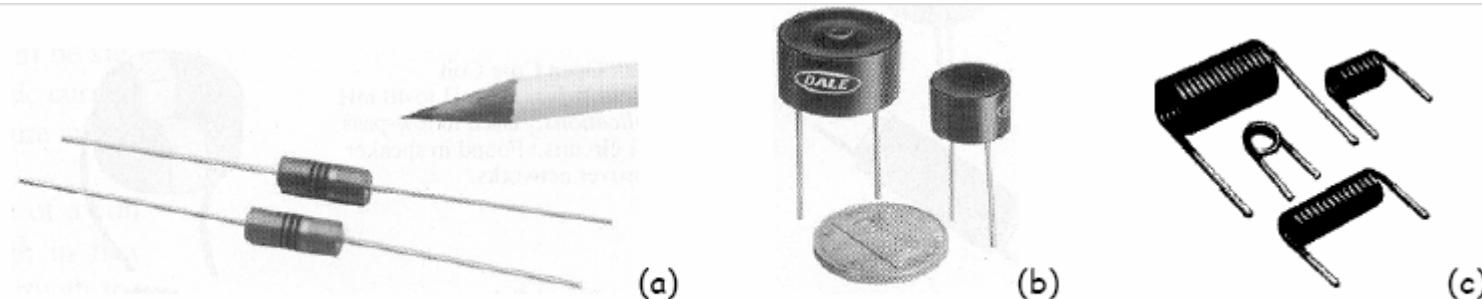
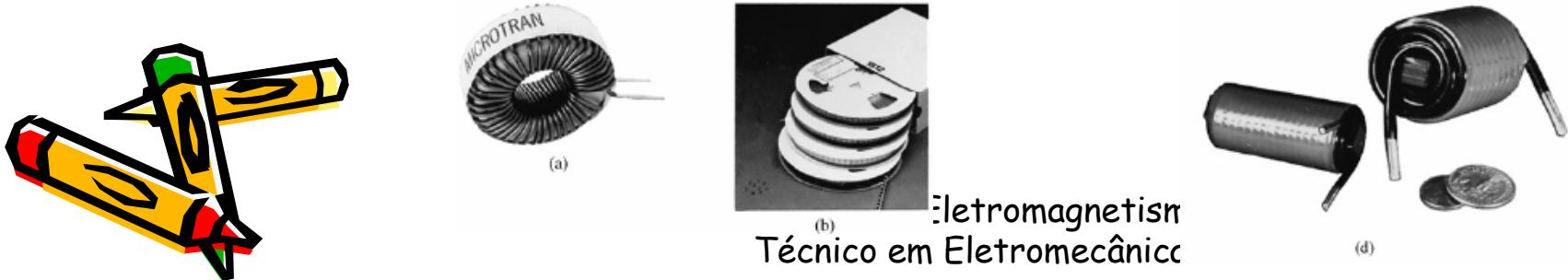


Figura 9.10 - tipos de indutores: (a) moldados axiais; (b) toroidais encapsulados; (c) núcleos de ar (fonte: Boylestad)



Eletromagnetism
Técnico em Eletromecânica

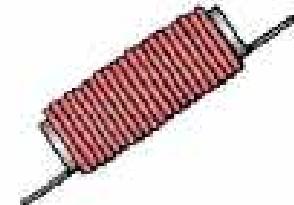
Type: Open Core Coil
Typical Values: 3 mH to 40 mH
Applications: Used in low-pass filter circuits. Found in speaker crossover networks.



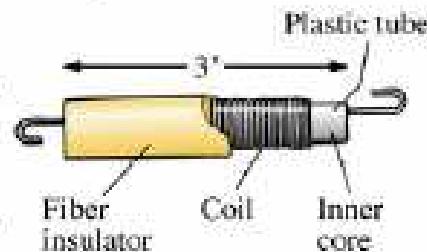
Type: Toroid Coil
Typical Values: 1 mH to 30 mH
Applications: Used as a choke in AC power lines circuits to filter transient and reduce EMI interference. This coil is found in many electronic appliances.



Type: Hash Choke Coil
Typical Values: 3 μ H to 1 mH
Applications: Used in AC supply lines that deliver high currents.



Type: Delay Line Coil
Typical Values: 10 μ H to 50 μ H
Applications: Used in color televisions to correct for timing differences between the color signal and black and white signal.



Type: Common Mode Choke Coil
Typical Values: 0.6 mH to 50 mH
Applications: Used in AC line filters, switching power supplies, battery charges and other electronic equipment.

Type: RF Chokes
Typical Values: 10 μ H to 50 μ H
Applications: Used in radio, television, and communication circuits. Found in AM, FM, and UHF circuits.



Type: Molted Coils
Typical Values: 0.1 μ H to 100 μ H
Applications: Used in a wide variety of circuit such as oscillators, filters, pass-band filters, and others.

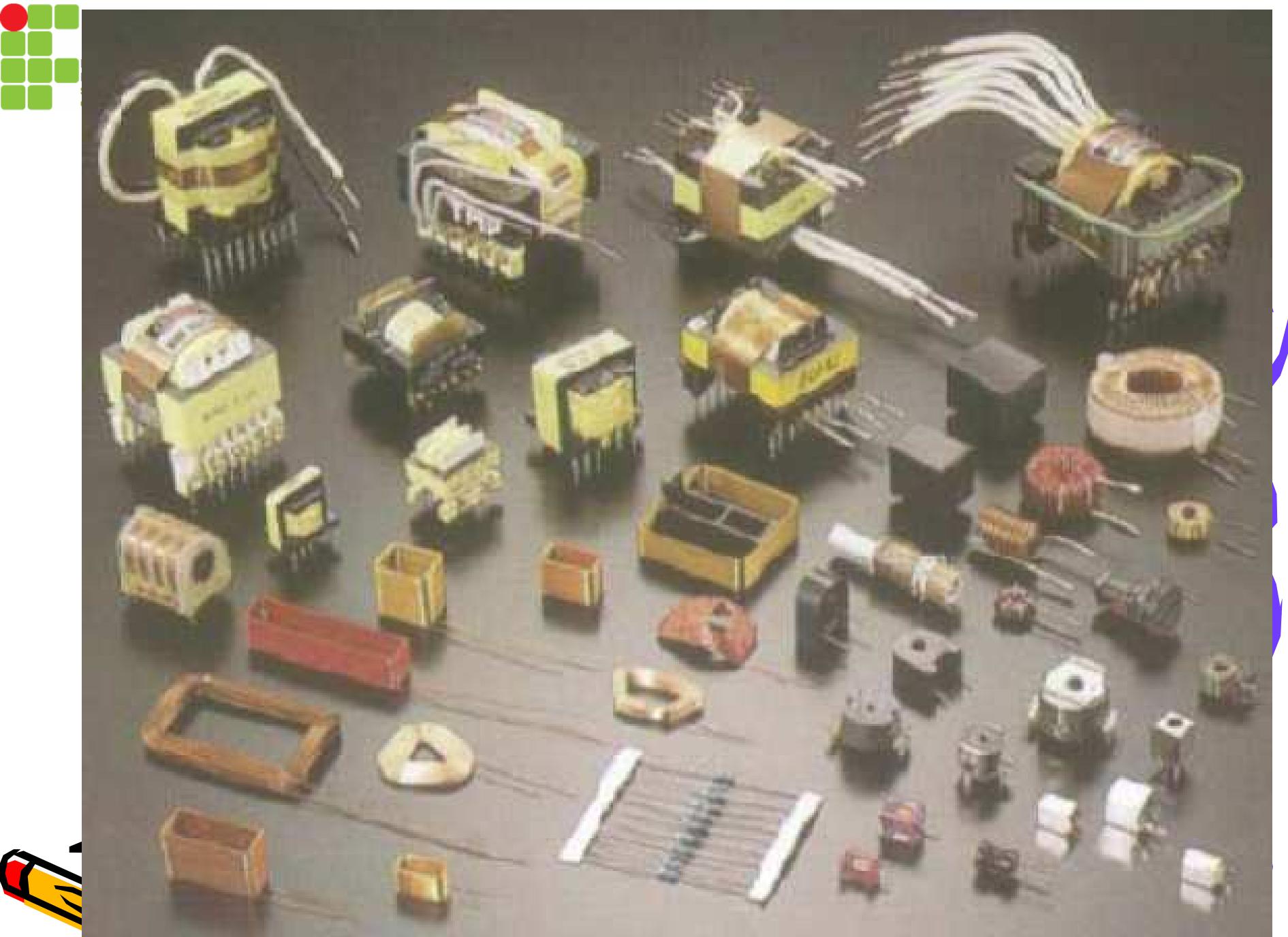


Type: Surface Mounted Inductors
Typical Values: 0.01 μ H to 100 μ H
Applications: Found in many electronic circuits that require miniature components on multilayered PCB.



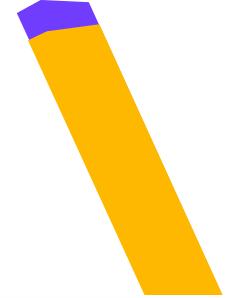
Type: Adjustable RF Coil
Typical Values: 1 μ H to 100 μ H
Applications: Variable inductor used in oscillators and various RF circuits such as CB transceivers, televisions, and radios.





TECNICO EM ELETROMECANICA

2.9.2- Associação de indutores



$$\text{Série: } L_{EQ} = \sum_{i=1}^n L_i$$

Onde:

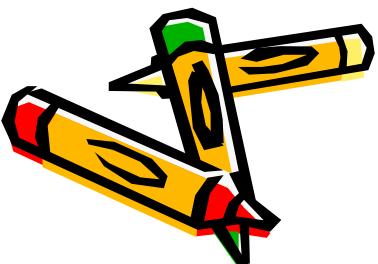
L_{EQ} - Indutância equivalente da associação, [Henry, H];

L_i - i-ésima indutância, [Henry, H];

n - número de indutâncias da associação.

A Indutância equivalente de uma associação em paralelo de n indutores é obtida pelo inverso da somatória dos inversos das i-ésimas indutâncias da associação:

$$\text{Paralelo: } \frac{1}{L_{EQ}} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{L_i} \right)$$



2.9.3- Teste de indutores:

As principais **falhas** nos indutores são:

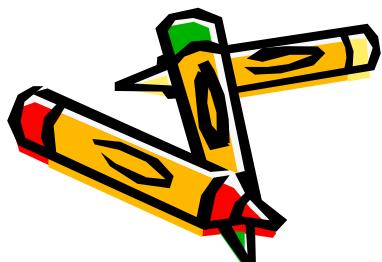
- **Curtos-circuitos** ocorridos **entre os enrolamentos** das bobinas.

VERIFICAR: Se soubermos a resistência série da bobina e esta for muito diferente da medida, está em curto. Ou com o multímetro, se houver continuidade entre a bobina e o núcleo.

- **Circuitos abertos** devido a fatores como **excessos de correntes, sobre-aquecimentos** e tempo de uso.

VERIFICAR com ohmímetro ou teste de continuidade: se a **resistência** for muito **alta** ou **não houver continuidade**, o circuito está aberto.

A indutância pode ser medida com uma **ponte LCR** (mede Indutância, Capacitância e Resistência).



2.9.4- Projeto simplificado de indutores

Bobinas longas:

$$L = \frac{\mu \cdot N^2 \cdot A}{\ell}$$



$$N = \sqrt{\frac{L \cdot \ell}{\mu \cdot A}}$$

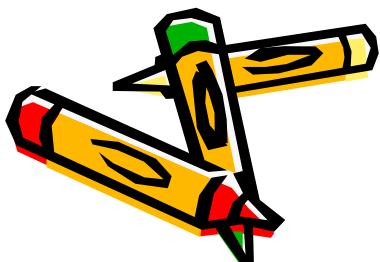
N - número de espiras da bobina indutora

L - Indutância da bobina indutora, [Henry, H];

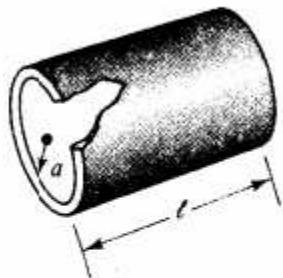
A - área das espiras da bobina (área do núcleo), [metro quadrado, m²];

ℓ - comprimento longitudinal da bobina, [metro, m];

μ - permeabilidade magnética do meio no núcleo da bobina [Henry por metro, H/m];



Bobina de camada única com núcleo de ar:



$$N = \sqrt{\frac{L \cdot (9 \cdot a + 10 \cdot l)}{39,5 \cdot a^2}}$$

N - número de espiras da bobina indutora;

L - indutância desejada para o indutor, [Micro Henry, μH];

l - comprimento longitudinal da bobina [metro, m];

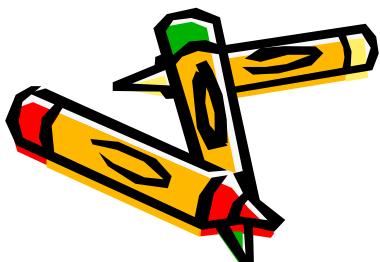
a - raio do núcleo (raio das espiras), [metro, m]

Single-Layer Air Coil Calculator

Enter L, D and d (all three are required) to calculate I and N.

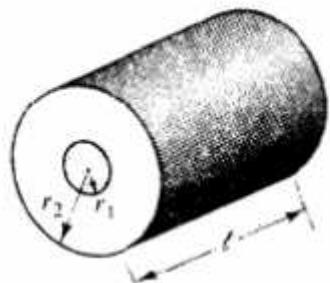
Inductance (L):	<input type="text"/>	nH
Coil Diameter (D):	<input type="text"/>	inches
Wire Diameter (Turn Step) (d):	<input type="text"/>	inches
<input type="button" value="Calculate"/>		<input type="button" value="Clear Form"/>
Coil Length (l):	<input type="text"/>	inches
Number of Turns (N):	<input type="text"/>	

<http://www.pronine.ca/coilcal.htm>





Bobina de diversas camadas com núcleo de ar:



$$N = \sqrt{\frac{L \cdot (6r_1 + 9\ell + 10(r_2 - r_1))}{31,6 \cdot r_1^2}}$$

N - número de espiras da bobina indutora;

L - indutância desejada para o indutor, [Micro Henry, μH];

ℓ - comprimento longitudinal da bobina, [metro, m];

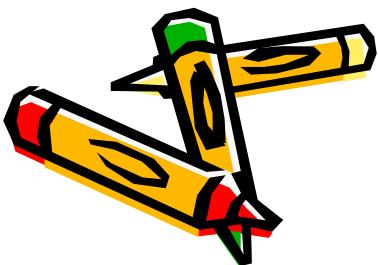
r_1 - raio interno da bobina (raio das espiras interiores), [metro, m];

r_2 - raio externo da bobina (raio das espiras exteriores), [metro, m].

Multilayer Air Core Inductor Calculator

Enter L, d, l and Wire Gauge (all four are required) to calculate multilayer inductor data.

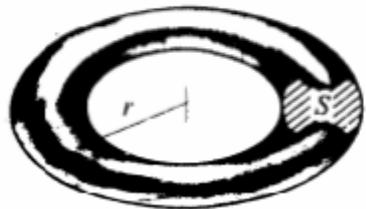
Inductance (L):	10	μH
Coil Inner Diameter (d):	10	mm
Coil Length (l):	10	mm
Wire Gauge:	18	AWG
<input type="button" value="Calculate"/>		<input type="button" value="Clear form"/>
Number of Turns (N):	33	
Turns per Layer:	9.42	
Number of Layers:	3.5	
Coil Outer Diameter (D):	18.49	mm



<http://www.pronine.ca/multind.htm>



Núcleos toroidais:



$$N = \sqrt{\frac{2 \cdot \pi \cdot r \cdot L}{\mu \cdot A}}$$

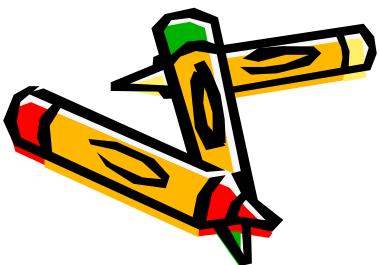
N - número de espiras da bobina indutora;

L - indutância desejada para o indutor, [Henry, H];

r - raio médio do toroide¹⁴, [metro, m];

μ - permeabilidade magnética do material do núcleo, [Henry por metro, H/m];

A - área da seção transversal do núcleo toroide (área das espiras da bobina), [metro quadrado, m²]





Projeto de um indutor

Tarefa:

- Indutância: $L = 100 \text{ a } 500 \mu\text{H}$, definida como:

$$L = 100 \mu + \frac{\text{Final da matrícula}}{30000} \cdot 50$$

- Núcleo de ar;
- Diâmetro: livre, conforme o carretel ou molde;
- Comprimento: livre;
- Número de camadas: livre;
- Corrente: $I = 1 \text{ A}$;
- Área do condutor: conforme tabela no site, para corrente especificada;
- Individual;
- Relatório deve conter no mínimo:
 - Capa, sumário, introdução, desenvolvimento (projeto), ensaios, foto, conclusão, referências bibliográficas, etc.

Exemplo:

- Matrícula: 081203104-5

- $L = 100 \mu + \frac{31045}{30000} \cdot 50 = 151,7 \mu\text{H}$

