

## 2.7- Variação do Fluxo Magnético ( $\phi$ )

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

$$\phi = B \cdot A \cdot \text{sen}\theta$$

B - vetor densidade de campo magnético [T]

A - área de incidência das linhas [m<sup>2</sup>]

$\theta$  - ângulo de incidência das linhas de campo com a superfície [° ou rad]

$\phi$  - Fluxo Magnético [Wb]

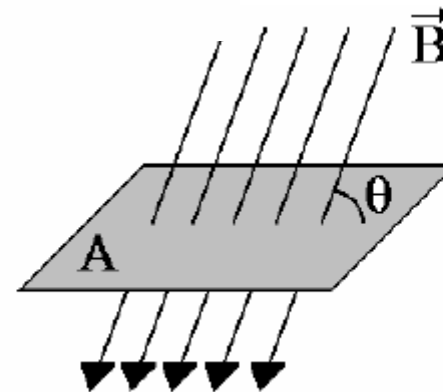


Figura 6.1 - Linhas de Campo Magnético atingindo uma superfície produzem fluxo magnético

## Formas para se variar o fluxo magnético:

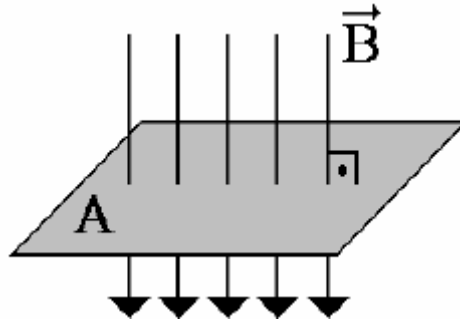


Figura 6.3 – **Fluxo Máximo**: Linhas de Campo Magnético incidindo **perpendicularmente** à superfície.

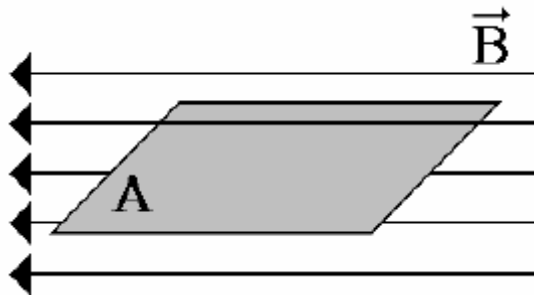
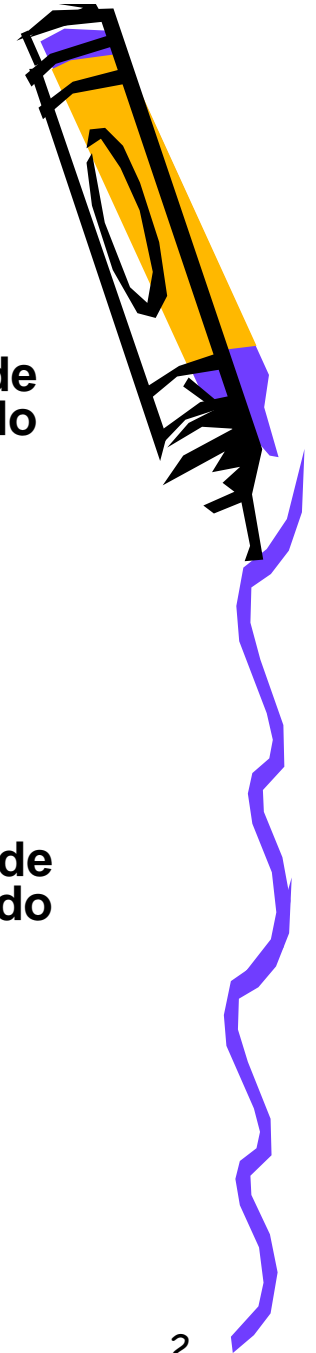


Figura 6.4 – **Fluxo Nulo**: Linhas de Campo Magnético incidindo **paralelamente** à superfície.



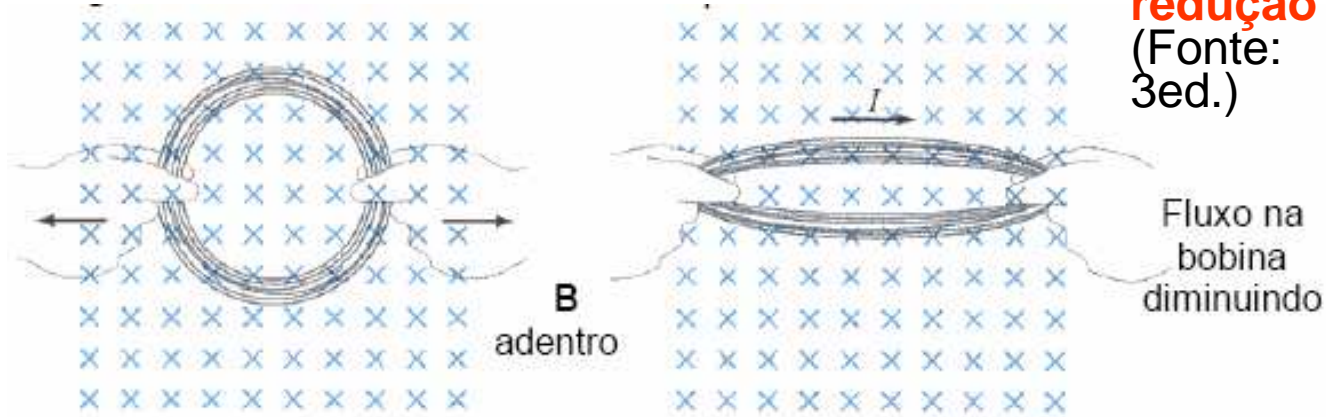


Figura 6.5 –  
variação de fluxo  
magnético pela  
**redução** da área  
(Fonte: Giancoli,  
3ed.)

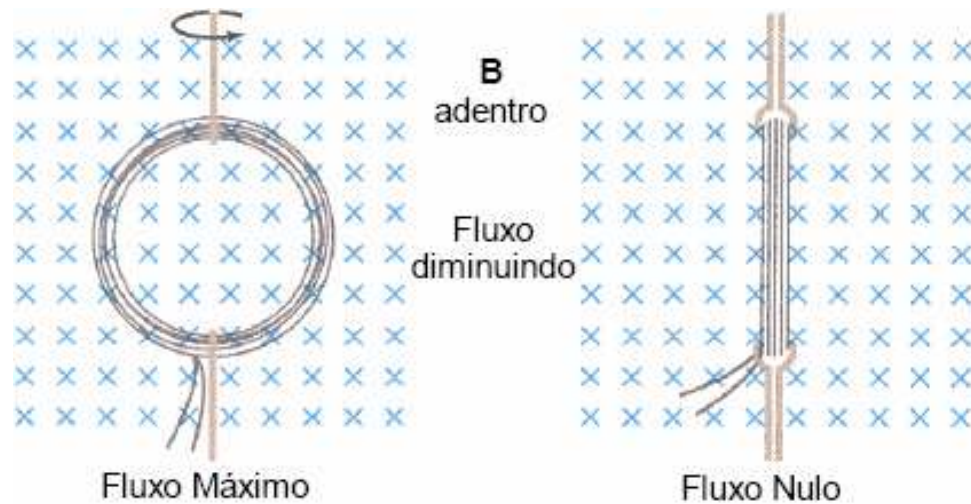
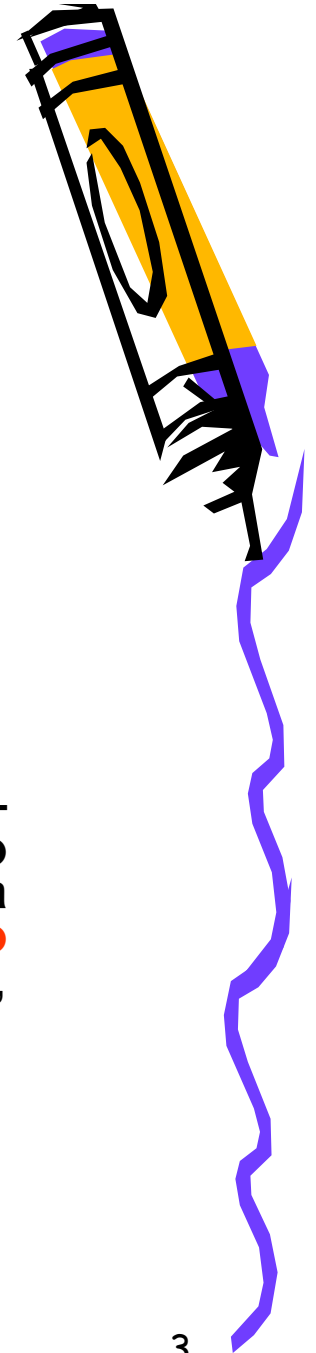


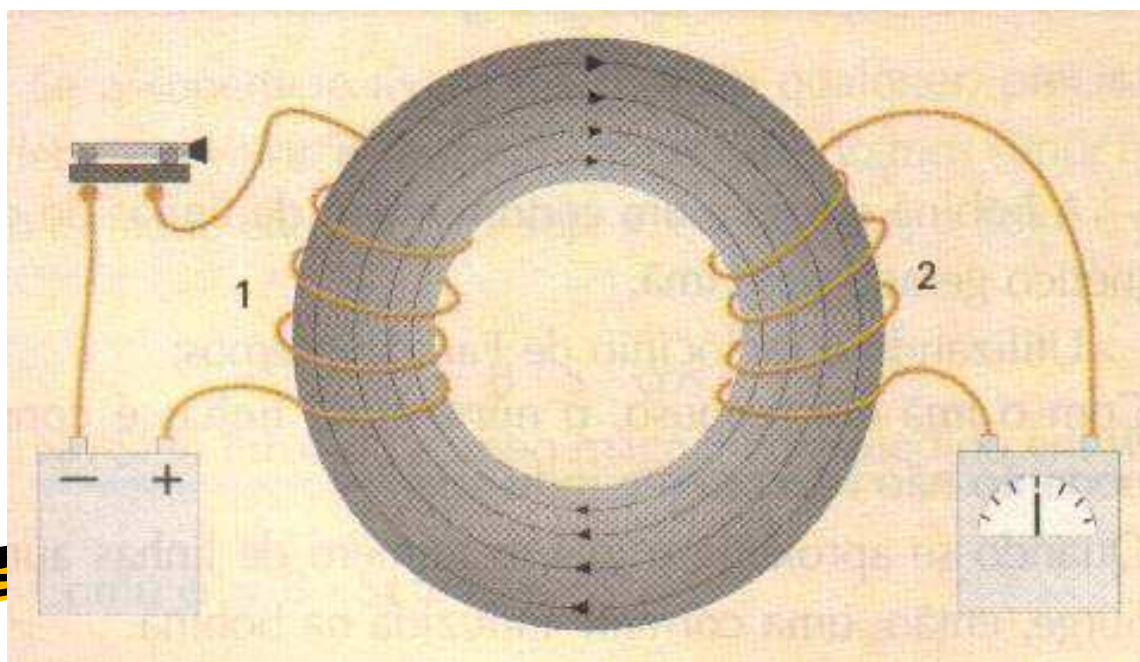
Figura 6.6 –  
variação do fluxo  
magnético numa  
**bobina girando**  
(Fonte: Giancoli,  
3ed.)



## 2.8- Indução Eletromagnética

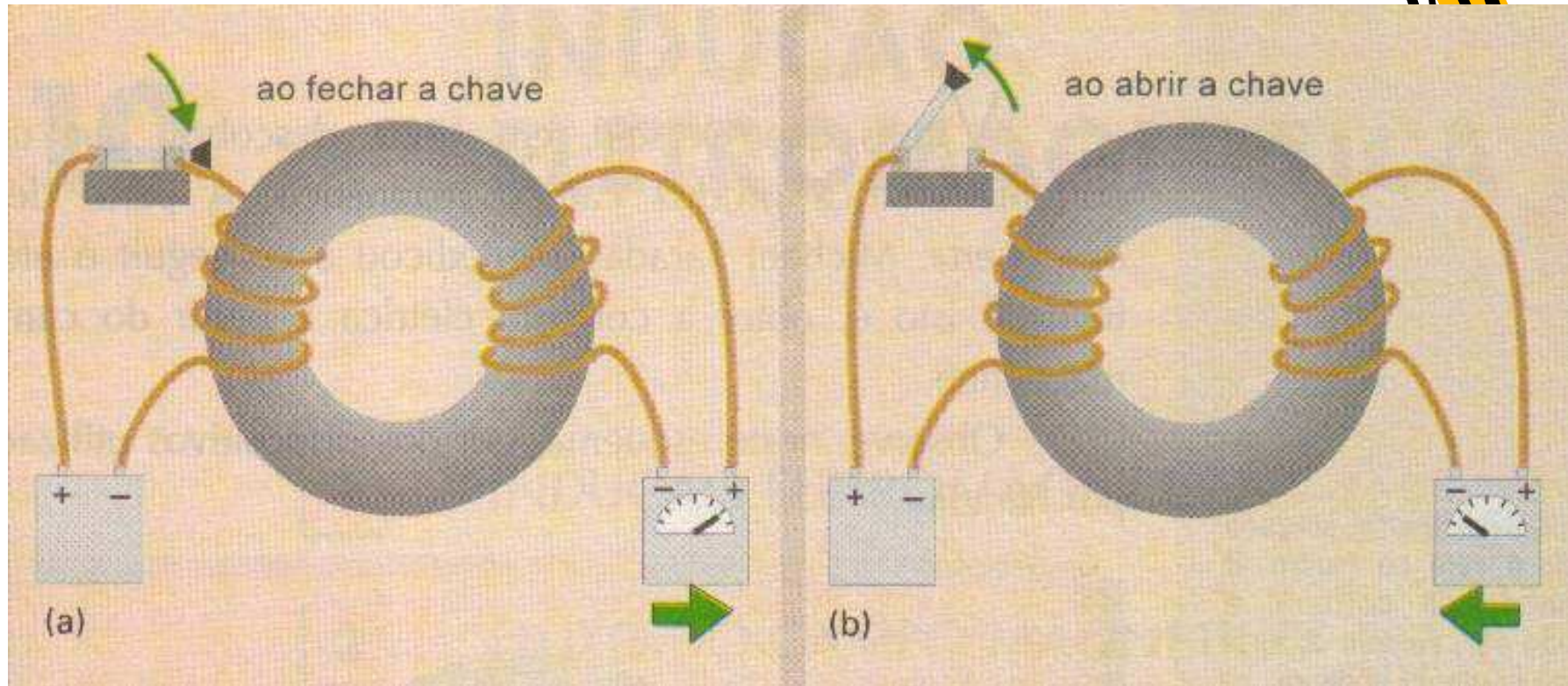
Em 1819 Oersted descobriu que uma **corrente elétrica** produz **campo magnético**.

A partir dessa descoberta, 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 7.1 –  
Circuito para  
o  
Experimento  
de Faraday**  
(Fonte:  
Chiquetto,  
1996).





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



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

## LEI DE FARADAY

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

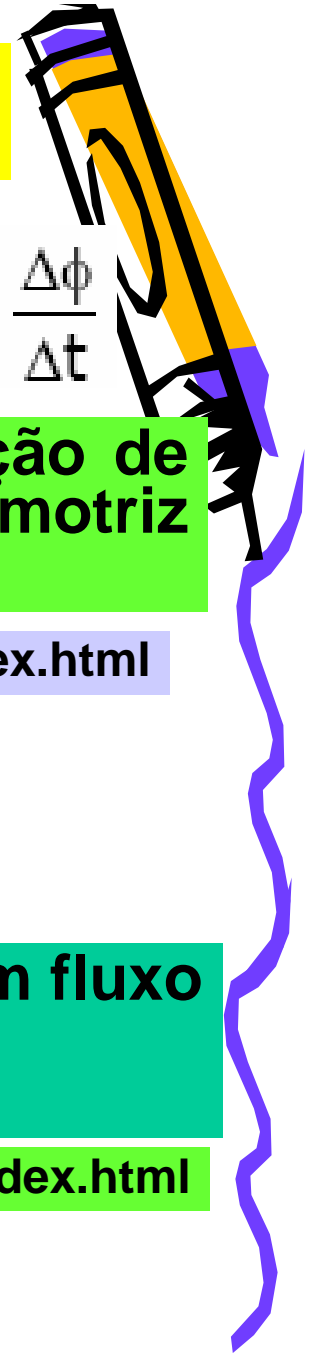
Em todo condutor enquanto sujeito a uma variação de fluxo magnético é estabelecida uma força eletromotriz (tensão) induzida.

<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.

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



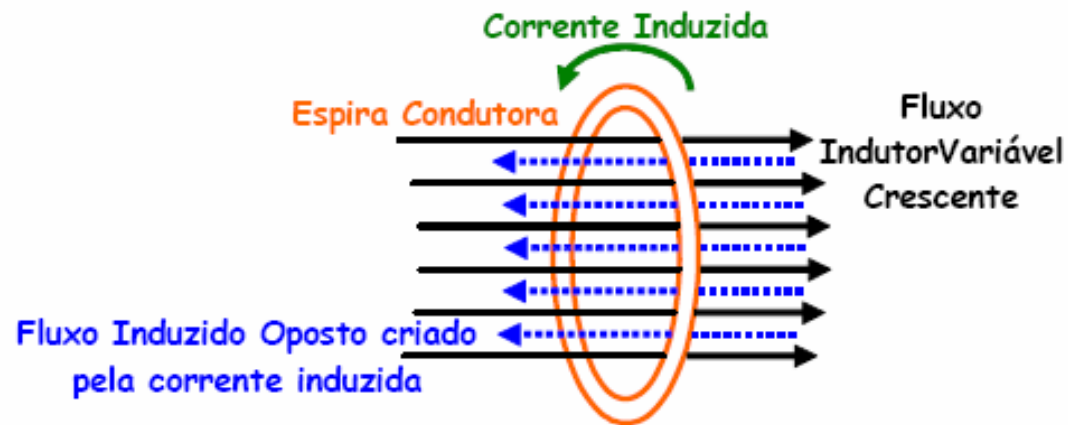


Figura 7.4 - Fluxo indutor variável crescente induz uma corrente que produz um fluxo induzido oposto.

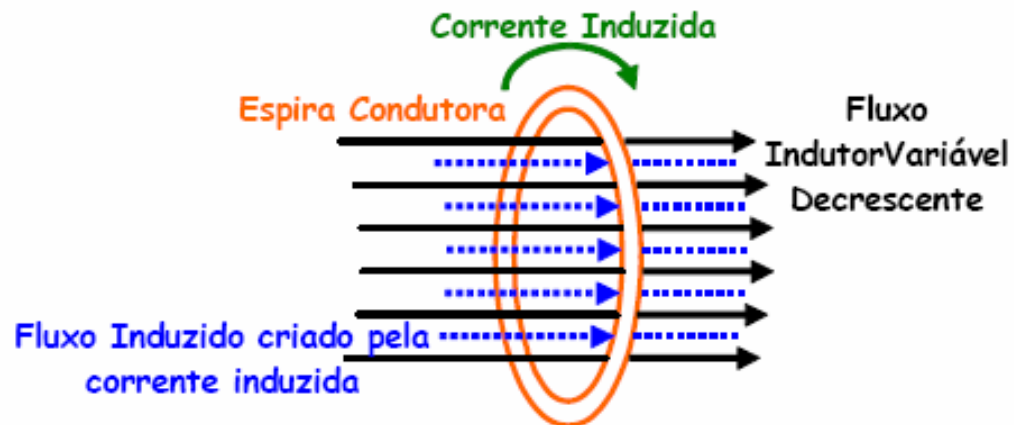
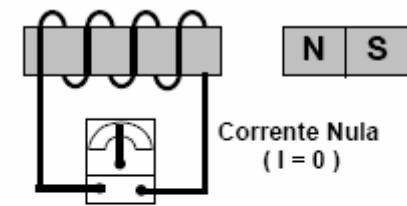
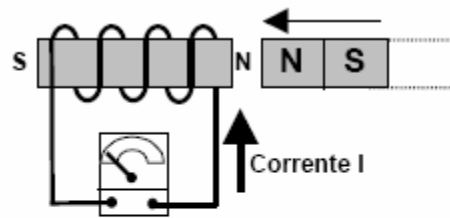


Figura 7.5 - Fluxo indutor variável decrescente induz uma corrente que produz um fluxo induzido de mesmo sentido.

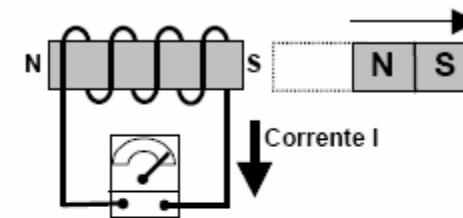




a) Ímã parado não induz corrente



b) Ímã se aproximando



c) Ímã se afastando

Figura 7.6 - Indução Eletromagnética

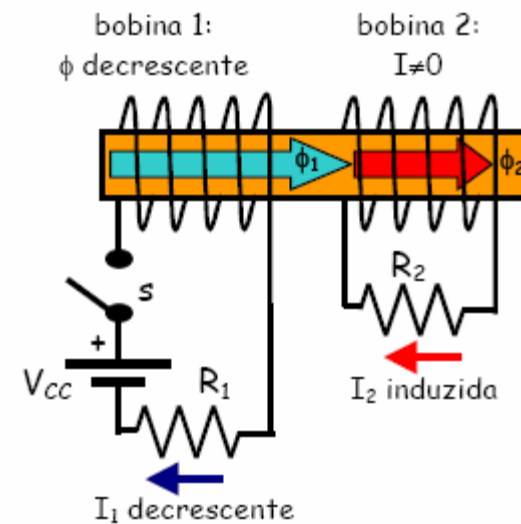
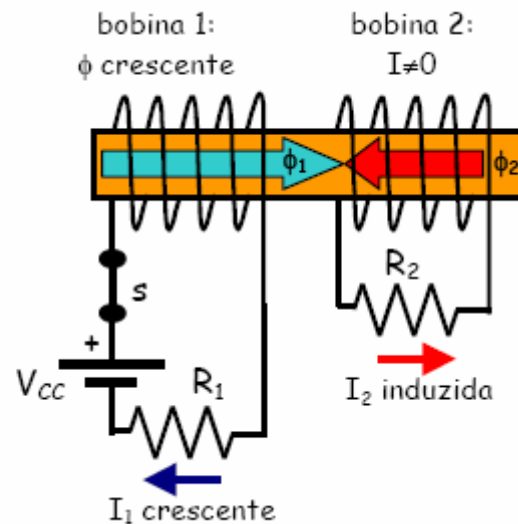
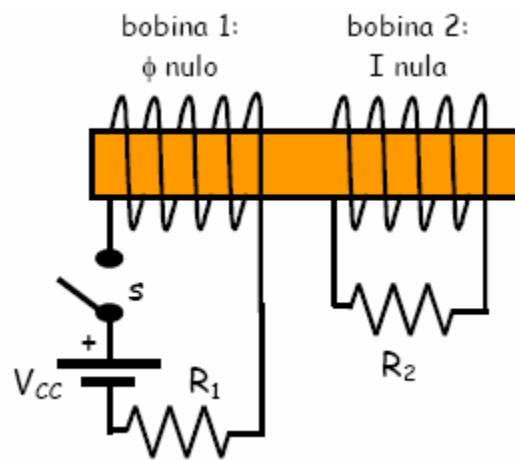


Figura 7.7 - Experimento de Faraday (Fonte: Tipler, P.A.; Física volume 2. Ed. Guanabara Dois. 2 ed. Rio de Janeiro, 1984).



## 2.8.1- Tensão Induzida em Condutores que Cortam um Campo Magnético

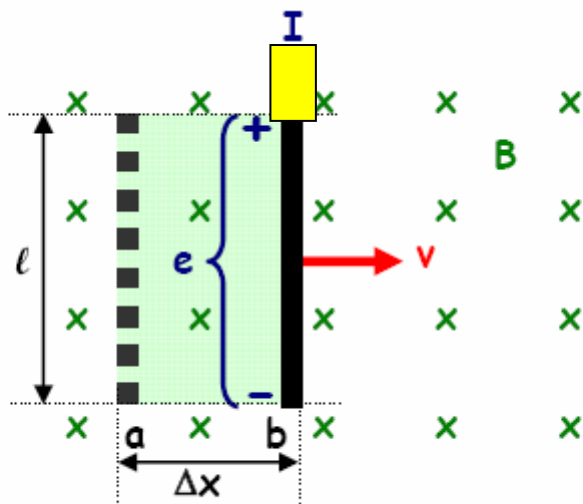


Figura 7.11 - Condutor em movimento dentro de um campo magnético induz força eletromotriz.

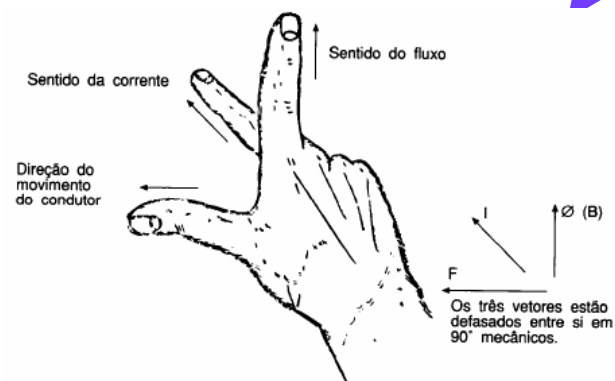
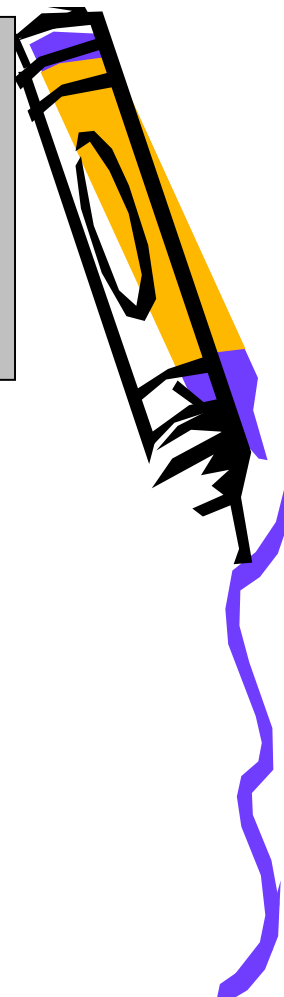


Figura 7.12 - Determinação do sentido da corrente induzida com o uso da Regra de Fleming - Ação Geradora.



# Como calcular a tensão induzida?



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

onde:

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

B - Densidade de Fluxo Magnético [T];

$\ell$  - comprimento ativo do condutor no campo magnético [m];

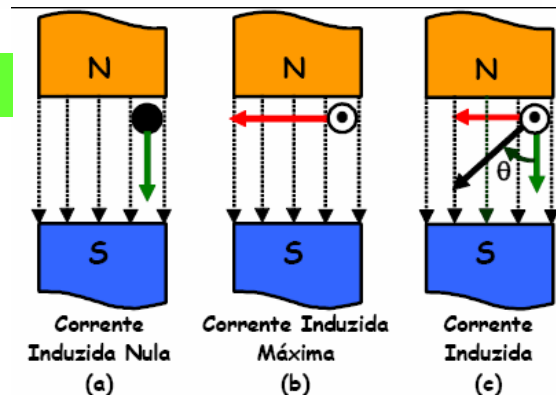
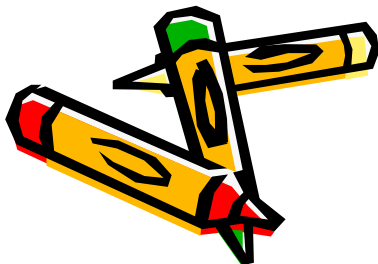
v - velocidade média do condutor [m/s];

$\theta$  - 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:

- O condutor é movido através de um campo magnético estacionário. Este princípio se aplica nos geradores de corrente contínua, por exemplo.
- O condutor está estacionário e o campo magnético se movimenta. Este princípio se aplica nos geradores de corrente alternada, por exemplo.
- 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](http://www.walter-fendt.de/ph14e/generator_e.htm)



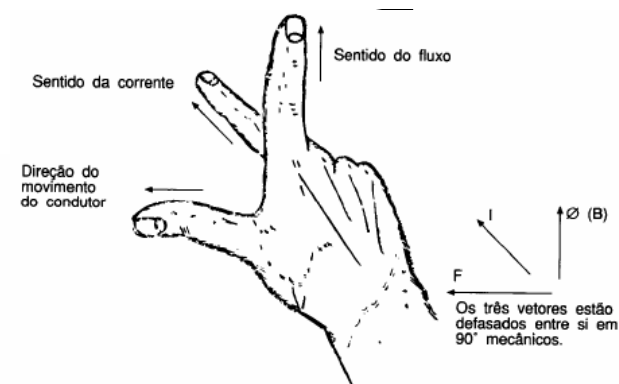
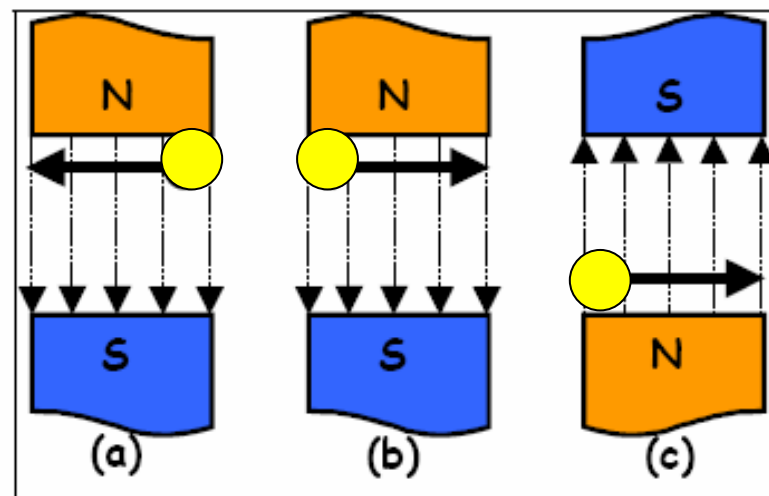


Figura 7.13 - Mudar a direção do movimento ou a polaridade do campo muda o sentido da corrente induzida.

## EXEMPLOS:

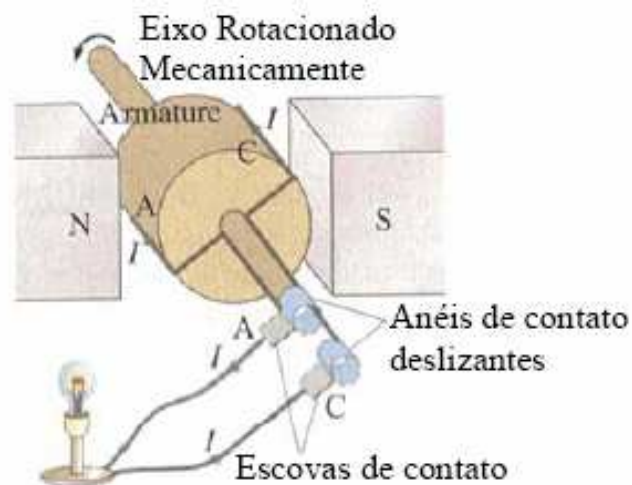
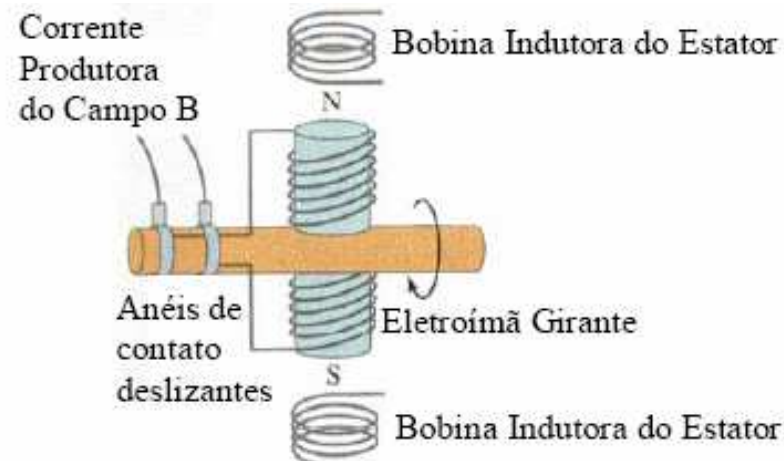
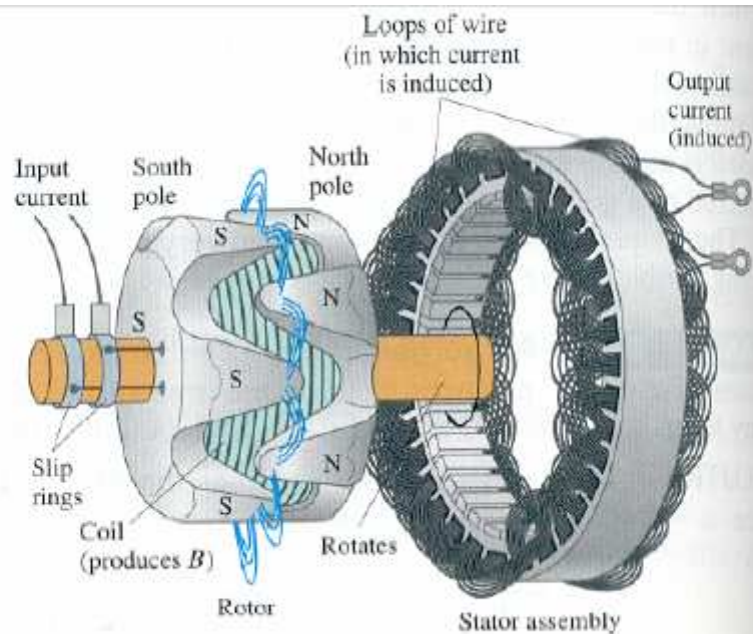


Figura 7.15 - Gerador Simplificado com campo magnético no estator e bobina indutora (armadura) no rotor.



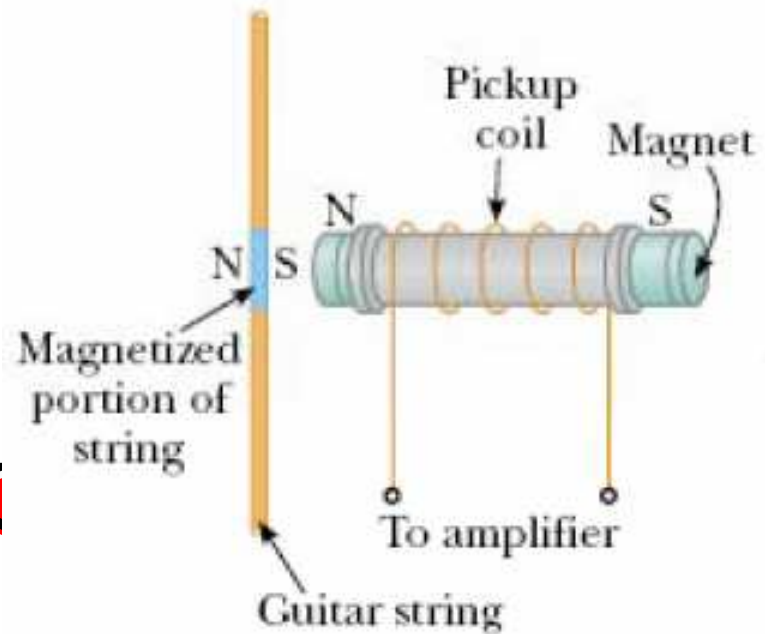
*Figura 7.16 - Gerador Simplificado com campo eletromagnético girante no rotor e bobina indutora no estator.*



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

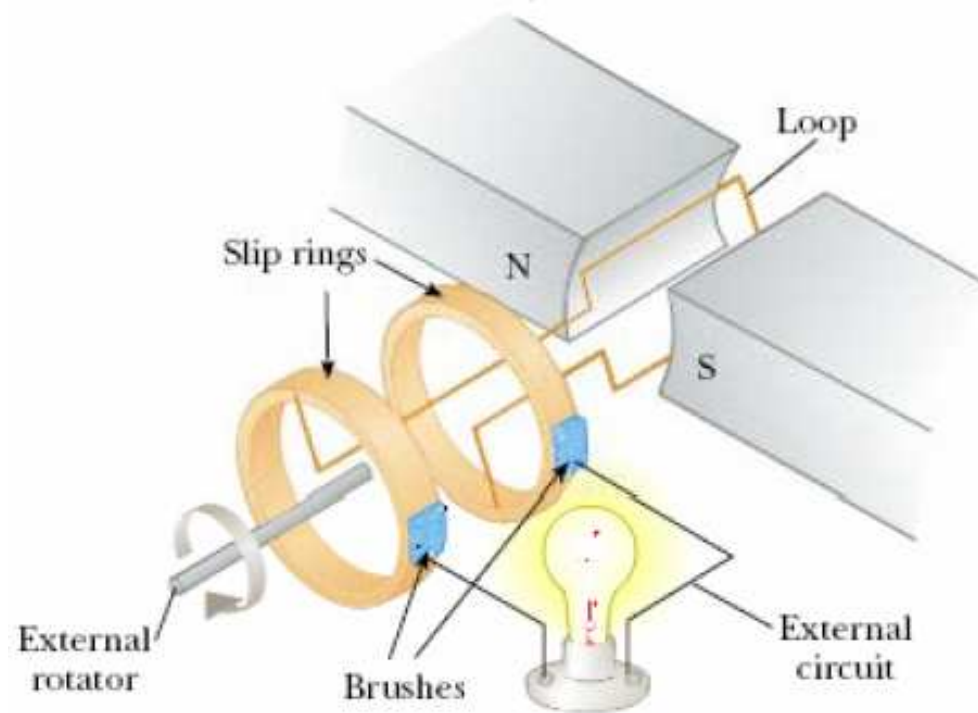


## Aplicações – Guitarra elétrica

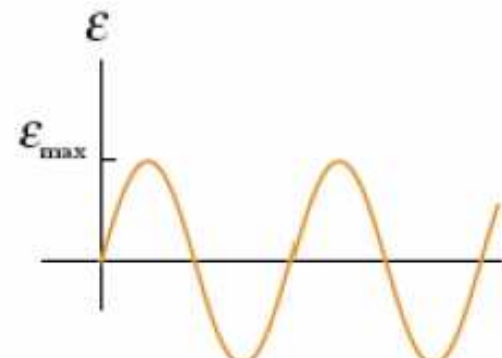
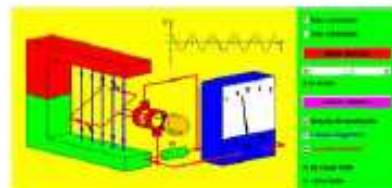




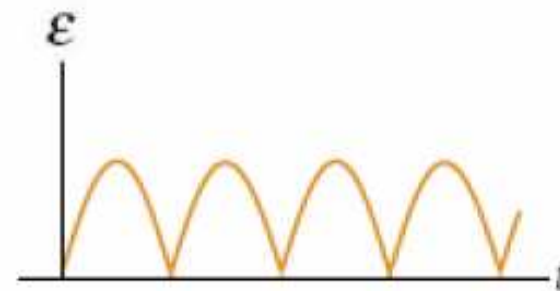
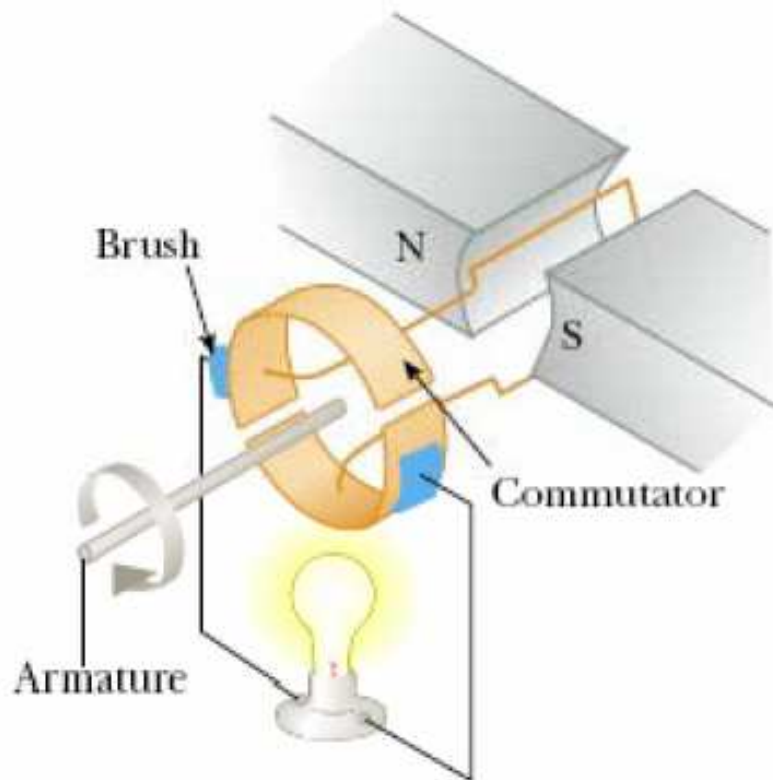
## Aplicações – Geração de CA



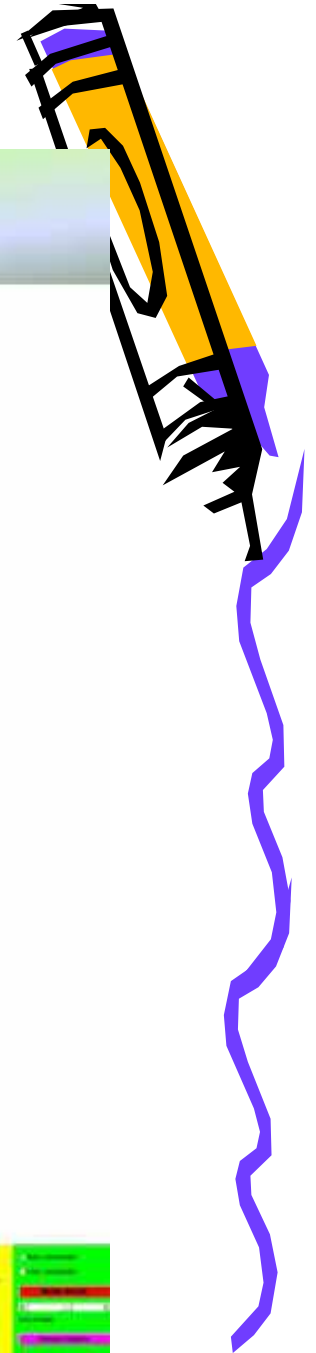
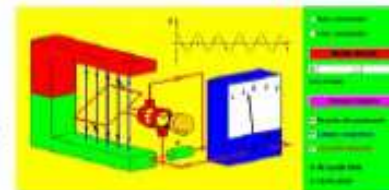
Applets em java →



## Aplicações – Gerador CC



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, m<sup>2</sup>];

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

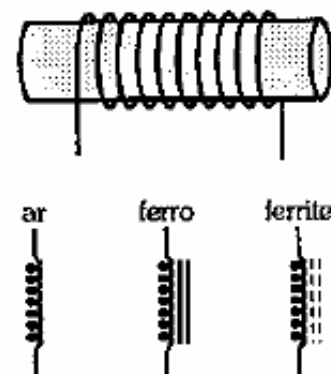
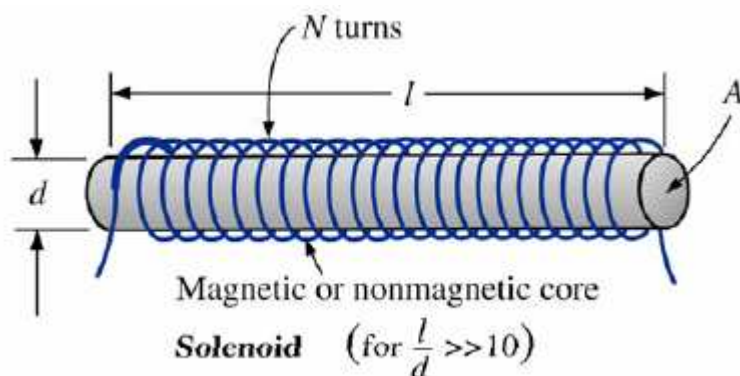
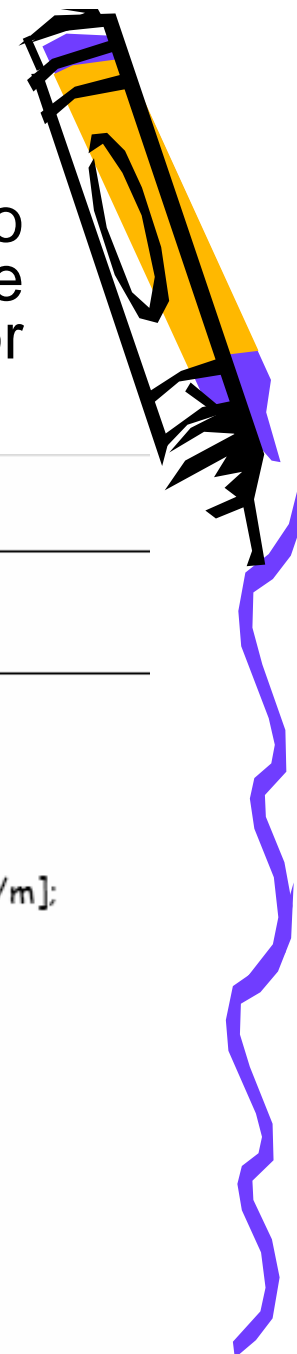


Figura 9.1 - Aparência e Simbologias dos Indutores (Fonte: Markus, 2001).



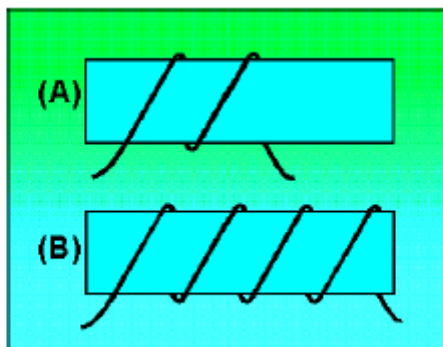


Figura 9.2 - indutor: (a) duas espiras; (b) quatro espiras.

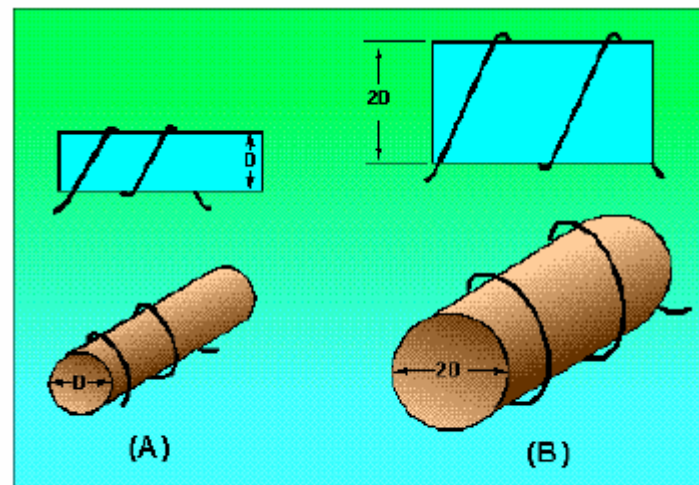


Figura 9.3 - indutor: (a) diâmetro  $D$ ; (b) diâmetro  $2D$ .

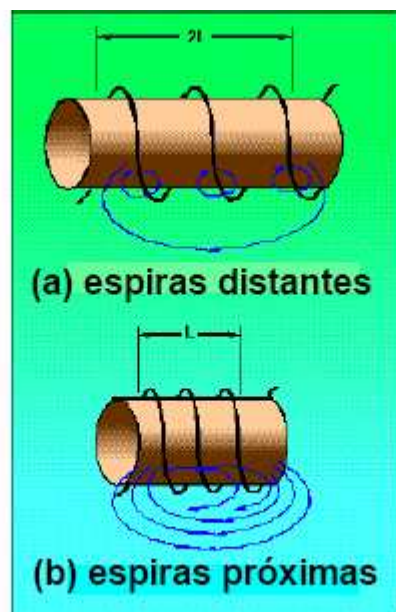


Figura 9.4 - indutor: (a) longo, bobinas espaçadas; (b) curto, bobinas próximas.

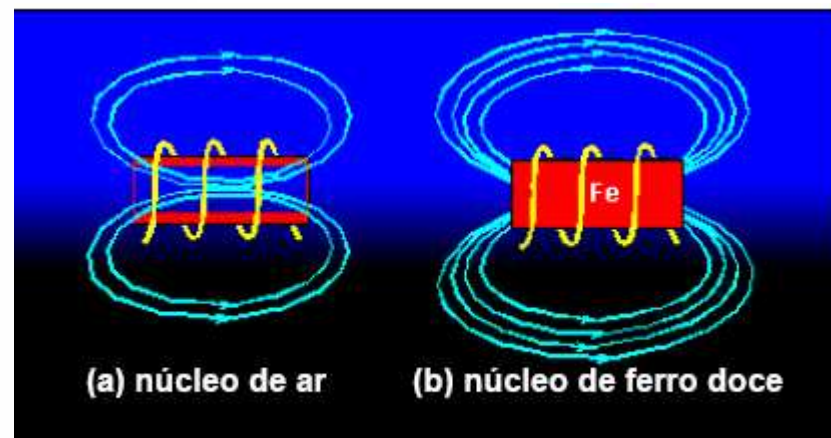
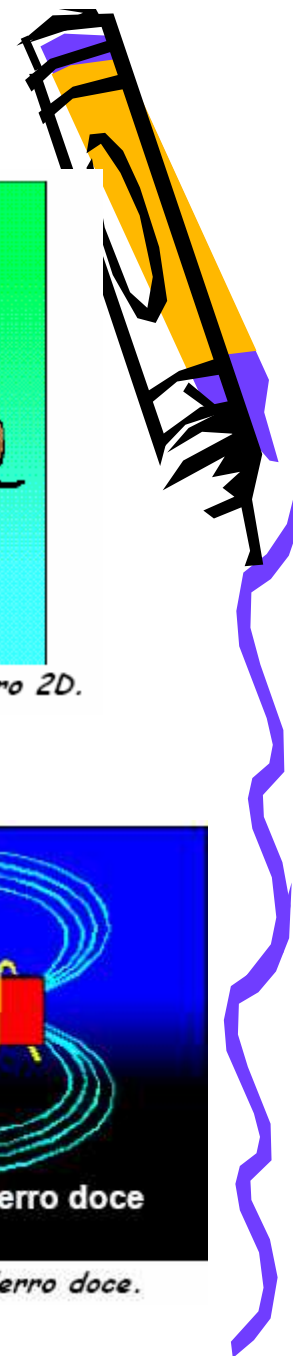
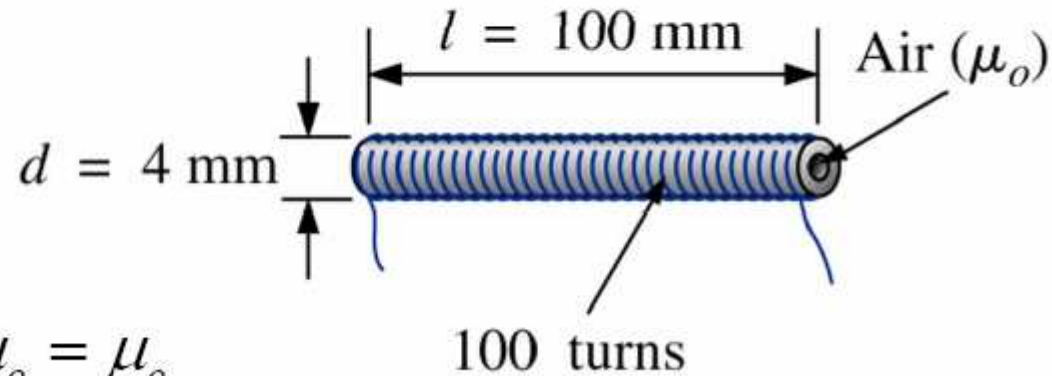


Figura 9.5 - tipo de núcleo: (a) ar; (b) ferro doce.



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



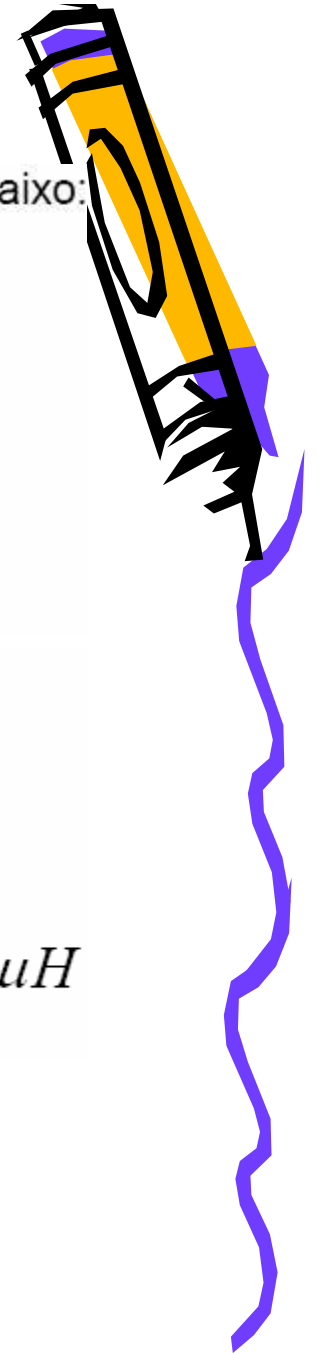
$$\mu_r = 1$$

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

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

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

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





## 2.9.1 - Especificações de indutores

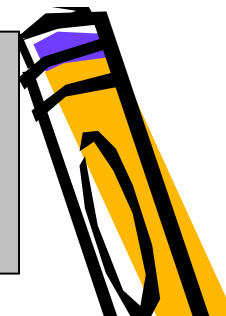


Tabela 9.1

Valores Múltiplos Padronizados de Indutores (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, radiofrequência (RF), circuitos de acionamento e controle, sensores, etc.



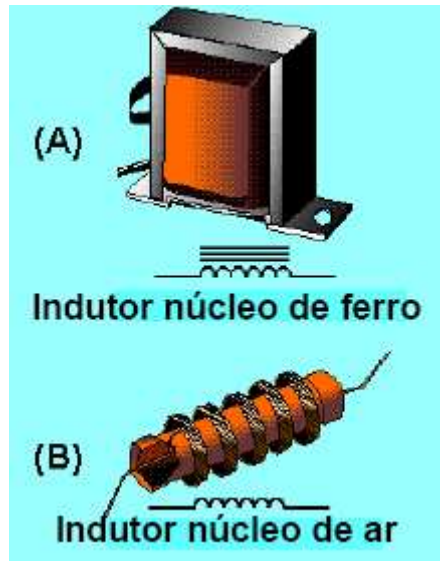


Figura 9.9 - Indutores: (a) núcleo de ferro; (b) núcleo de ar

# Indutores na prática

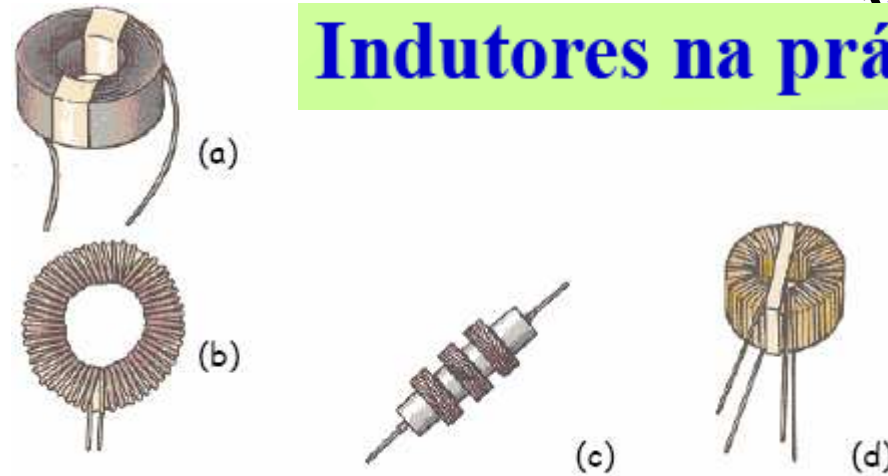


Figura 9.11 - tipos comuns de indutores (fonte: Boylestad)

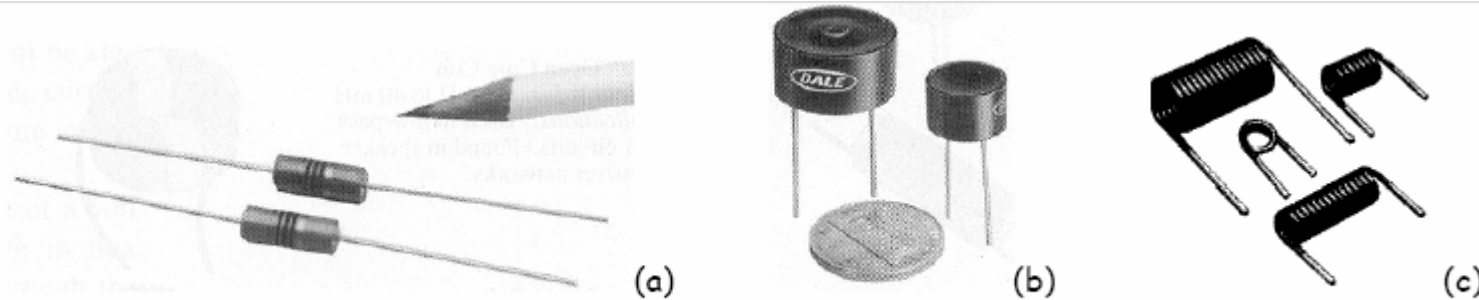
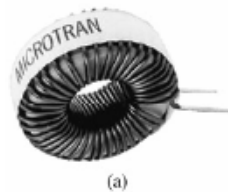


Figura 9.10 - tipos de indutores: (a) moldados axiais; (b) toroidais encapsulados; (c) núcleos de ar (fonte: Boylestad)

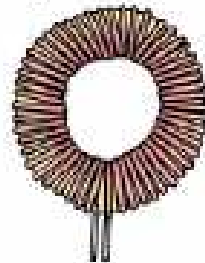




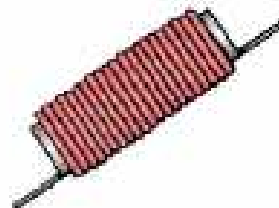
**Type:** Open Core Coil  
**Typical Values:** 3 mH to 40 mH  
**Applications:** Used in low-pass filter circuits. Found in speaker crossover networks.



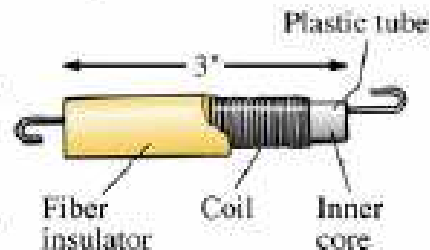
**Type:** Toroid Coil  
**Typical Values:** 1 mH to 30 mH  
**Applications:** Used as a choke in AC power lines circuits to filter transient and reduce EMI interference. This coil is found in many electronic appliances.



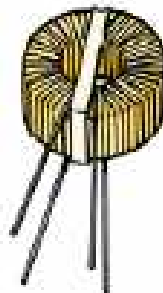
**Type:** Hash Choke Coil  
**Typical Values:** 3  $\mu$ H to 1 mH  
**Applications:** Used in AC supply lines that deliver high currents.



**Type:** Delay Line Coil  
**Typical Values:** 10  $\mu$ H to 50  $\mu$ 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.



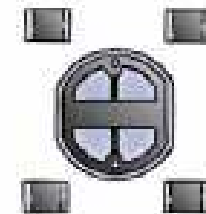
**Type:** RF Chokes  
**Typical Values:** 10  $\mu$ H to 50  $\mu$ H  
**Applications:** Used in radio, television, and communication circuits. Found in AM, FM, and UHF circuits.



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

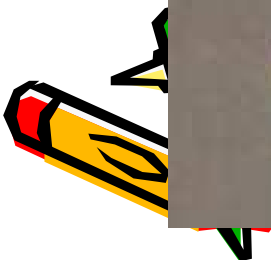


**Type:** Surface Mounted Inductors  
**Typical Values:** 0.01  $\mu$ H to 100  $\mu$ H  
**Applications:** Found in many electronic circuits that require miniature components on multilayered PCB.



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

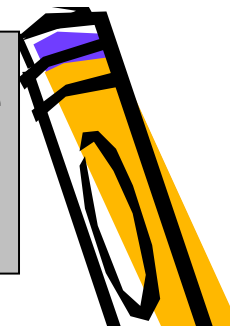




## 2.9.2- indutores

## Associação

de



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

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:

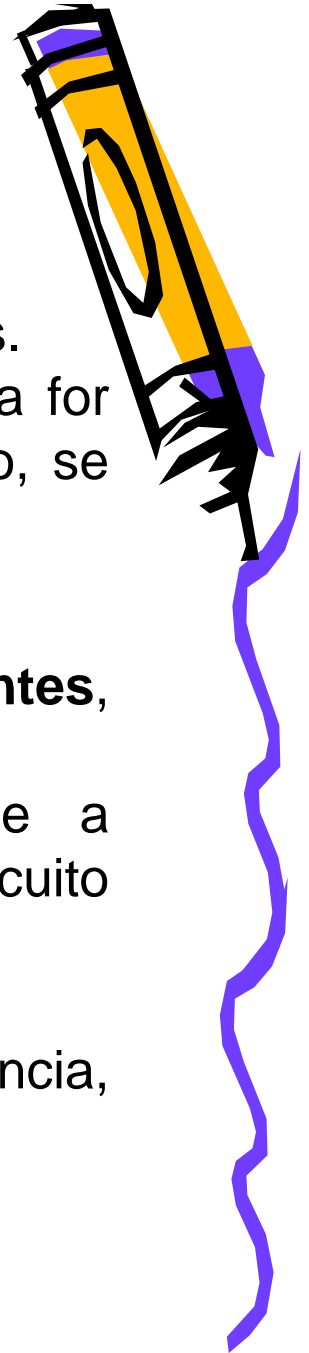
- **Curto-circuitos** ocorridos **entre os enrolamentos** das bobinas.

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:**

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

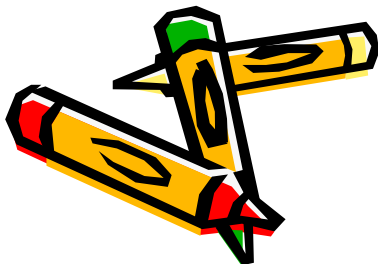
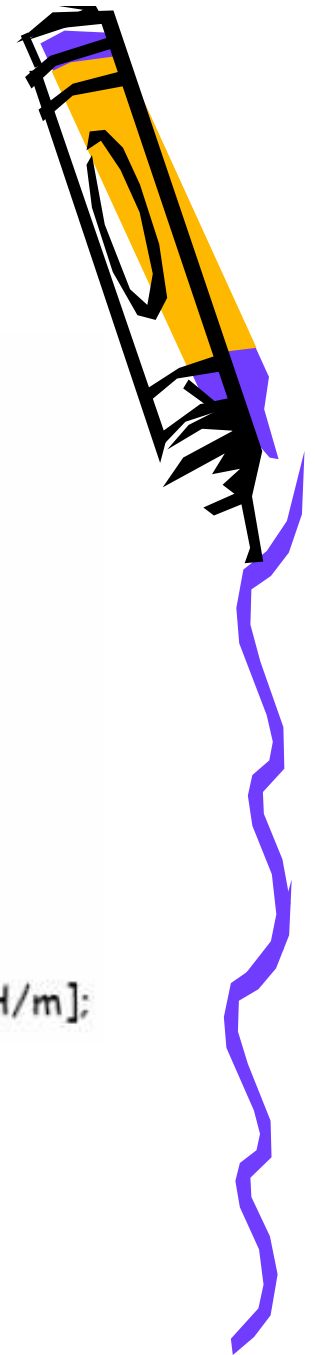
N - número de espiras da bobina indutora

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

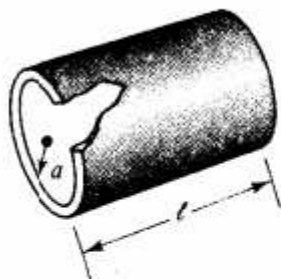
A - área das espiras da bobina (área do núcleo), [metro quadrado, m<sup>2</sup>];

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:



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

N - número de espiras da bobina indutora;

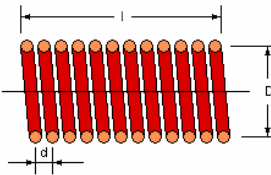
L - indutância desejada para o indutor, [Micro Henry,  $\mu\text{H}$ ];

$\ell$  - comprimento logitudinal da bobina [metro, m];

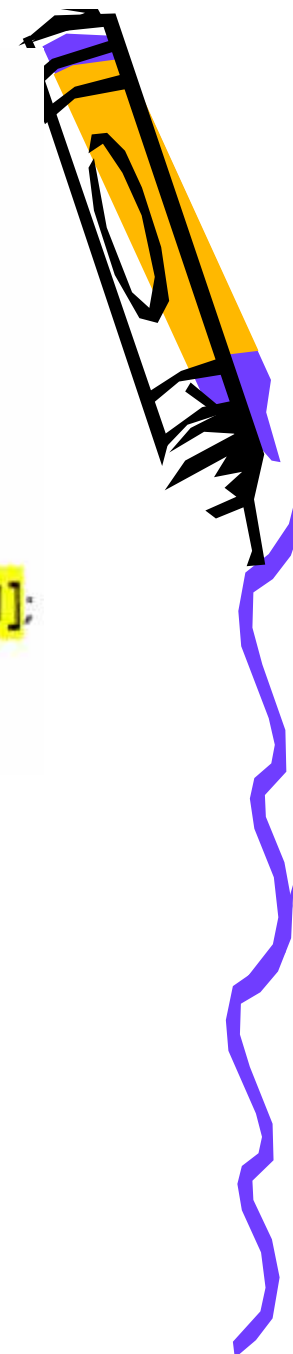
a - raio do núcleo (raio das espiras), [metro, m]

## Single-Layer Air Coil Calculator

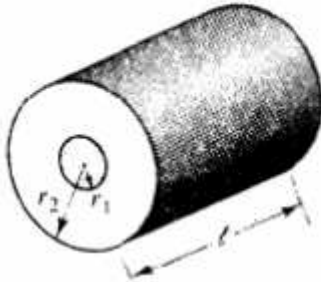
Enter L, D and d (all three are required) to calculate I and N.

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

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



## Bobina de diversas camadas com núcleo de ar:



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

N - número de espiras da bobina indutora;

L - indutância desejada para o indutor, [Micro Henry,  $\mu\text{H}$ ];

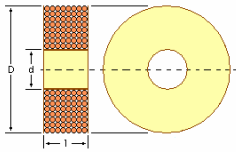
$l$  - comprimento logitudinal da bobina, [metro, m];

$r_1$  - 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

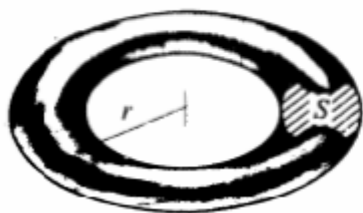
Enter L, d, l and Wire Gauge (all four are required) to calculate multilayer inductor data.

|  |                  |
|--|------------------|
|  |                  |
| Inductance (L):  | 10 $\mu\text{H}$ |
| 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:



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

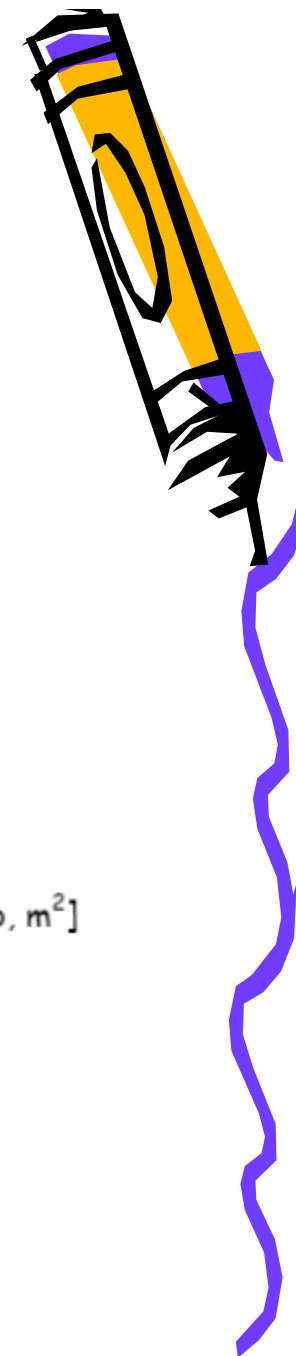
N - número de espiras da bobina indutora;

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

r - raio médio do toroide<sup>14</sup>, [metro, m];

$\mu$  - 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, m<sup>2</sup>]







## Projeto de um indutor

### Tarefa:

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

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

Exemplo:

- Matrícula: 081203104-5

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

- 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.

