Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina
Departamento Acadêmico de Eletrônica
Retificadores

Lei de Faraday e Lenz
Auto-indutância e Indutores

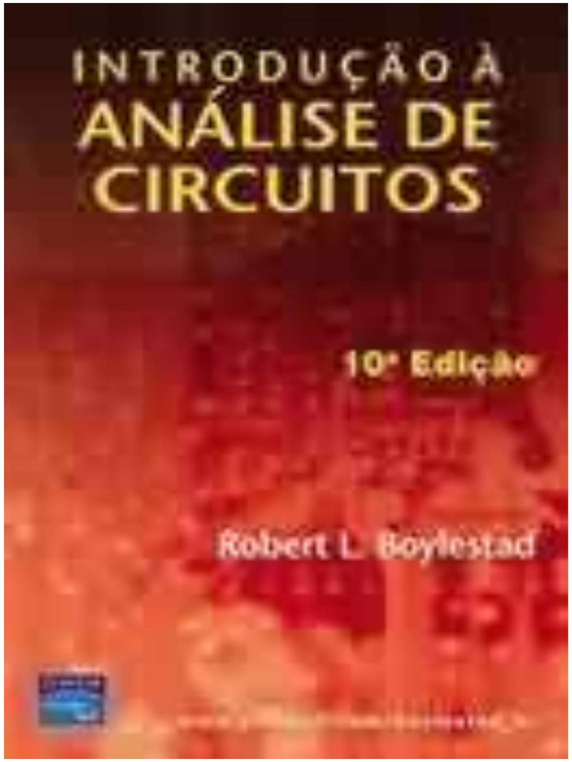
Prof. Clóvis Antônio Petry.

Florianópolis, setembro de 2008.

Bibliografia para esta aula

Capítulo 12: Indutores

1. Lei de Faraday;
2. Lei de Lenz;
3. Auto-indutância;
4. Tipos de indutores.

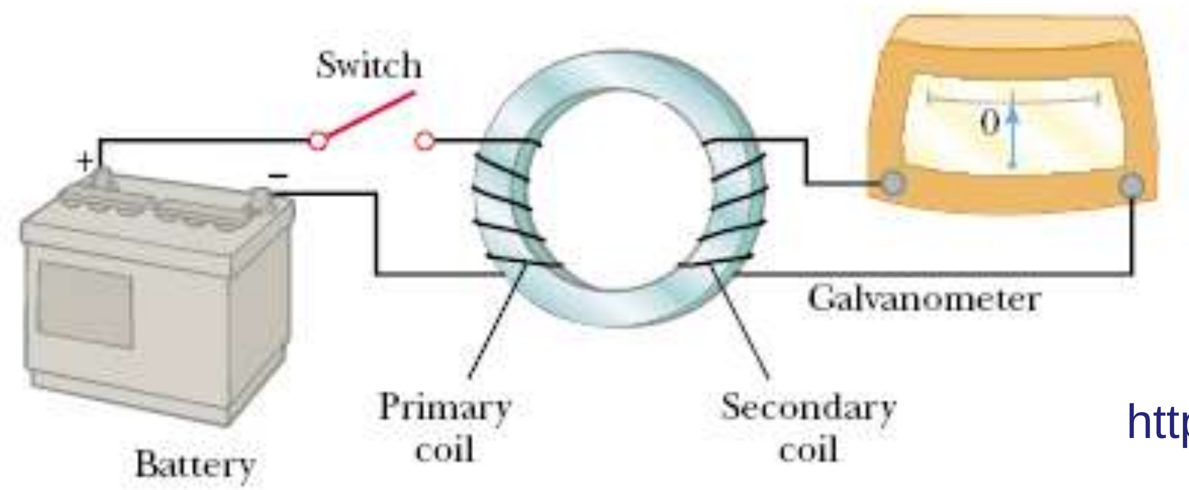


www.cefetsc.edu.br/~petry

Indução eletromagnética

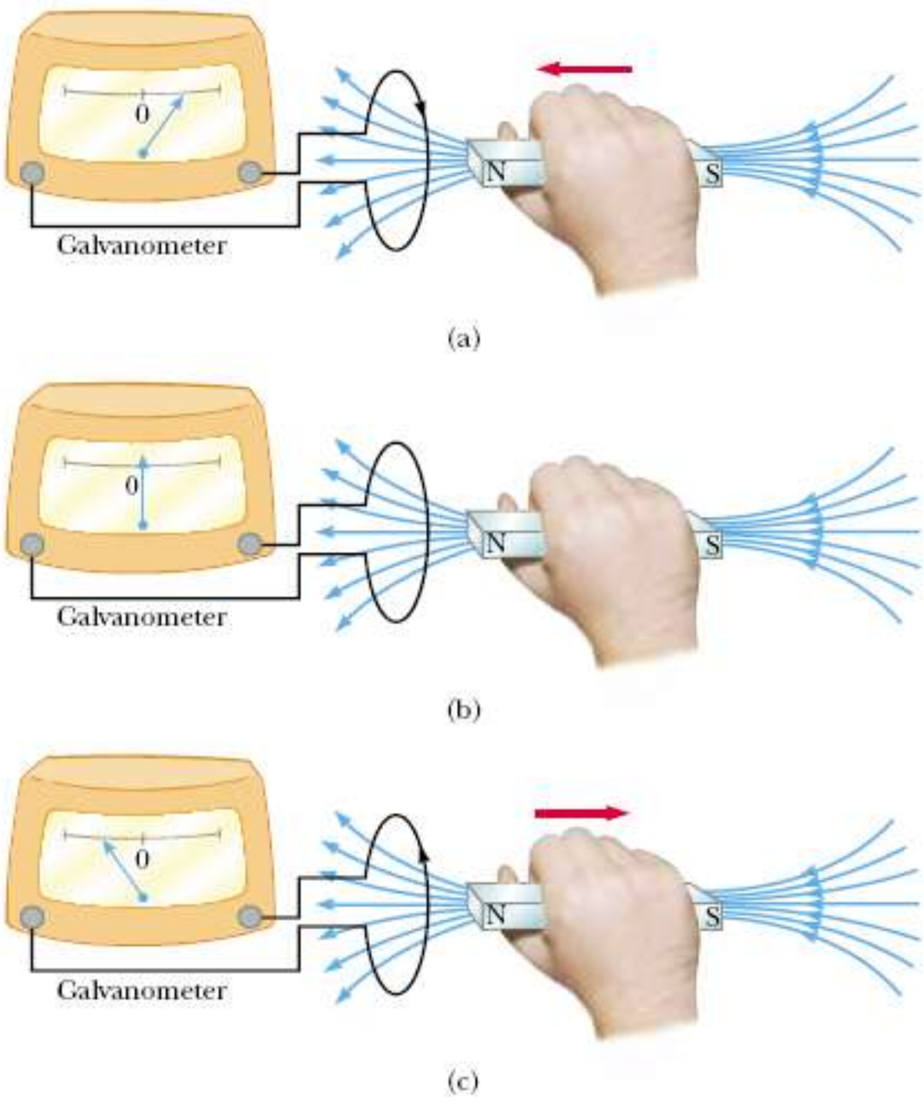
Experiência de Faraday:

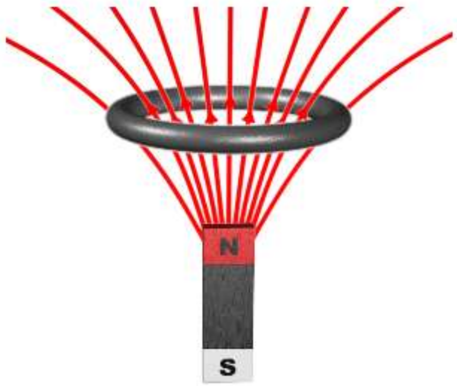
- No momento que a chave é fechada, o galvanômetro acusa uma pequena corrente de curta duração;
- Após a corrente cessar e durante tempo em que a chave permanecer fechada, o galvanômetro não mais acusa corrente;
- Ao abrir-se a chave, o galvanômetro volta a indicar uma corrente de curta duração, em sentido oposto ao observado no momento de fechamento da chave.



http://micro.magnet.fsu.edu

Indução eletromagnética



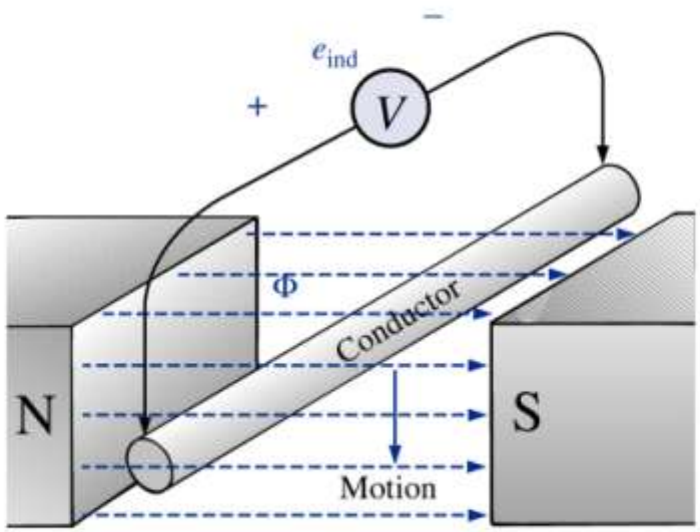


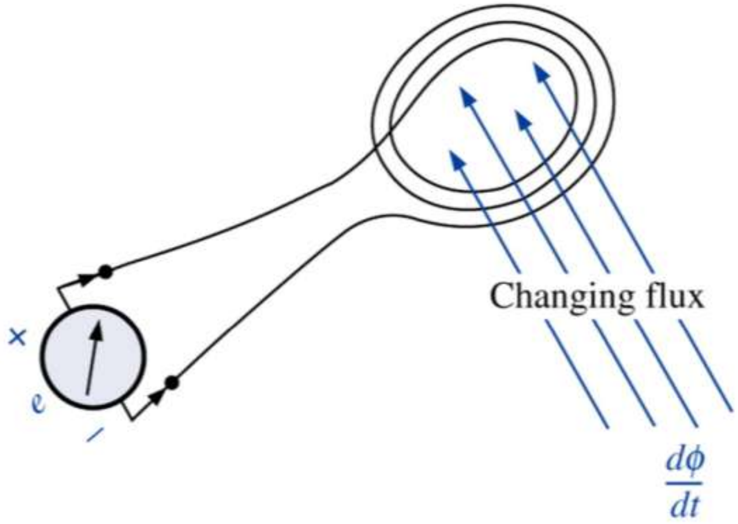
http://micro.magnet.fsu.edu

Indução eletromagnética

A indução eletromagnética é regida por duas leis:

- Lei de Faraday;
- Lei de Lenz.



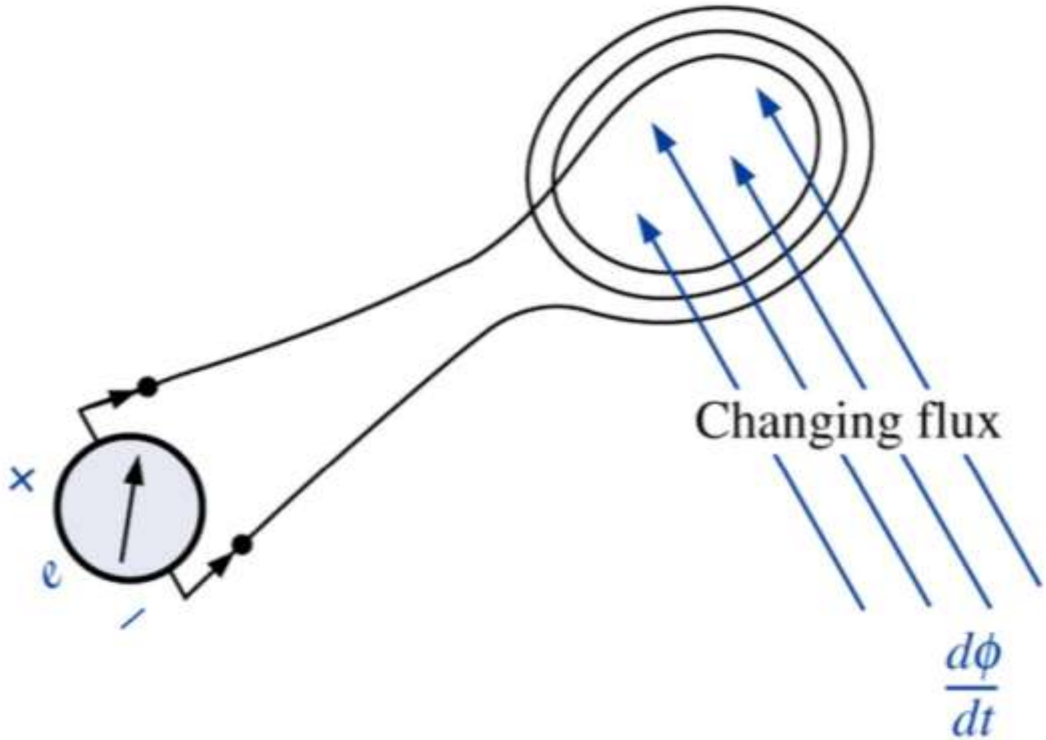


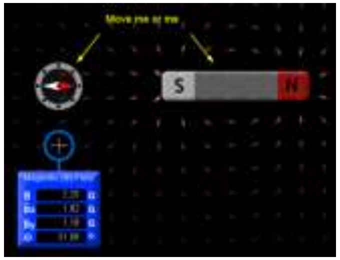
Indução eletromagnética

Lei da indução eletromagnética de Faraday:

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

$$\varepsilon = N\frac{d\phi}{dt} \quad [\text{volts, V}]$$



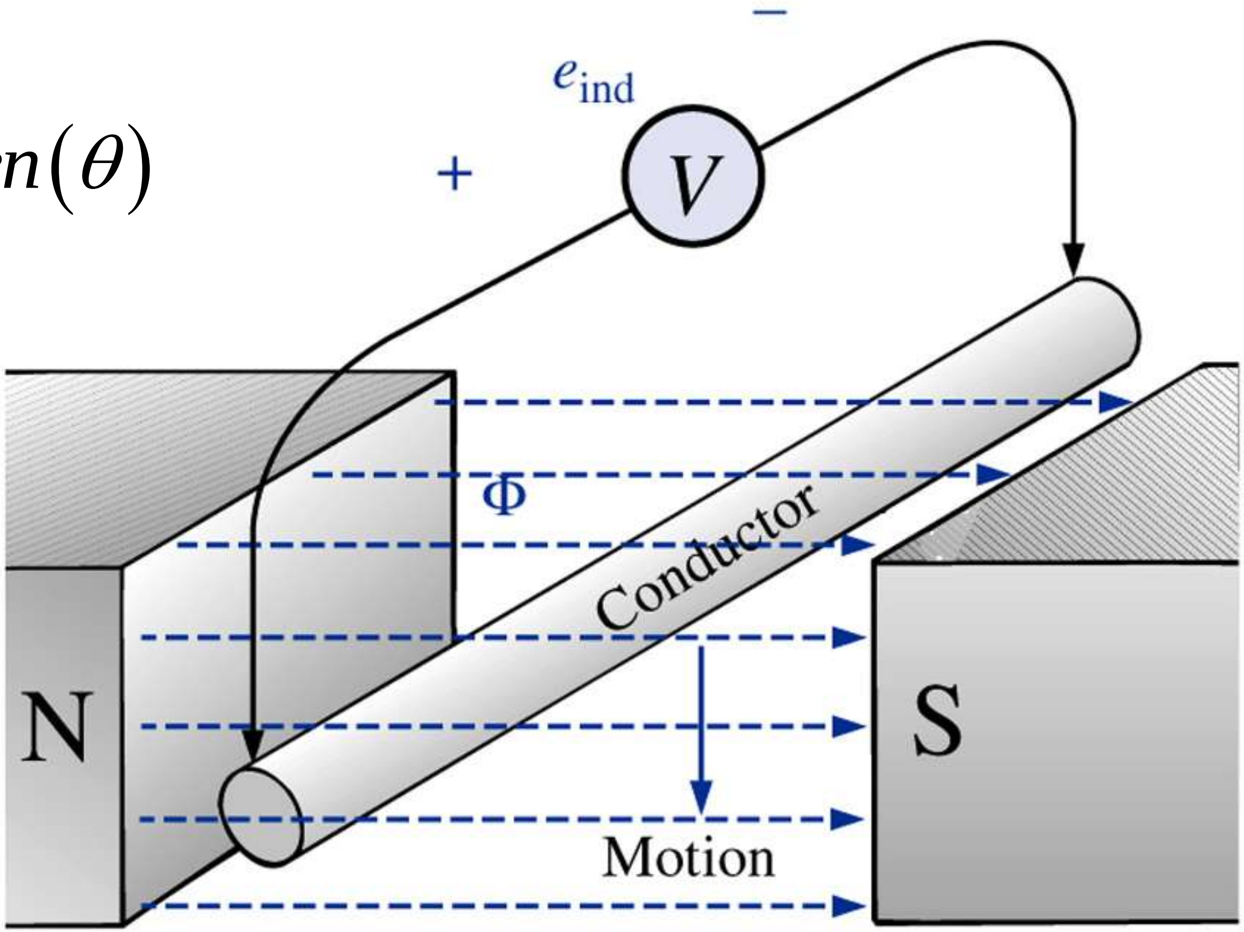


http://phet.colorado.edu

Tensão induzida em condutores num campo

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

$$\phi = B \cdot A \cdot sen(\theta)$$

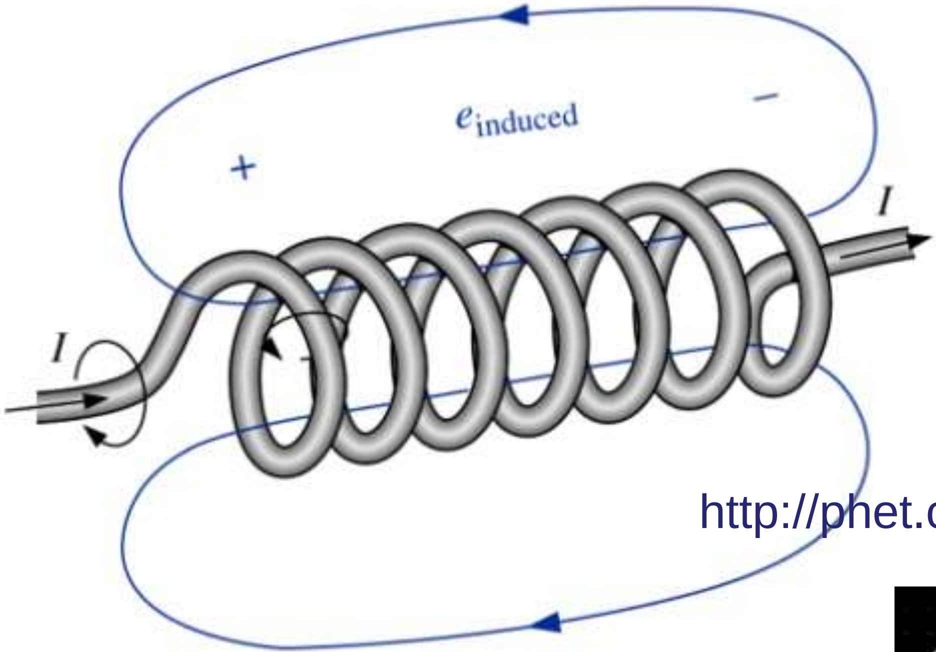


Lei de Lenz

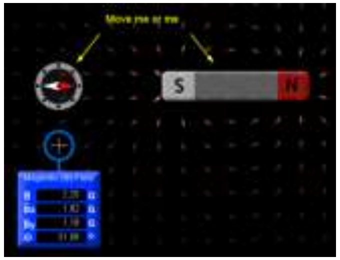
Lei de Lenz:

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

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



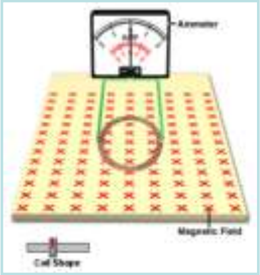
http://phet.colorado.edu



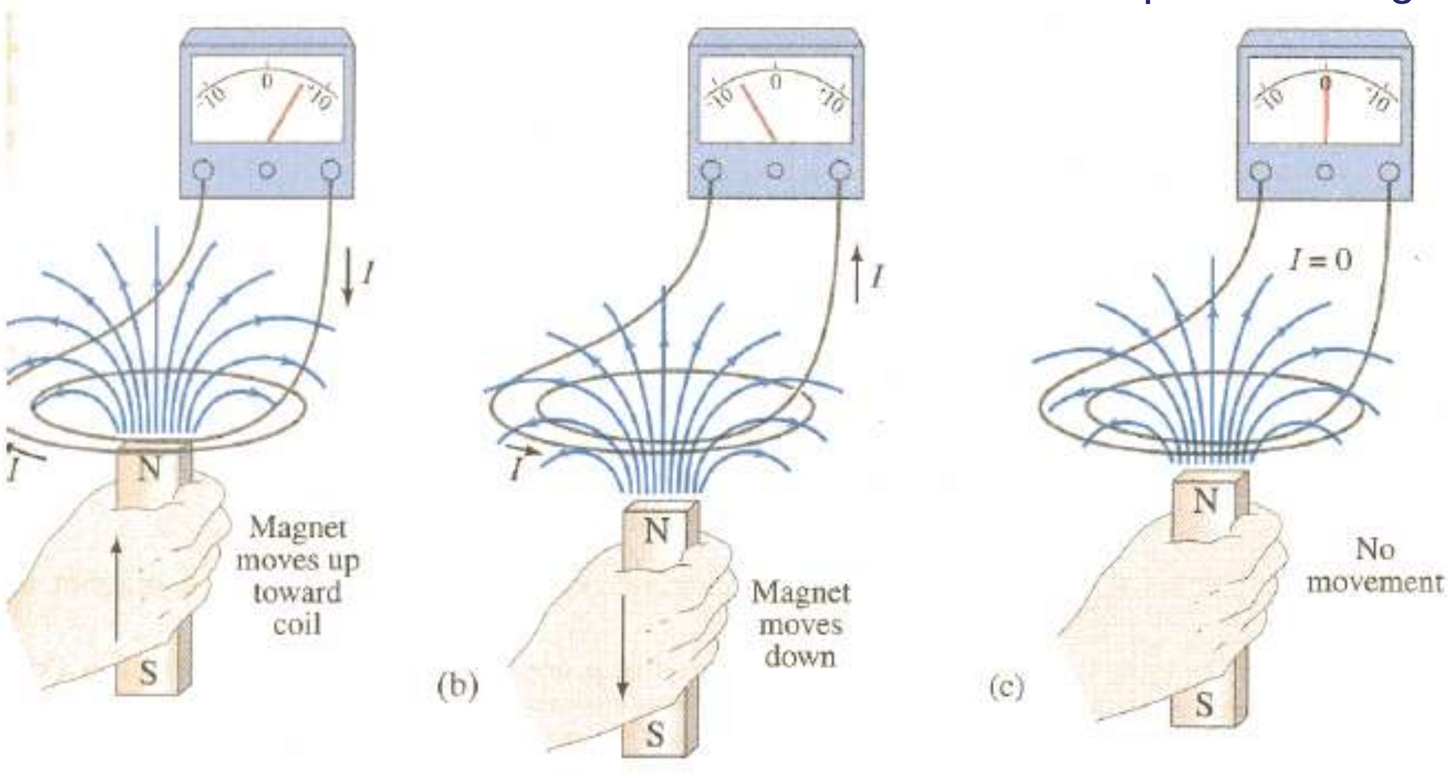
Um efeito induzido ocorre sempre de forma a se opor à causa que o produziu.

Indução eletromagnética

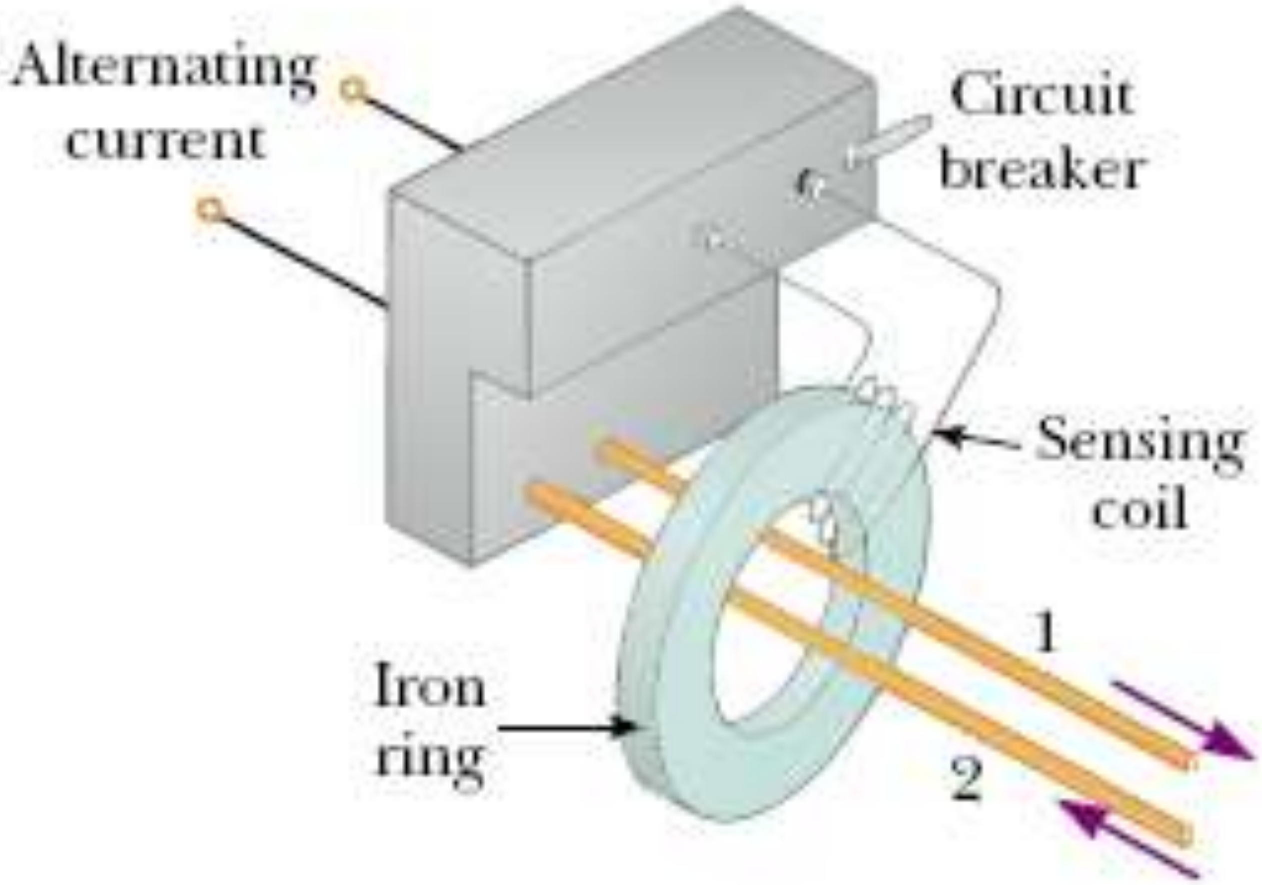
Com base nas leis da indução, explicar o comportamento do amperímetro na figura abaixo:



http://www.magnet.fsu.edu

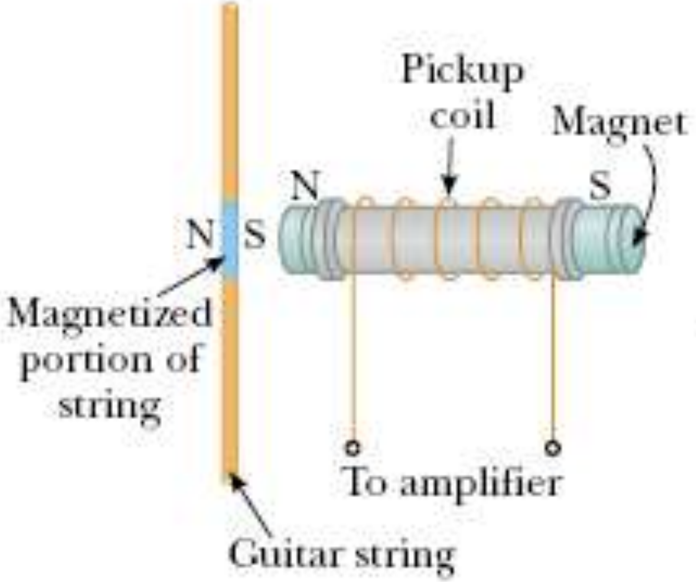


Aplicações – Disjuntor diferencial

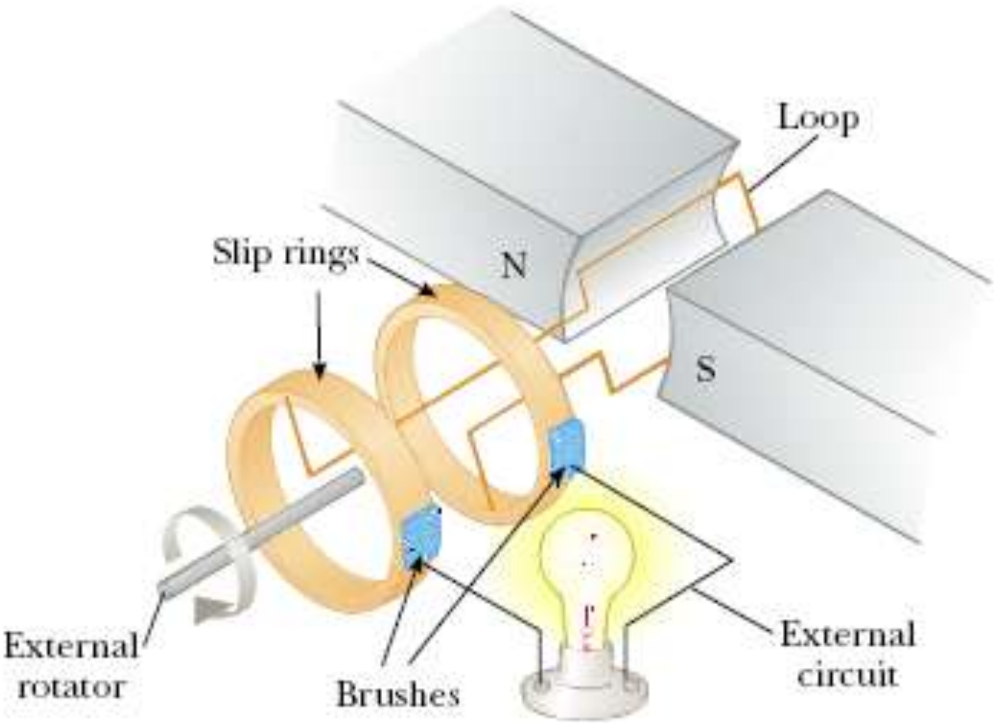


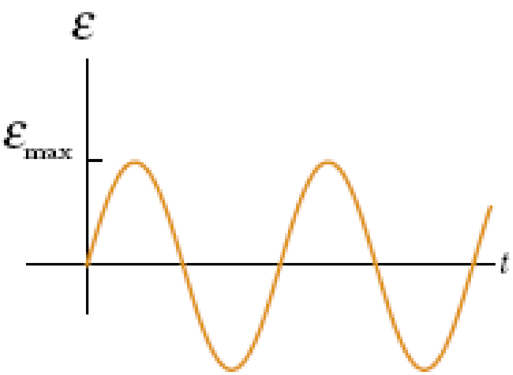
Aplicações – Forno ou panela de indução

Aplicações – Guitarra elétrica

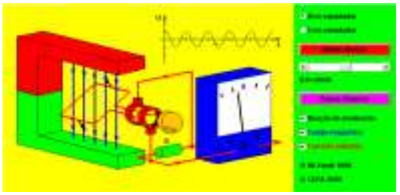


Aplicações – Geração de CA



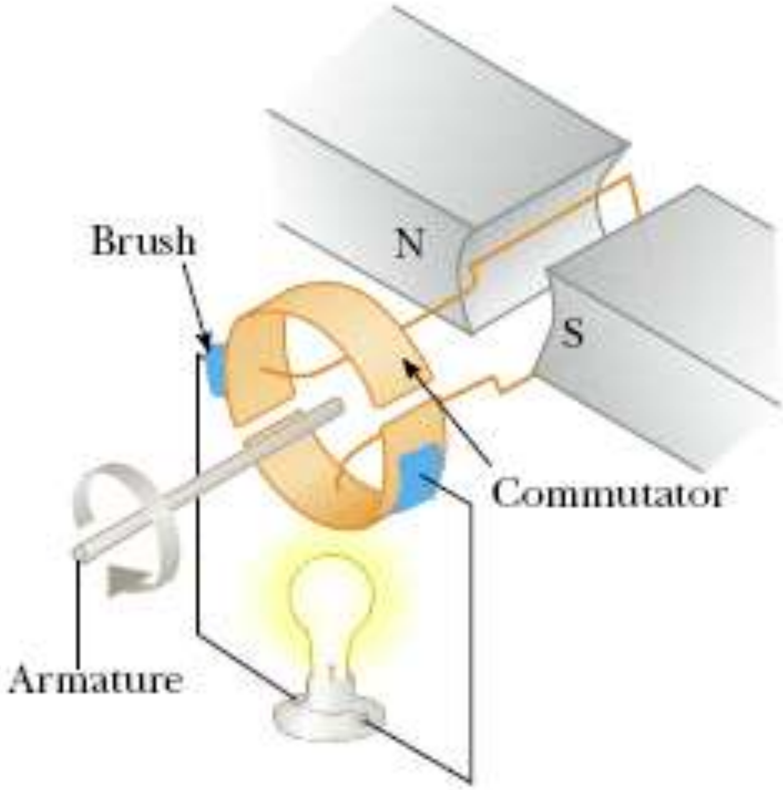


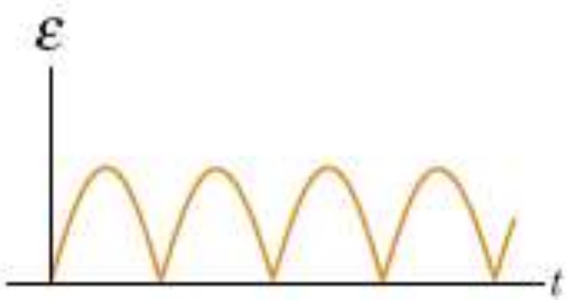
Applets em java →



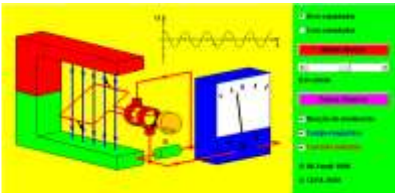
http://www.walter-fendt.de/ph11br/

Aplicações – Gerador CC





Applets em java →

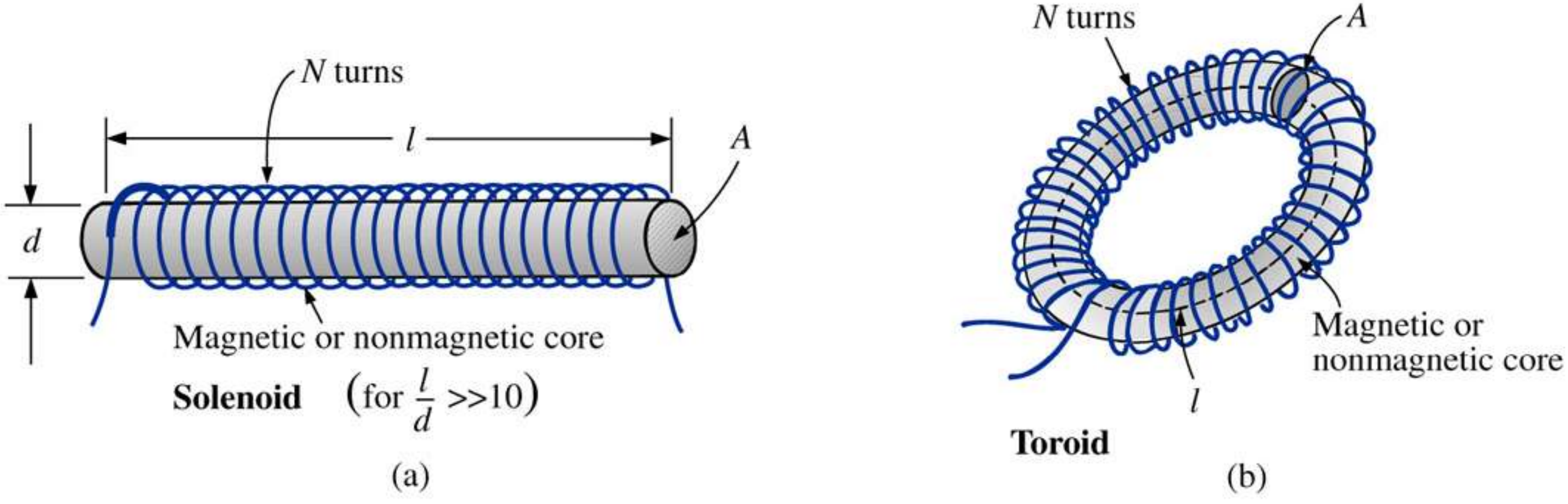


http://www.walter-fendt.de/ph11br/

Auto-Indutância

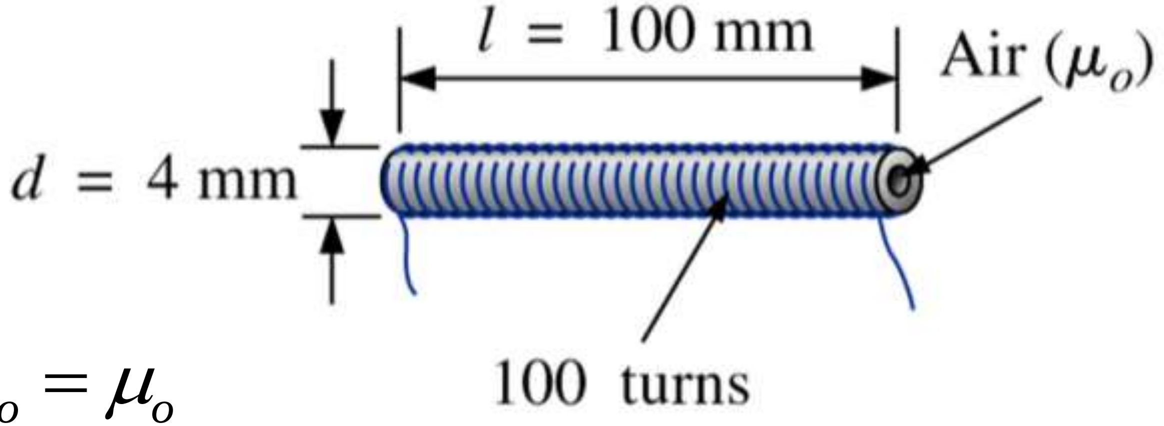
A propriedade de uma bobina de se opor a qualquer variação de corrente é medida pela sua auto-indutância (L). A unidade de medida é o Henry (H).

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



Auto-Indutância

<u>Exemplo 12.1</u>: Determine a indutância da bobina de núcleo de ar da figura abaixo:



$$\mu_r = 1$$

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

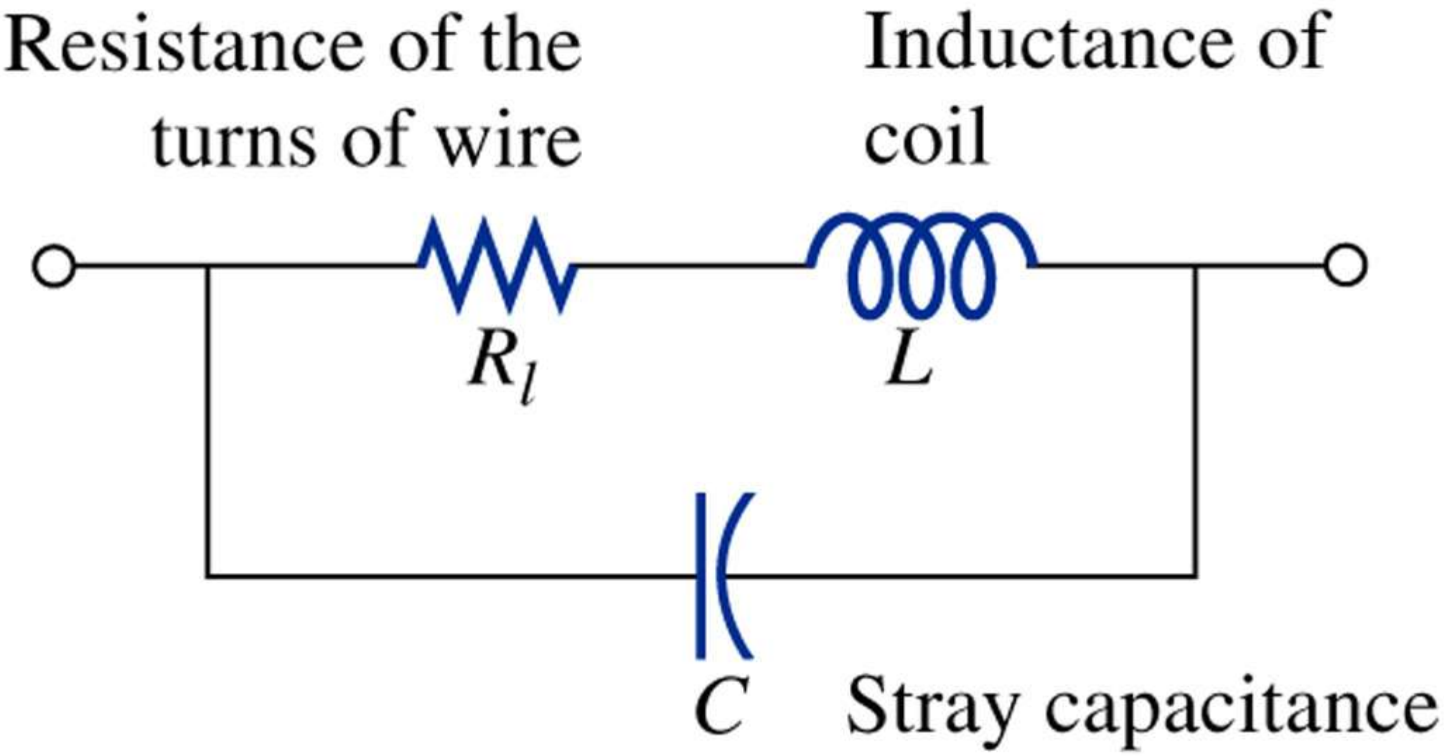
$$A = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot \left(4 \cdot 10^{-3}\right)^2}{4}$$

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

$$A = 12,57 \cdot 10^{-6}\, m^2$$

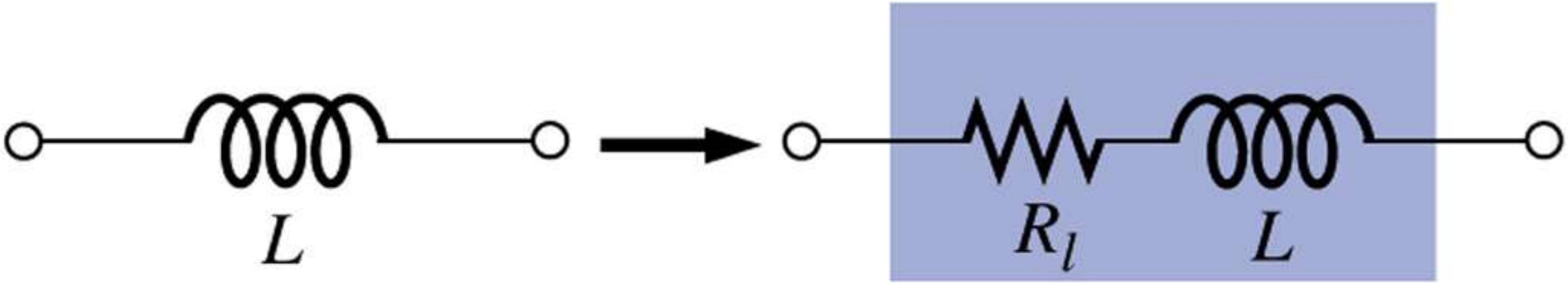
$$L = \frac{100^2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 12,57 \cdot 10^{-6}}{0,1} = 1,58\, \mu H$$

Circuito equivalente de um indutor



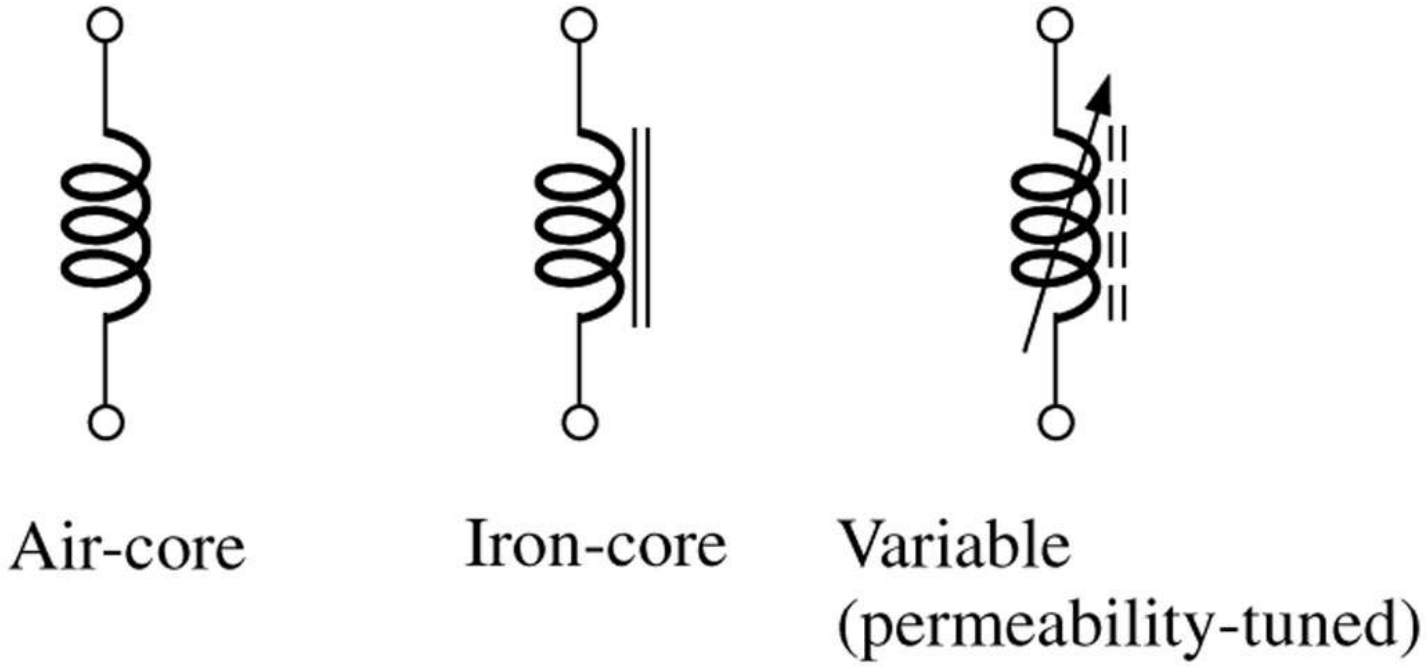
Circuito equivalente completo de um indutor

Circuito equivalente de um indutor



Circuito equivalente prático de um indutor

Símbolos de indutores



Indutores na prática

Projeto simplificado de indutores

Bobinas longas:

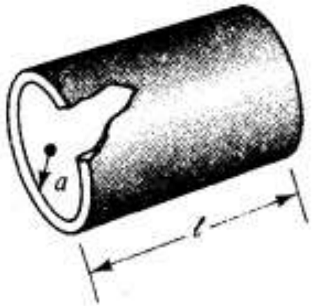
$$L = \frac{N^2 \cdot \mu \cdot A}{l} \longrightarrow N = \sqrt{\frac{L \cdot l}{\mu \cdot A}}$$

Onde:

- N – número de espiras da bobina;
- L – indutância [Henry, H];
- A – área do núcleo [m^2];
- *l* – comprimento da bobina [m];
- μ – permeabilidade do núcleo [Wb/A·m].

Projeto simplificado de indutores

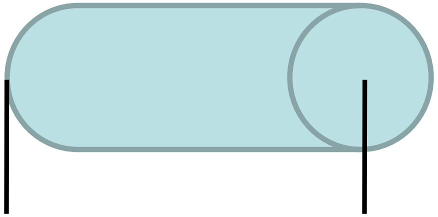
Bobina de camada única com núcleo de ar:



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

Onde:

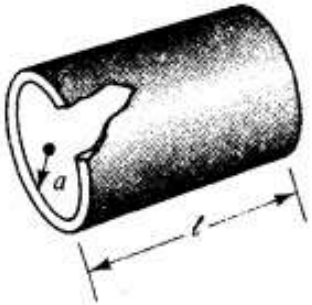
- N – número de espiras da bobina;
- L – indutância [micro Henry, μH];
- a – raio do núcleo [m];
- *l* – comprimento da bobina [m].



$$l = N \cdot D_{fio}$$

Projeto simplificado de indutores

Bobina de camada única com núcleo de ar:



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

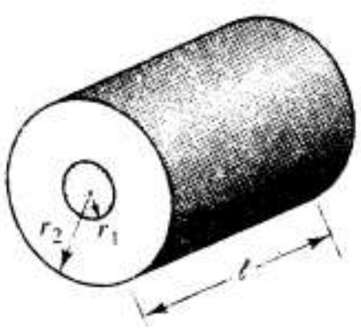
$$l = N \cdot D_{fio}$$

$$39,5 \cdot a^2 \cdot N^2 - 10 \cdot L \cdot D_{fio} \cdot N - 9 \cdot a \cdot L = 0$$

$$N = \frac{10 \cdot L \cdot D_{fio} \pm \sqrt{\left(-10 \cdot L \cdot D_{fio}\right)^2 - 4 \cdot \left(39,5 \cdot a^2\right) \cdot \left(-9 \cdot a \cdot L\right)}}{2 \cdot \left(39,5 \cdot a^2\right)}$$

Projeto simplificado de indutores

Bobina de diversas camadas com núcleo de ar:



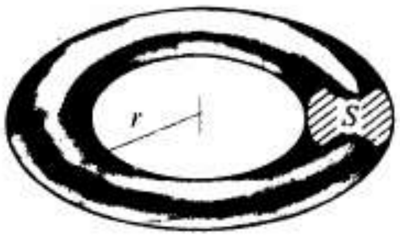
$$N = \sqrt{\frac{L \cdot \left(6 \cdot r_1 + 9 \cdot l + 10 \cdot \left(r_2 - r_1\right)\right)}{31,6 \cdot r_1^2}}$$

Onde:

- N – número de espiras da bobina;
- L – indutância [micro Henry, μH];
- *l* – comprimento da bobina [m];
- r1 – raio interno [m];
- r2 – raio externo [m].

Projeto simplificado de indutores

Núcleos toroidais:



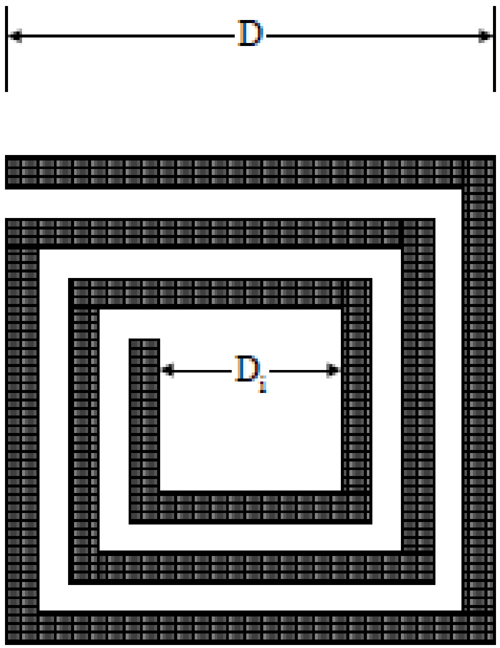
$$N = \sqrt{\frac{2\pi \cdot r \cdot L}{\mu \cdot A}}$$

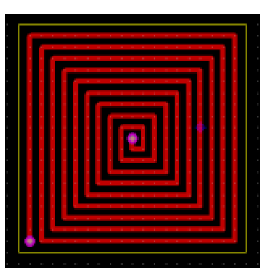
Onde:

- N – número de espiras da bobina;
- L – indutância [Henry, H];
- A – área do núcleo [m^2];
- μ – permeabilidade do núcleo [Wb/A·m];
- r – raio do toroide [m].

Projeto simplificado de indutores

Indutor planar:





Se $D_i = 0$

$$L \approx 8,5 \cdot 10^{-10} \cdot D \cdot N^{\frac{5}{3}}$$

De acordo com:

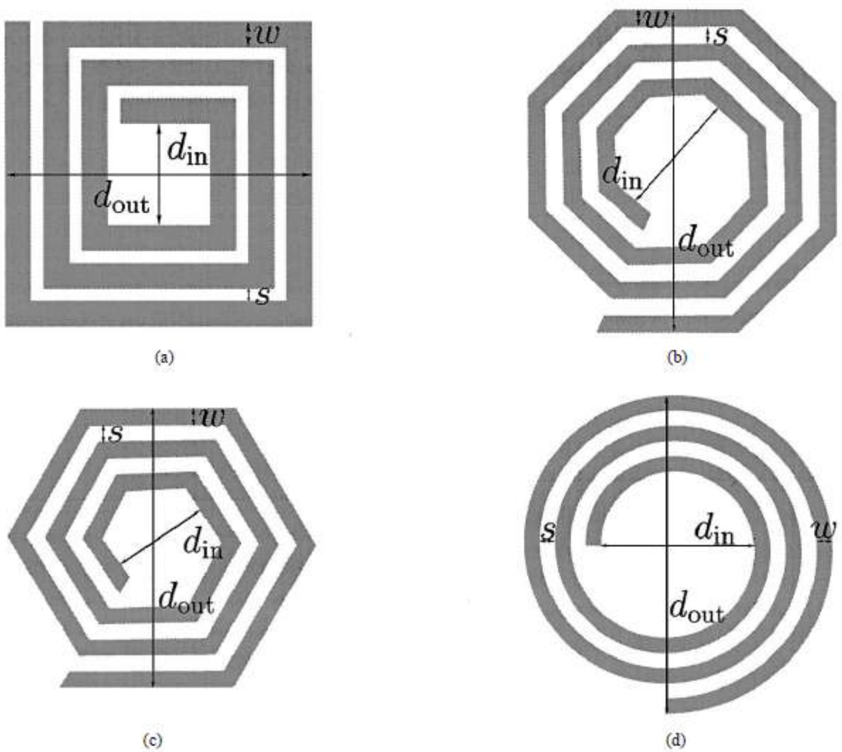

Inductance Calculation Techniques — Part II: Approximations and Handbook Methods

Marc T. Thompson, Ph.D.

http://members.aol.com/marctt2/induct2.pdf

Projeto simplificado de indutores

Indutor planar:



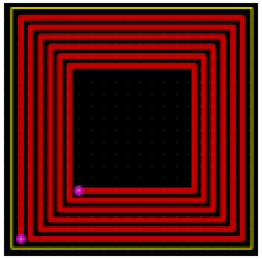
$$L = k_1 \cdot u_o \cdot \frac{n^2 \cdot d_{avg}}{1 + k_2 \cdot \rho}$$

$k_1 = 2,34$

$k_2 = 2,75$

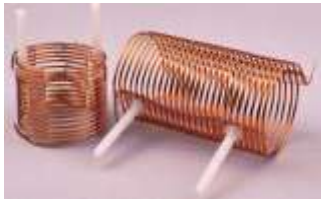
$$d_{avg} = \frac{d_{out} + d_{in}}{2} \qquad \rho = \frac{d_{out} - d_{in}}{d_{out} + d_{in}}$$

De acordo com:



http://smirc.stanford.edu/papers/JSSC99OCT-mohan.pdf

Projeto de indutores



Indutor 01 – convencional com núcleo de ar:

- Indutância: L = 100 a 200 µH, definida como:

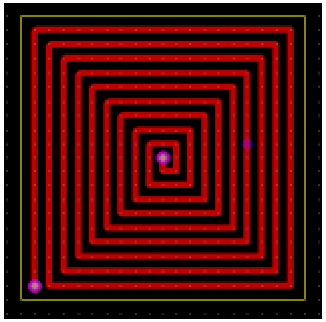
$$L = 100\,\mu + \text{Ordem no diário} \cdot 2$$

Exemplo:

$$L = 100\,\mu + \text{Ordem no diário} \cdot 2$$
$$L = 100\,\mu + 1 \cdot 2 = 102\,\mu H$$
$$L = 100\,\mu + 36 \cdot 2 = 172\,\mu H$$

- Núcleo de ar;
- Diâmetro: livre, conforme o carretel ou molde;
- Comprimento: livre;
- Número de camadas: livre;
- Corrente: I = 1 A;
- Área do condutor: conforme tabela no site, para corrente especificada;
- Individual;
- Relatório (parte 1) deve conter no mínimo:
  - Capa, sumário, introdução, desenvolvimento (projeto), ensaios, foto, conclusão, referências bibliográficas, etc.
- Prazo de entrega: 30/10 (logo após o feriado do dia do servidor).

Projeto de indutores



Indutor 02 – planar em circuito impresso:

- Indutância: L = 1,5 nH;
- Núcleo de ar;
- Dimensões, conforme projeto;
- Corrente: I = 1 A;
- Individual;
- Na PCI deve ser impresso o nome do aluno e data;
- Relatório (parte 2) deve conter no mínimo:
  - Capa, sumário, introdução, desenvolvimento (projeto), ensaios, foto, conclusão, referências bibliográficas, etc.
- Prazo de entrega: 30/10 (logo após o feriado do dia do servidor).

Na próxima aula

Capítulo 11: Circuitos magnéticos

1. Tensão induzida;
2. Resposta transitória.