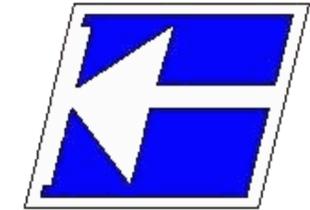




Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina
Departamento Acadêmico de Eletrônica
Acionamentos Eletrônicos



Revisão de Eletromagnetismo

Prof. Clovis Antonio Petry.

Florianópolis, junho de 2021.

Curso Básico de Acionamentos Eletrônicos

O material do curso está disponível em:

1. Moodle para os alunos matriculados na disciplina;
2. Página do professor;
3. Canal no youtube do professor.



<https://moodle.ifsc.edu.br>



www.ProfessorPetry.com.br



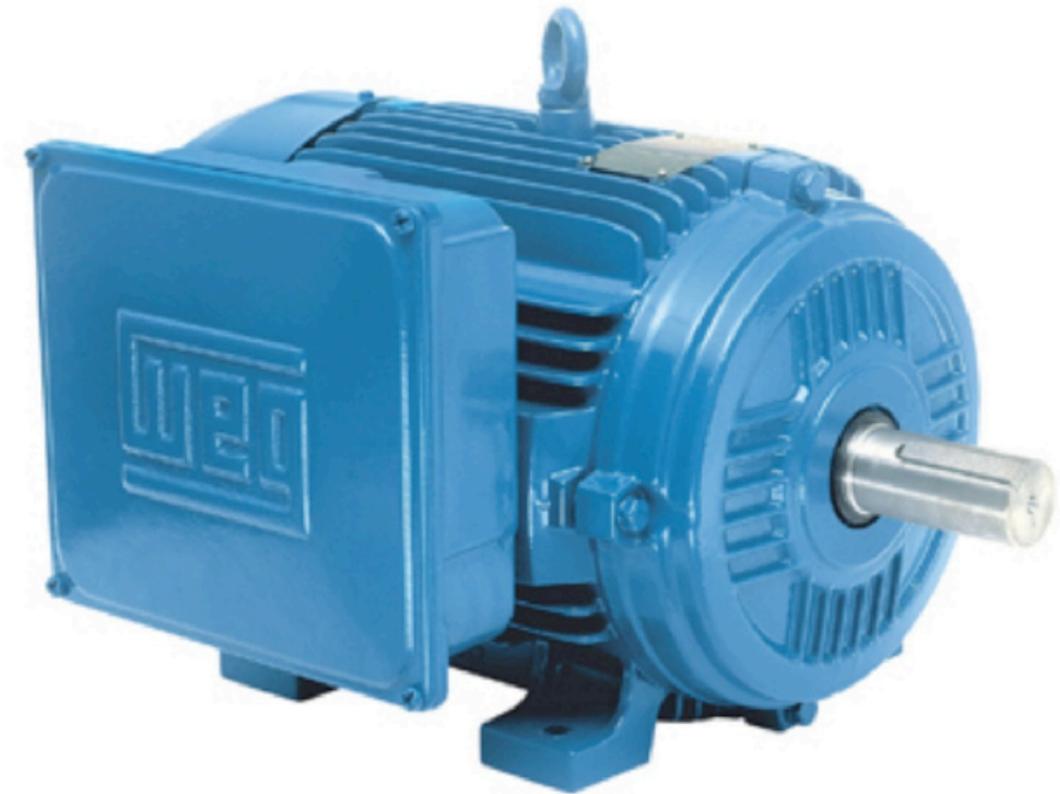
<https://www.youtube.com>

Esta aula está organizada em:

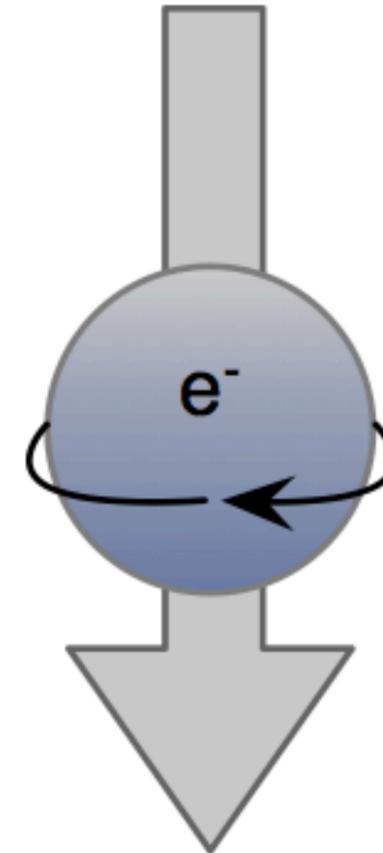
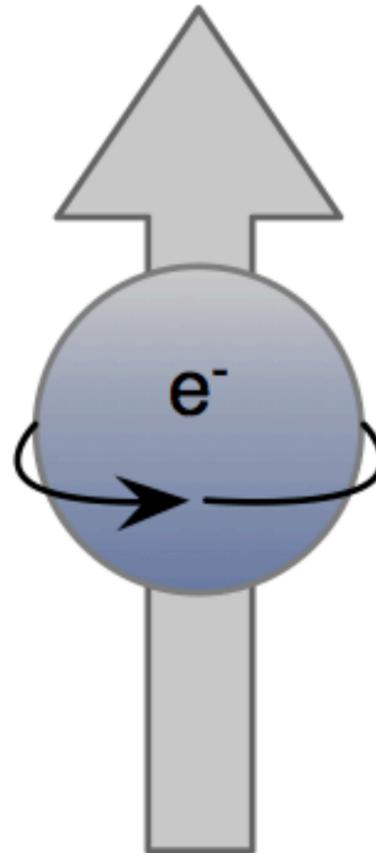
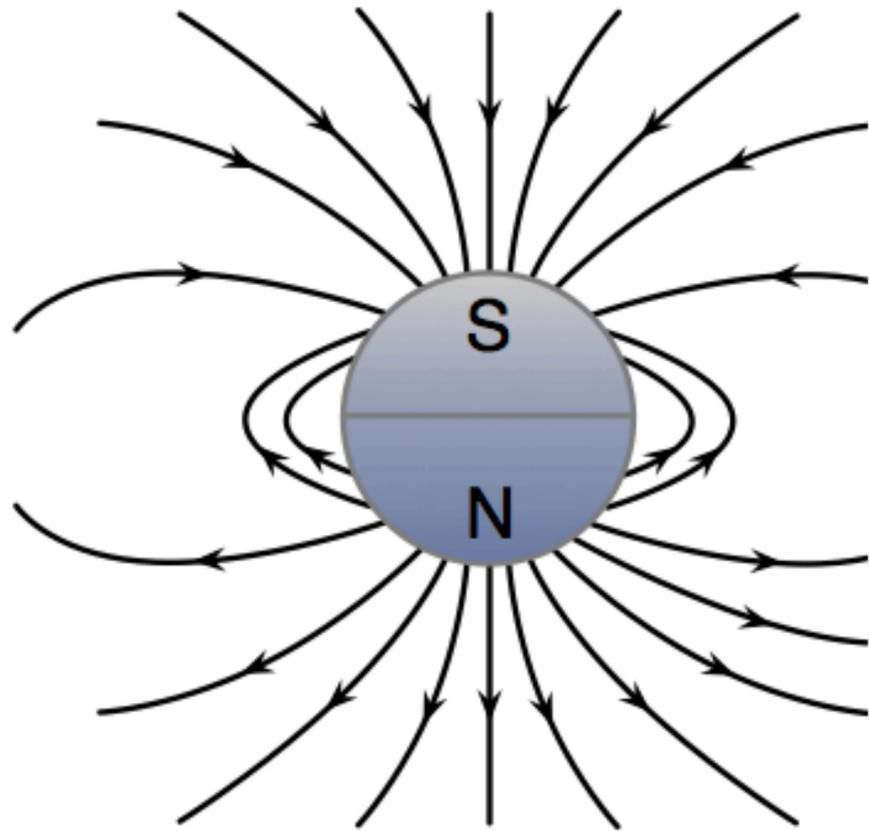
1. Eletromagnetismo:
 - Conceitos básicos;
 - Principais grandezas.
2. Indutância:
 - Indutância;
 - Modelo elétrico do indutor.
3. Transformadores:
 - Indução eletromagnética;
 - Transformadores;
 - Modelo elétrico do transformador.
4. Força eletromagnética:
 - Força eletromagnética;
 - Regra de Fleming;
 - Princípio motor e princípio gerador.
5. Aspectos e características dos elementos magnéticos:
 - Tipos de núcleos;
 - Perdas nos elementos magnéticos;
 - Efeitos nos condutores.



Os dispositivos eletromagnéticos
estão presentes em diversas
aplicações de eletroeletrônica.

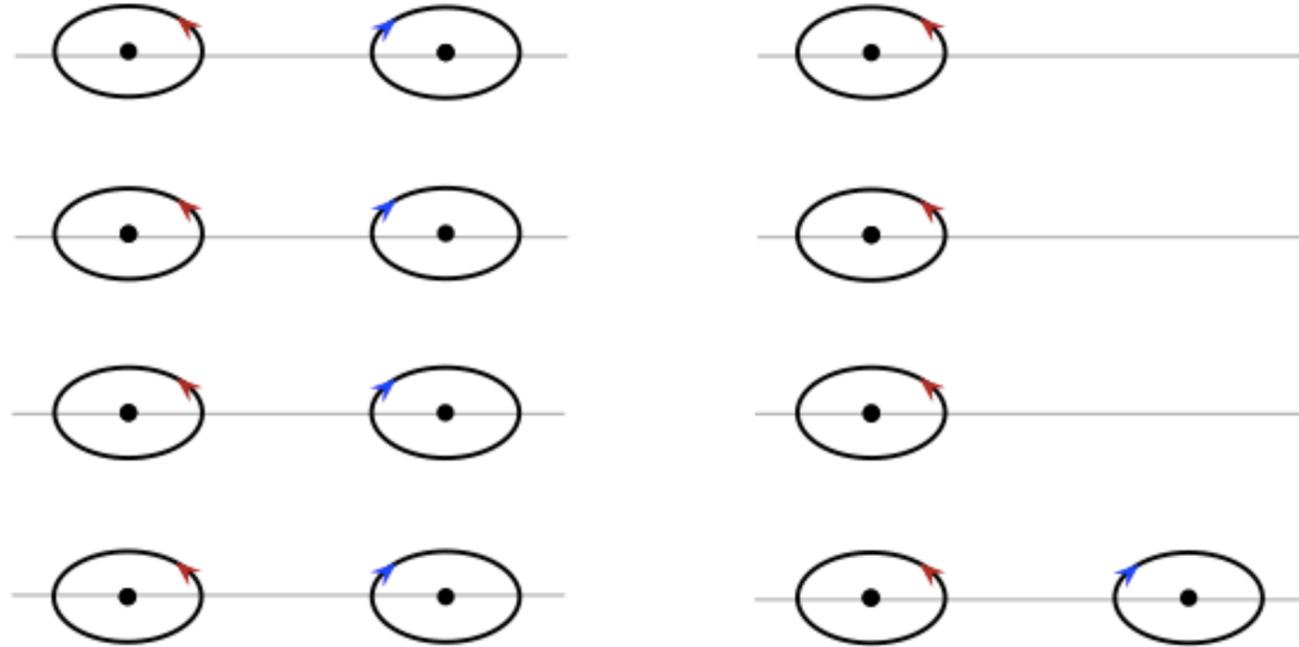
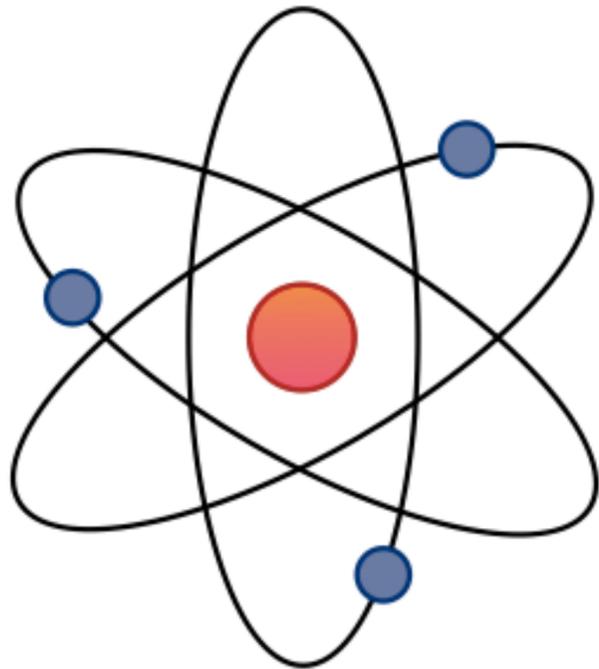


Dipolos magnéticos



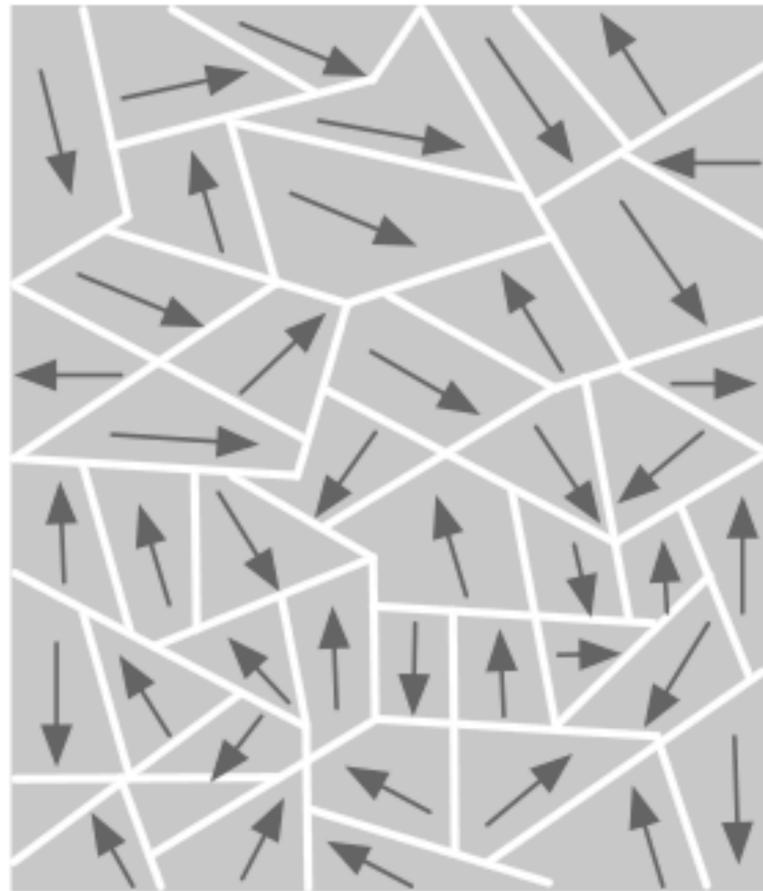
Magnetismo atômico

Magnetismo atômico



Magnetismo atômico

Domínios magnéticos



Domínios magnéticos

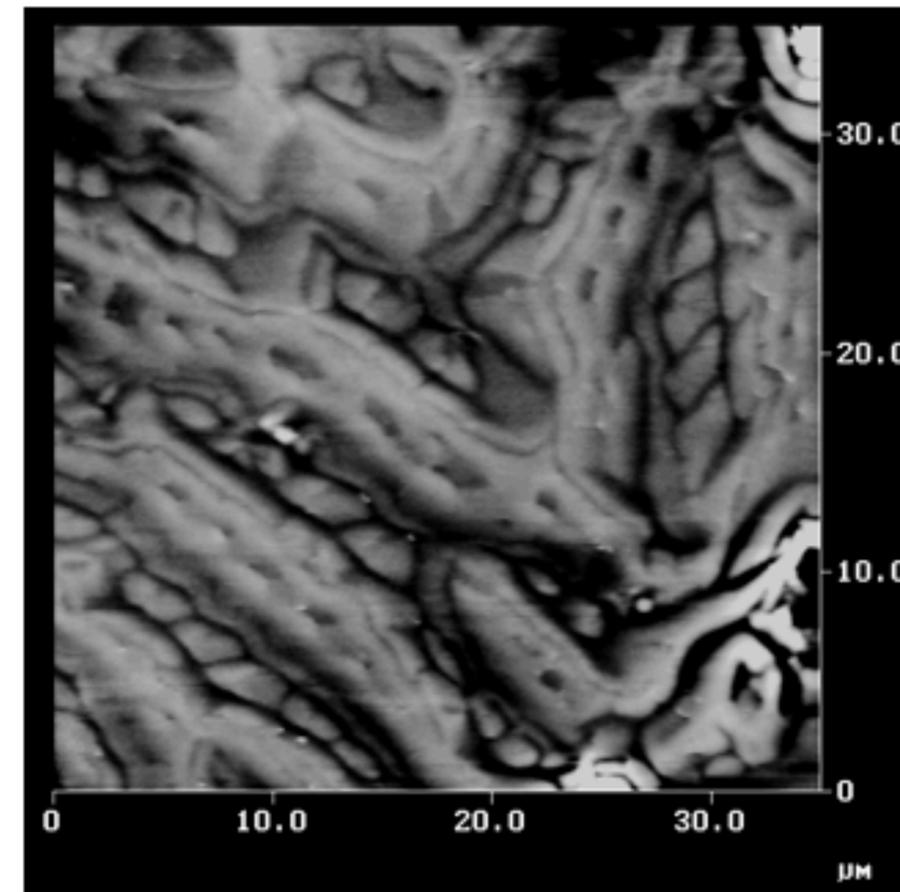
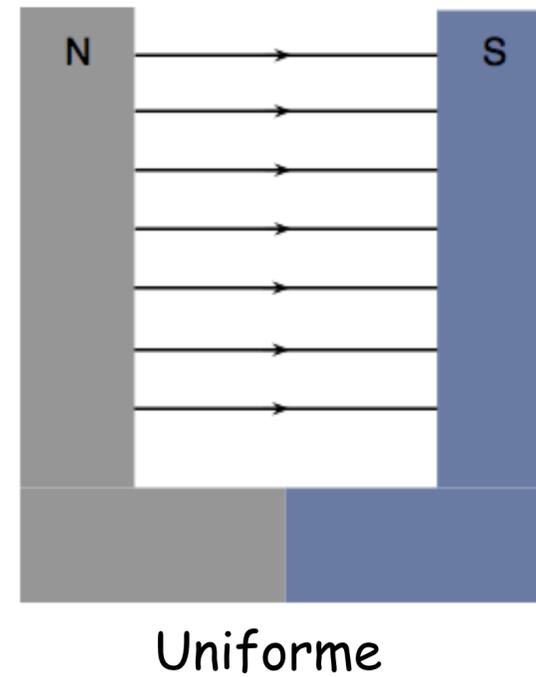
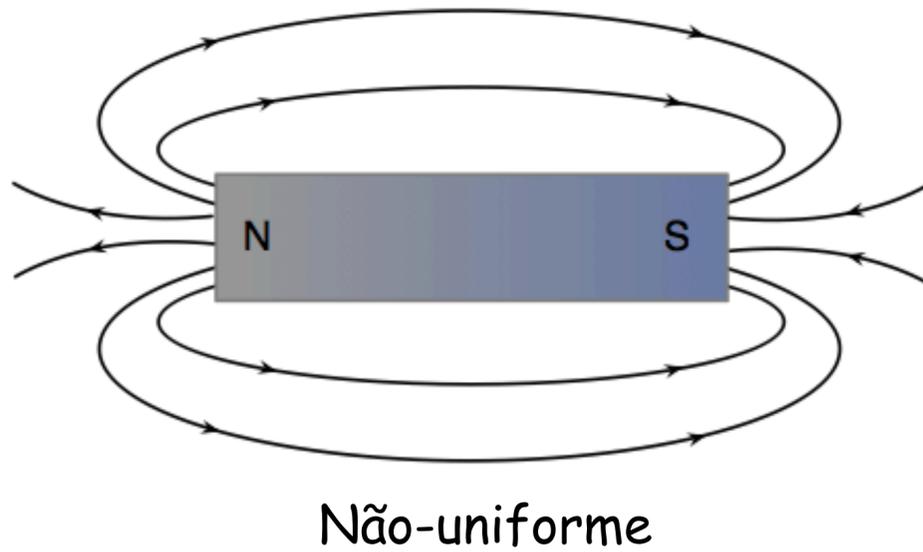


Imagem do material magnético

Conceitos e grandezas eletromagnéticas

Campo magnético:

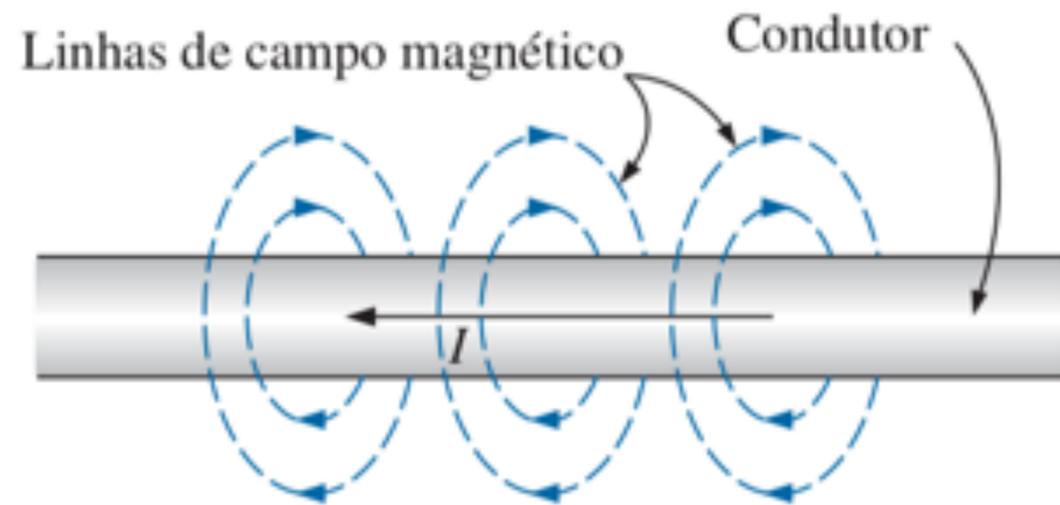
- O campo magnético é uma região do espaço onde se tem a presença de fenômenos magnéticos, especificamente linhas de campo.



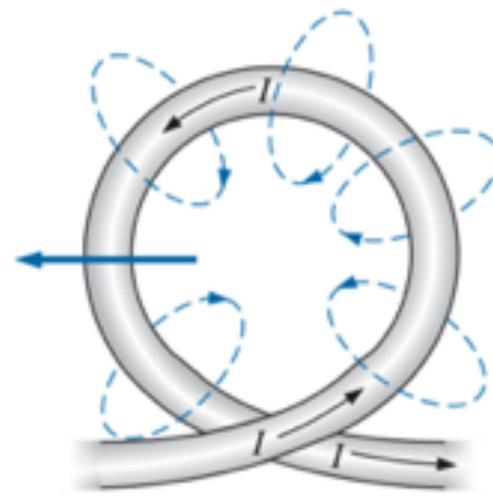
Conceitos e grandezas eletromagnéticas

Campo magnético:

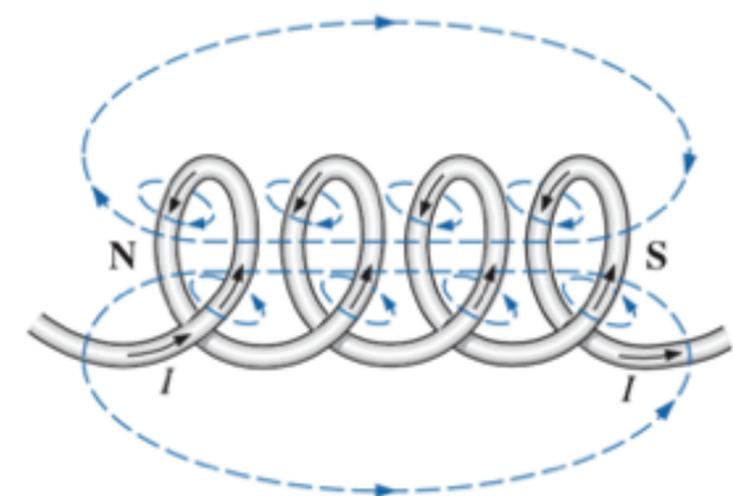
- Originado em um condutor retilíneo, espira ou enrolamento (bobina).



Condutor



Espira



Bobina

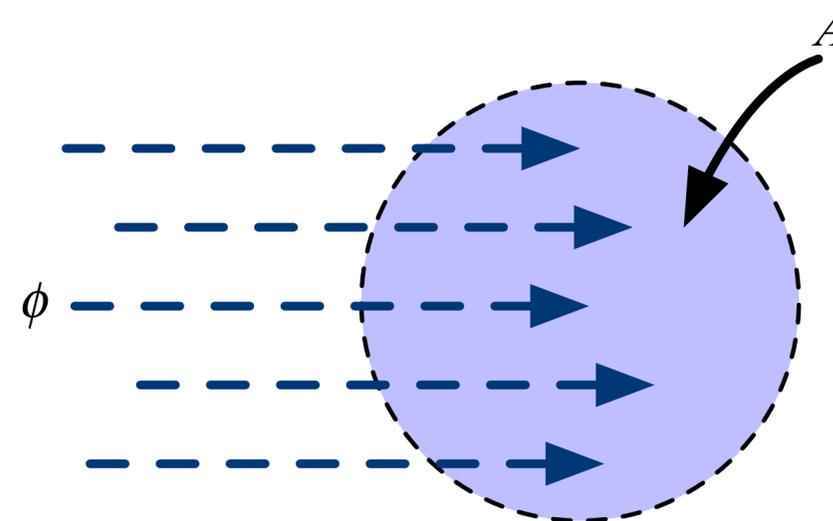
Fonte: (Boylestad, 2012)

Conceitos e grandezas eletromagnéticas

Densidade de fluxo magnético e fluxo magnético:

- Densidade de fluxo (B) é número de linhas de campo por unidade de área. Sua unidade é Tesla [T], onde um Tesla é igual a 1 Weber por metro quadrado de área;
- Fluxo magnético (ϕ) é o conjunto de todas as linhas de campo que atingem perpendicularmente uma área. Tem como unidade o Weber [Wb], sendo que 1 Weber corresponde a 1×10^8 linhas de campo.

$$B = \frac{\phi}{A} \left[T = \frac{Wb}{m^2} \right]$$



Fluxo magnético em uma área A

Conceitos e grandezas eletromagnéticas

Força magnetizante:

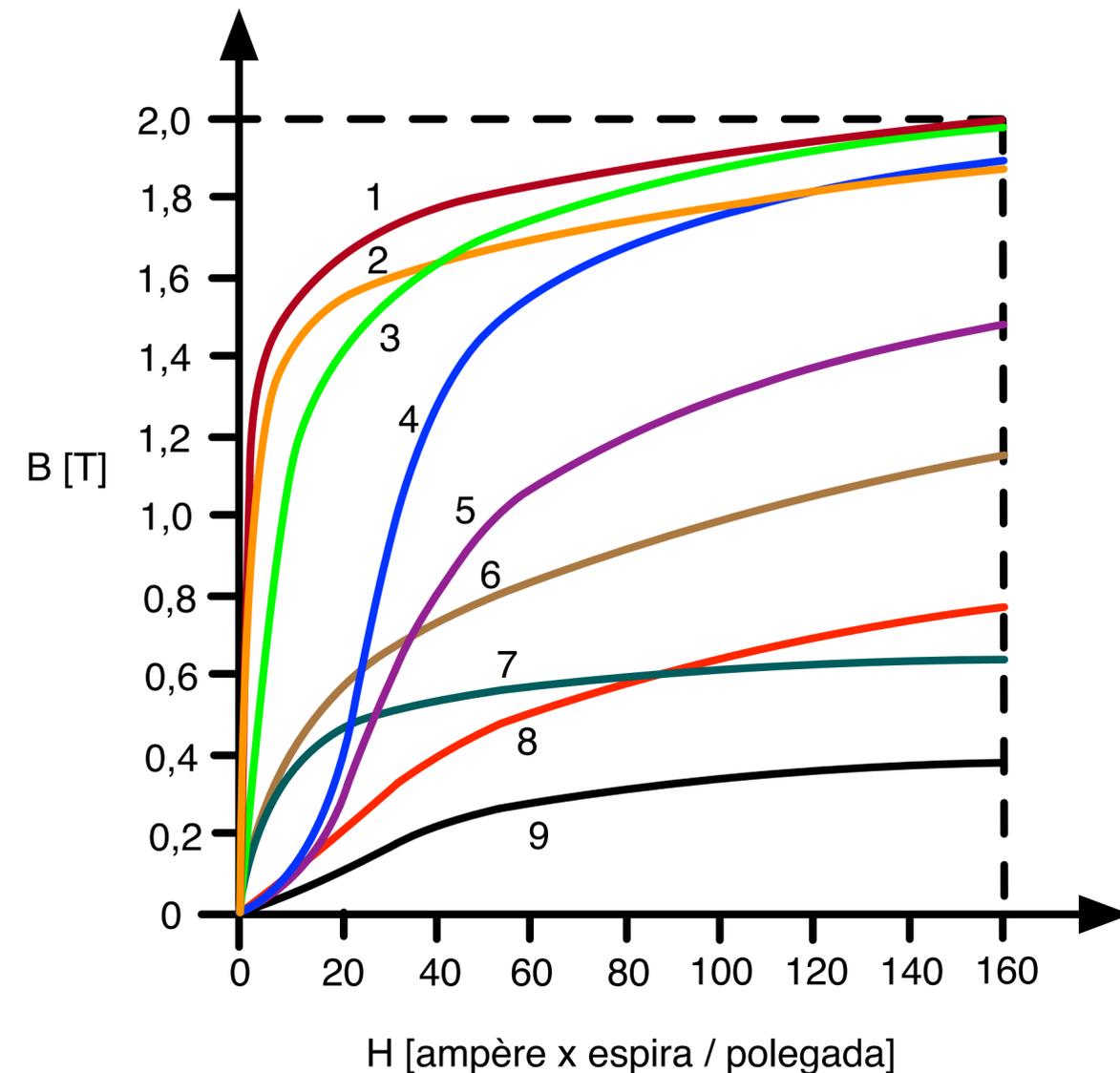
- A reação do material ao campo magnético é denominada de força magnetizante (H), sendo dependente da corrente elétrica, do número de espiras e da geometria do elemento magnético.

- Curva $B \times H$ para diferentes materiais:

- 1 - chapa de aço;
- 2 - aço silício;
- 3 - aço fundido;
- 4 - aço tungstênio;
- 5 - aço magnético;
- 6 - ferro fundido;
- 7 - níquel;
- 8 - cobalto;
- 9 - magnetita.



$$H \cong (I, N, l) [A / m]$$



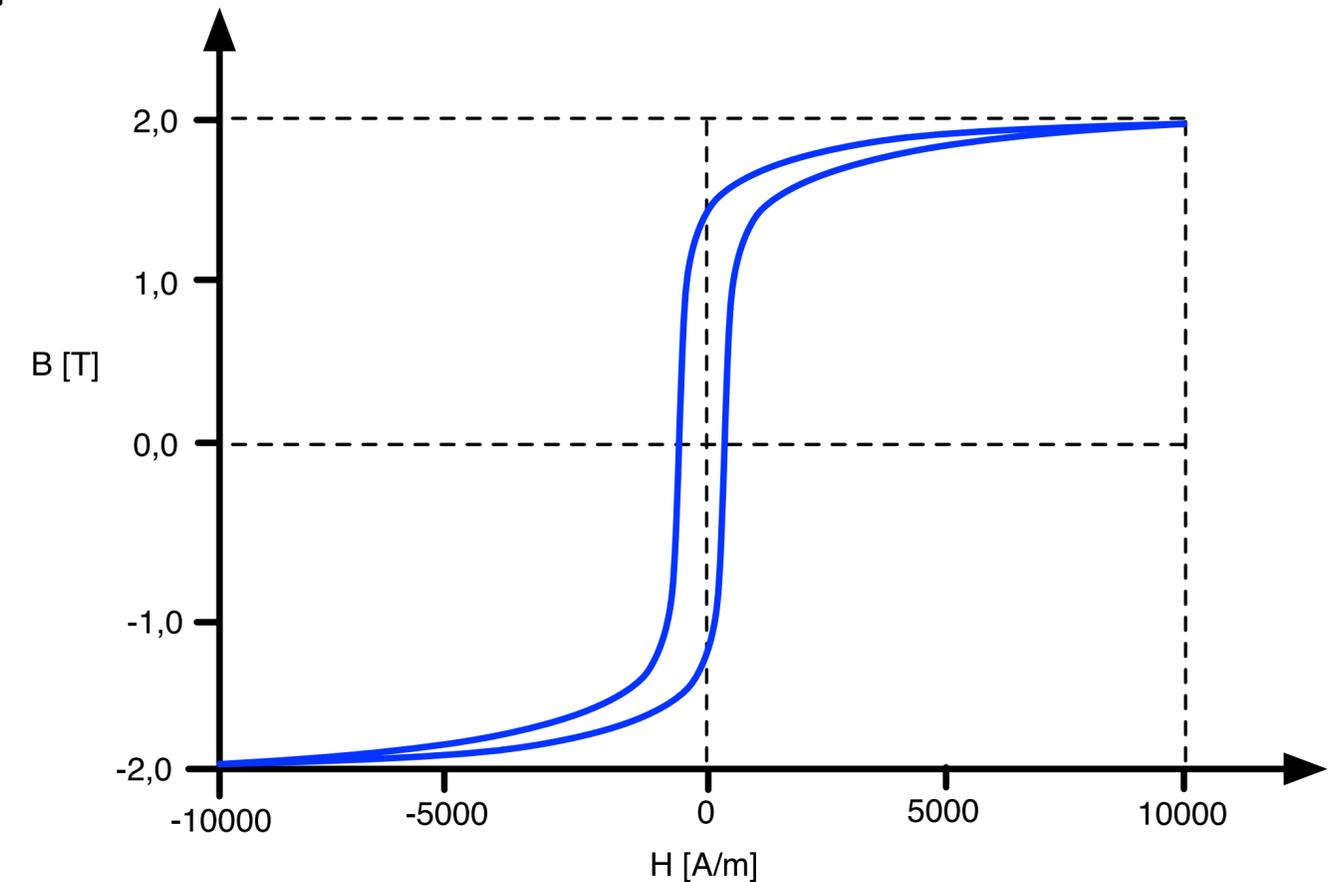
Conceitos e grandezas eletromagnéticas

Permeabilidade magnética:

- A relação entre a densidade de campo magnético (B) e a força magnética (H) é denominada de permeabilidade magnética.
- A classificação dos materiais é realizada conforme sua permeabilidade magnética, ou seja, seu comportamento quando imerso em um campo magnético, concentrando ou não as linhas de campo.

$$\mu = \frac{B}{H} \left[\frac{Wb}{A/m} \right] \quad \mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Wb}{A/m}$$

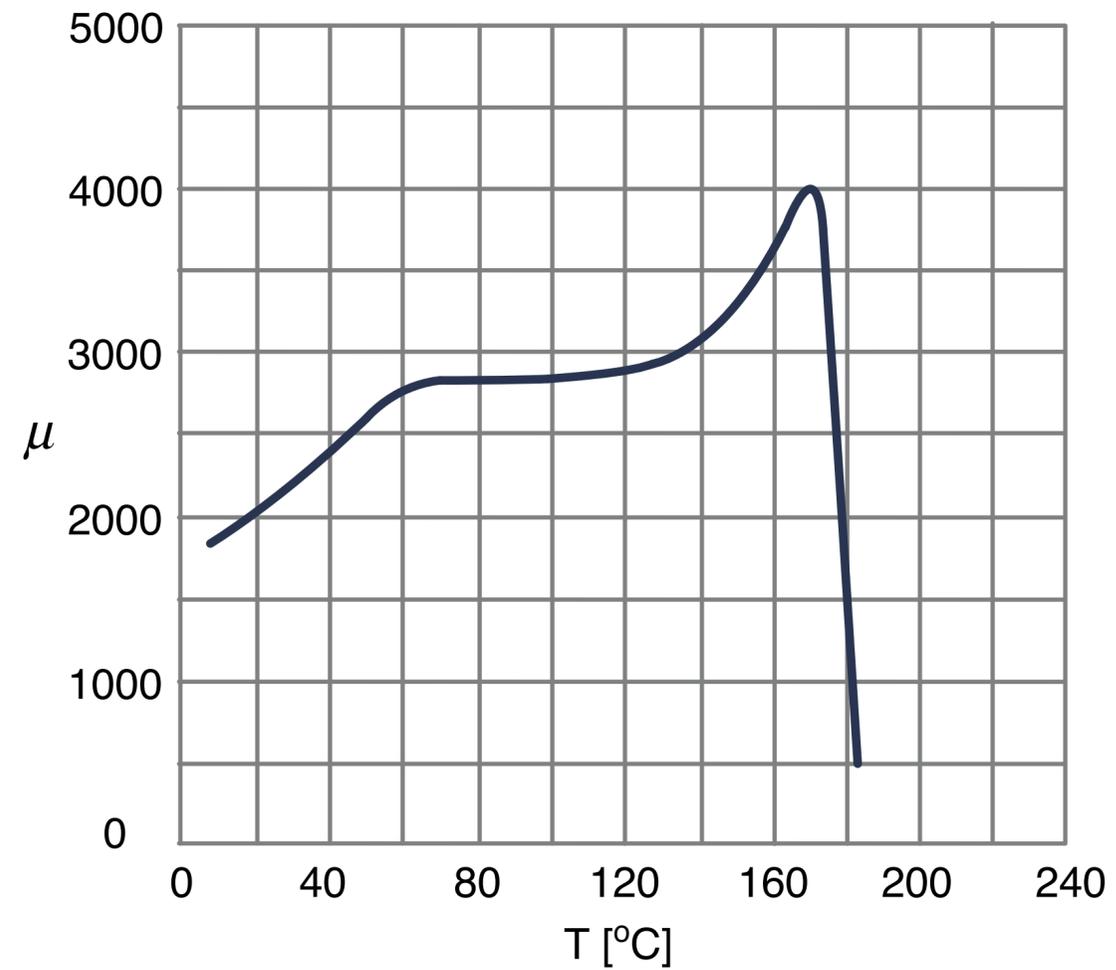
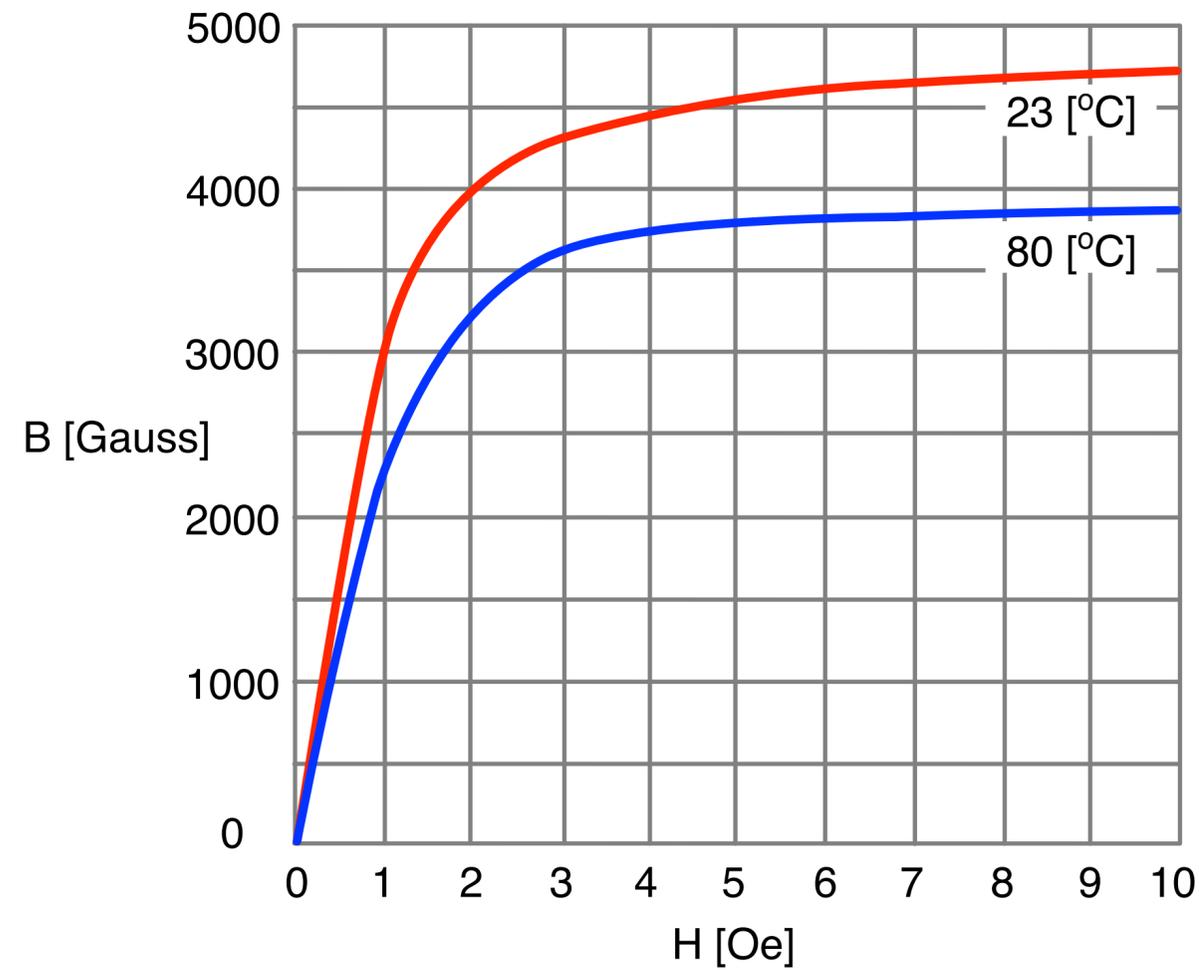
Material	Permeabilidade relativa (μ_r)
Ar	1
Papel, plástico, fenolite	1
Ferrite	2.000
Ferro comercial	9.000
Ferro silício	55.000
Permalloy	1.000.000
Super permalloy	10.000.000



Curva B x H (histerese)

Conceitos e grandezas eletromagnéticas

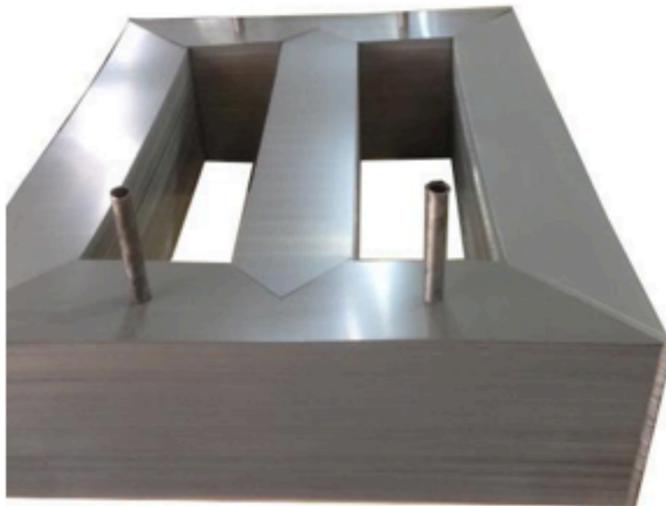
Curva B x H:



Curva B x H para ferrites do fabricante Thornton (<https://thornton.com.br/>)

Conceitos e grandezas eletromagnéticas

Materiais utilizados para núcleos magnéticos:



núcleo de ferro-silício

<https://www.tessin.com.br>



núcleos de ferrite

<https://www.thornton.com.br>



núcleos de pós-metálicos

<http://www.magmatec.com.br>

Conceitos e grandezas eletromagnéticas

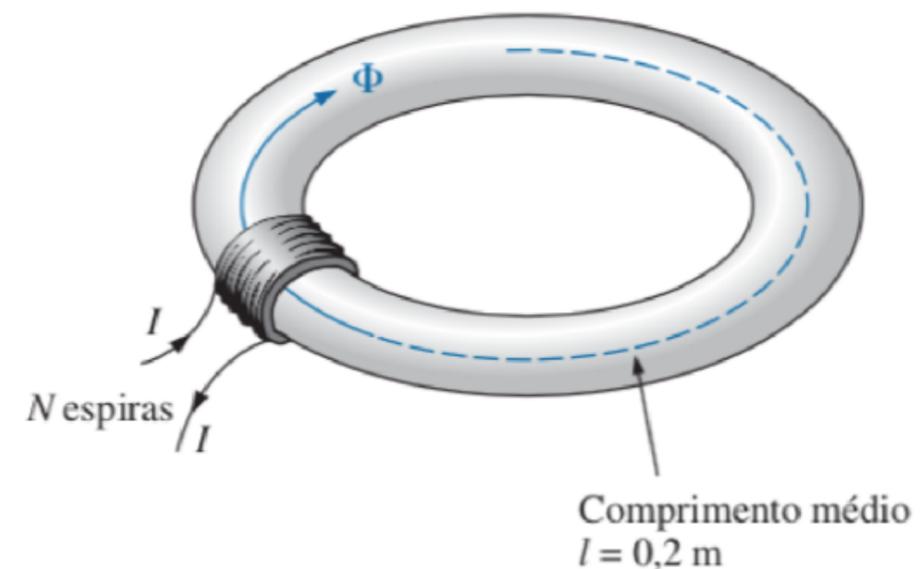
Circuitos magnéticos:

- A força magnetomotriz (F) é equivalente a tensão elétrica, representando a pressão ou força para o estabelecimento das linhas magnéticas (fluxo magnético), sendo diretamente relacionada com o número de espiras e a corrente aplicada ao elemento.

$$\mathcal{F} = N \cdot I \text{ [Ae]}$$

Onde:

- F – Força magnetomotriz em ampères-espiras (Ae);
- N – Número de espiras (e);
- I – Corrente elétrica em ampères (A).



Exemplo de circuito magnético
Fonte: (Boylestad, 2012)

Conceitos e grandezas eletromagnéticas

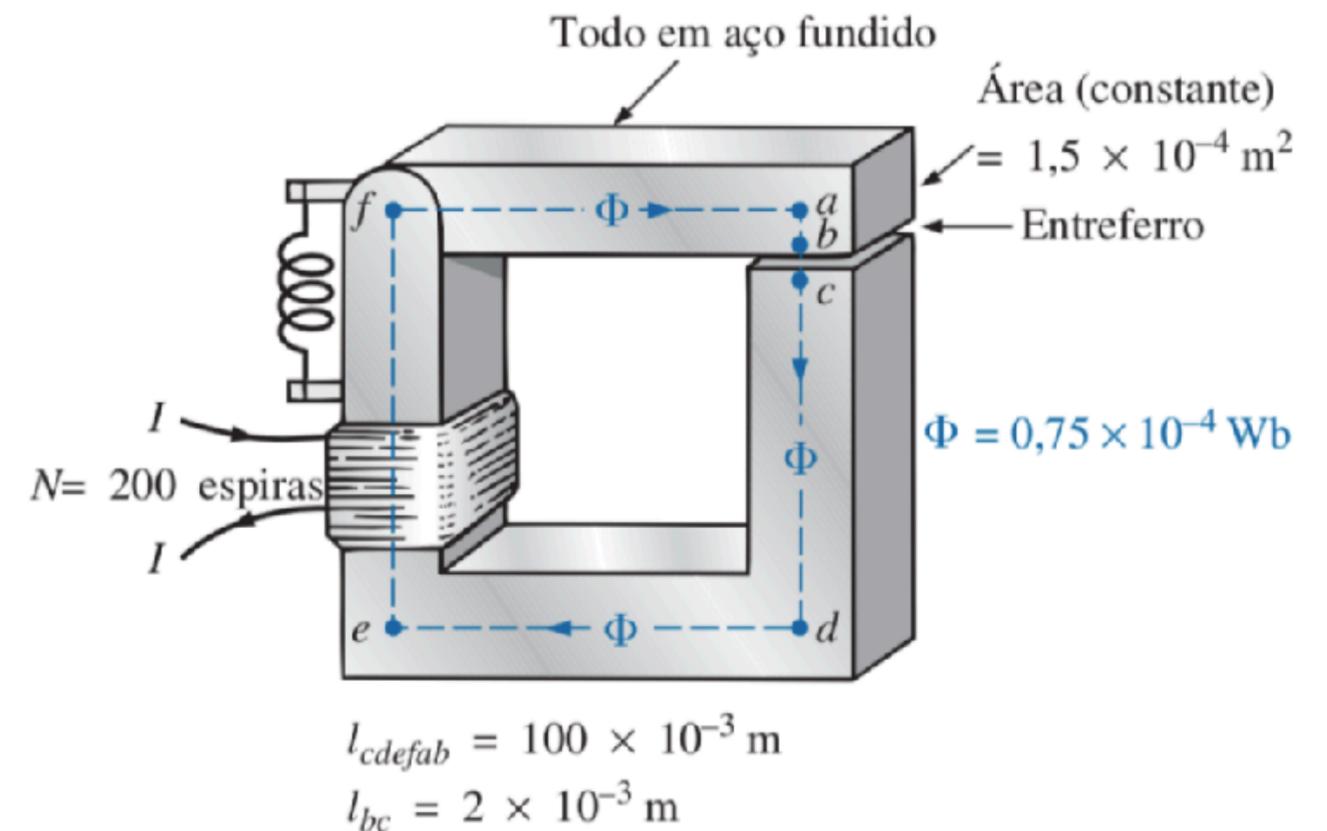
Circuitos magnéticos:

- A relutância magnética (R) é a oposição ao estabelecimento das linhas de campo, equivalente à resistência elétrica em circuitos eletroeletrônicos, sendo dada por.

$$\mathfrak{R} = \frac{l}{\mu \cdot A} \left[\text{rels, ou } Ae / \text{Wb} \right]$$

Onde:

- l – Comprimento do caminho magnético em metros (m);
- μ – Permeabilidade magnética em Wb/Am ;
- A – área da seção transversal em m^2 .



Exemplo de circuito magnético

Fonte: (Boylestad, 2012)

Conceitos e grandezas eletromagnéticas

Circuitos magnéticos:

- A Lei Circuital de Ampère determina que a soma das forças magnetomotrizes ao longo de um caminho fechado deve ser nula, similarmente ao que determina a Lei de Kirchhoff das Tensões para um circuito elétrico.

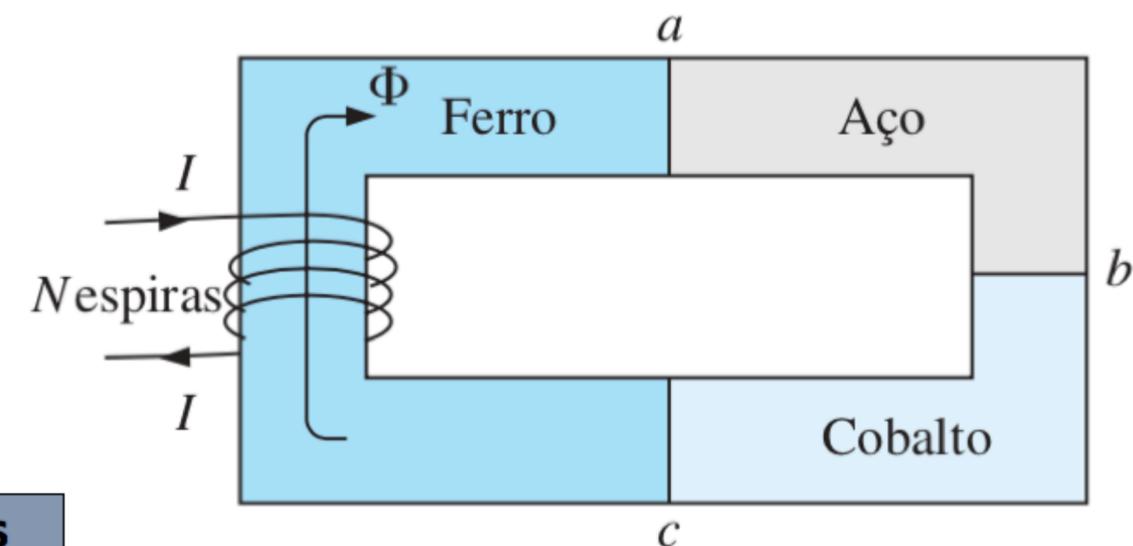
$$\sum_{\leftrightarrow\downarrow} V = 0 \rightarrow (\text{para circuitos elétricos})$$

$$\sum_{\leftrightarrow\downarrow} \mathcal{F} = 0 \rightarrow (\text{para circuitos magnéticos})$$

$$V = R \cdot I \rightarrow (\text{para circuitos elétricos})$$

$$\mathcal{F} = \mathcal{R} \cdot \phi \rightarrow (\text{para circuitos magnéticos})$$

	Circuitos elétricos	Circuitos magnéticos
Causa	E	\mathcal{F}
Oposição	R	\mathcal{R}
Efeito	I	ϕ



Exemplo de circuito magnético
Fonte: (Boylestad, 2012)

Lei de Faraday:

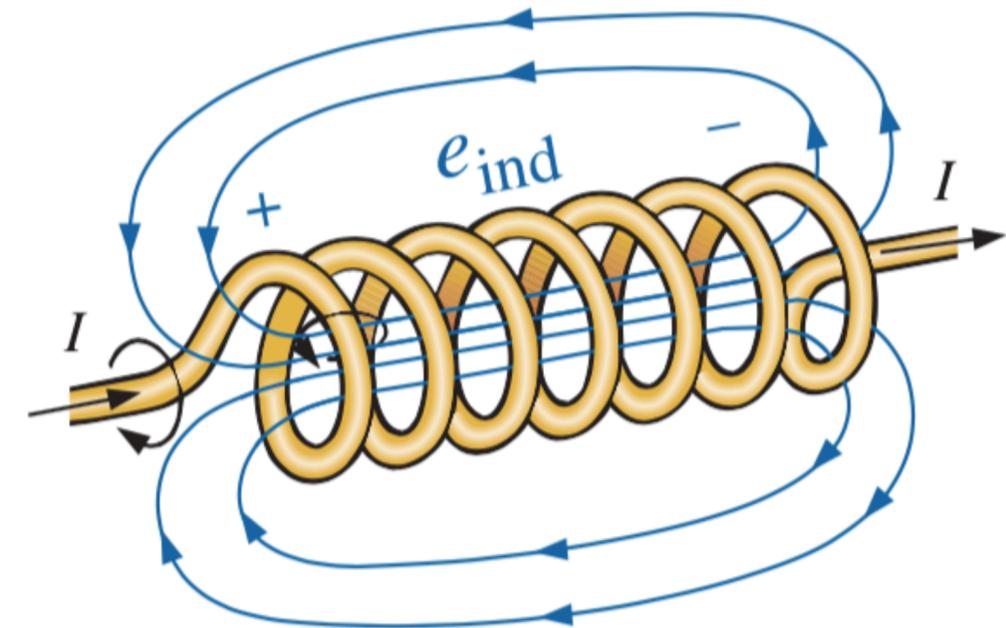
- A Lei de Faraday explicita que em todo condutor enquanto sujeito a uma variação de fluxo magnético é estabelecida uma força eletromotriz (tensão) induzida.

$$e = N \cdot \frac{d(\phi)}{d(t)} [V]$$

Lei de Lenz:

- A Lei de Lenz impõe que o sentido da corrente induzida é tal que origina um fluxo magnético induzido, que se opõe à variação do fluxo magnético indutor.

$$e = -N \cdot \frac{d(\phi)}{d(t)} [V]$$



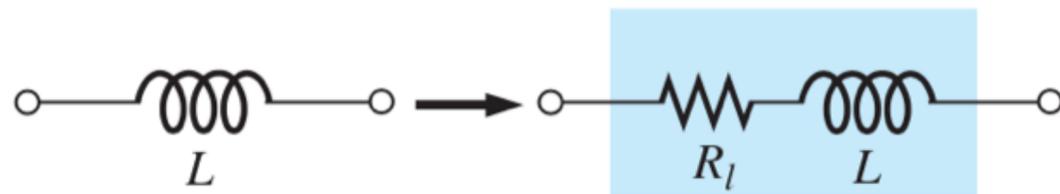
Leis de Faraday e Lenz
Fonte: (Boylestad, 2012)

Indutância

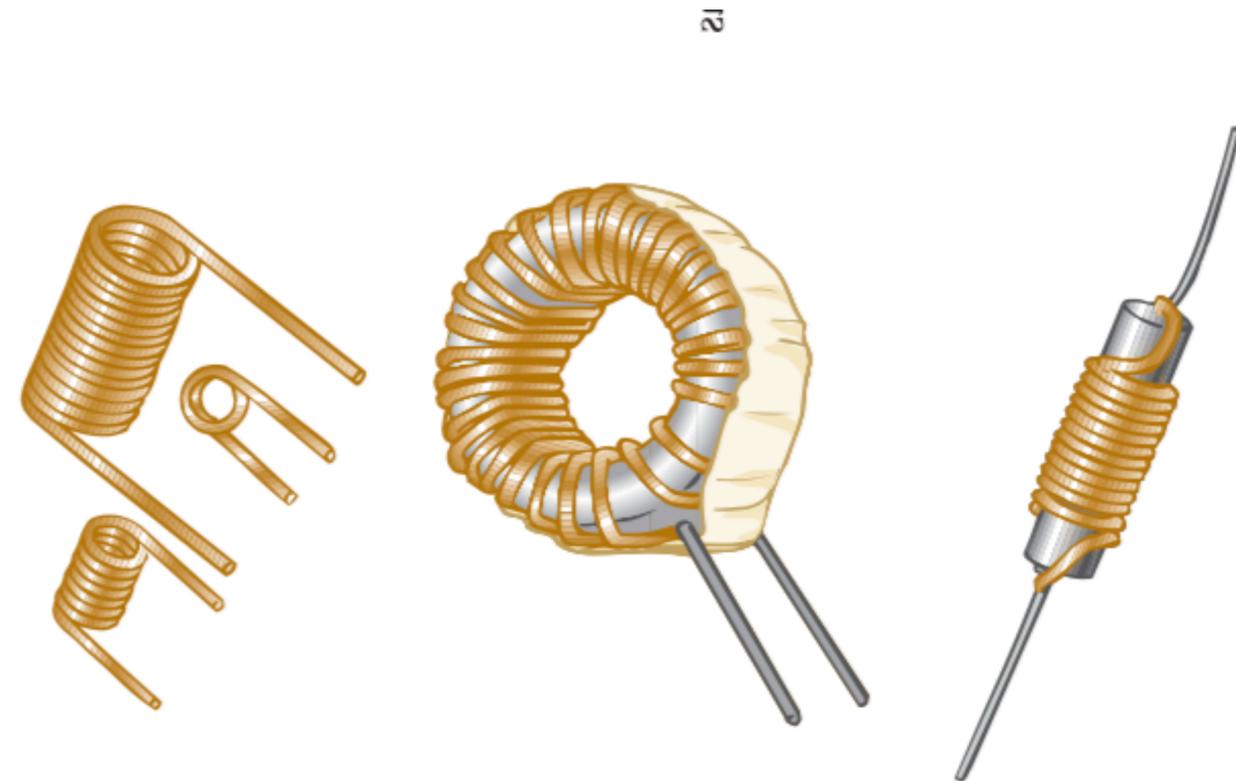
Indutância:

- A indutância é uma propriedade dos componentes, ou seja, é um fenômeno que ocorre na presença de variação de corrente elétrica. Assim, todos os componentes apresentam indutância, sendo esta maximizada nos indutores, em virtude de suas características construtivas e pelo emprego de materiais ferromagnéticos.

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



Modelo elétrico do indutor

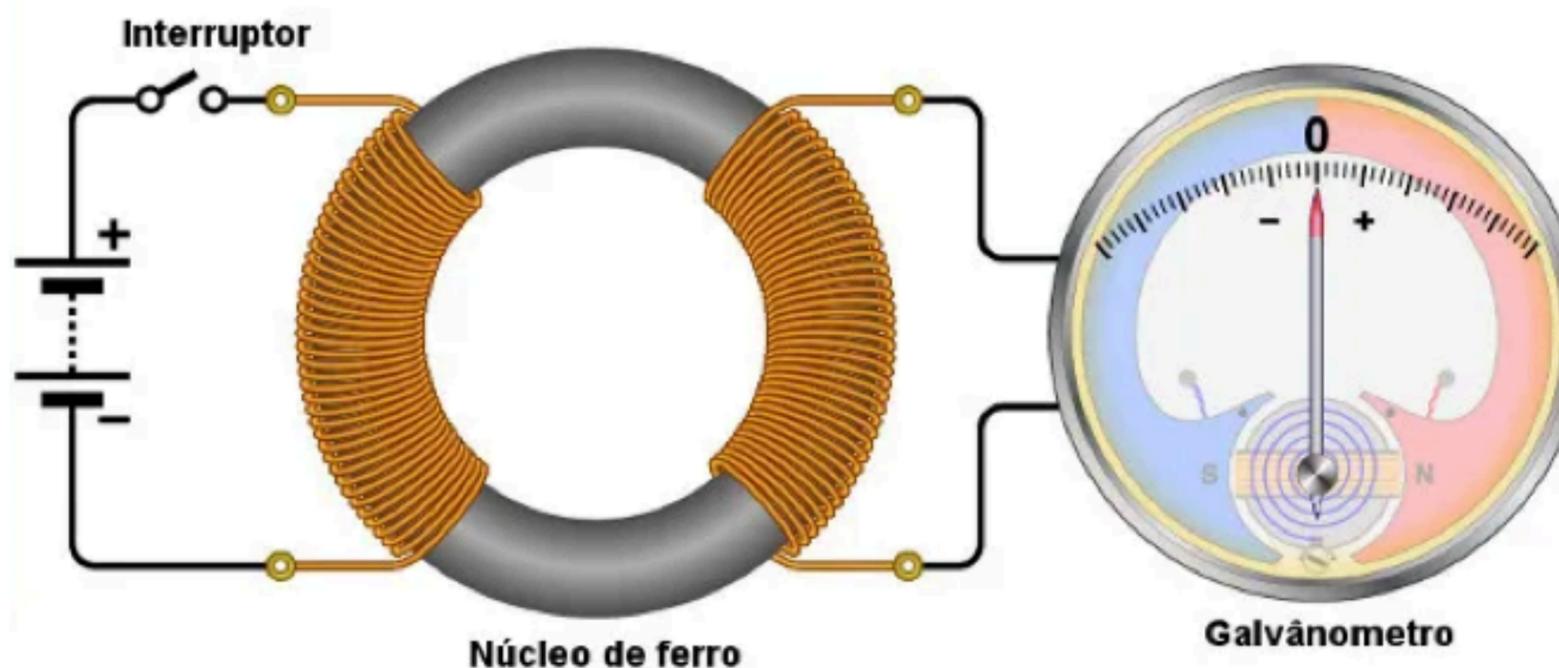


Exemplos de indutores
Fonte: (Boylestad, 2012)

Transformadores

Indução eletromagnética:

- Experimento de Faraday:
 - No momento que a chave é fechada, o galvanômetro acusa uma pequena corrente de curta duração;
 - Após a corrente cessar e durante o 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.



Experimento de Faraday

Fonte: <https://brasilecola.uol.com.br>

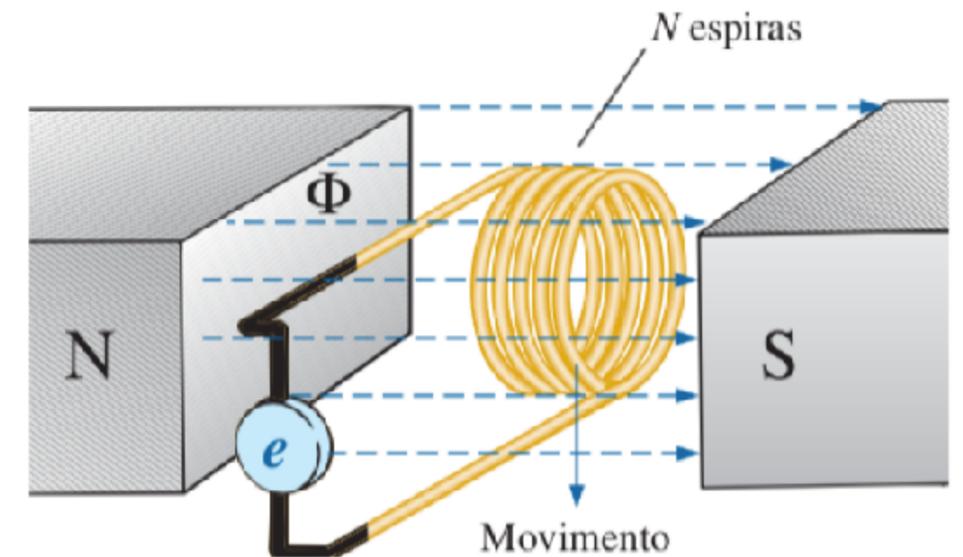
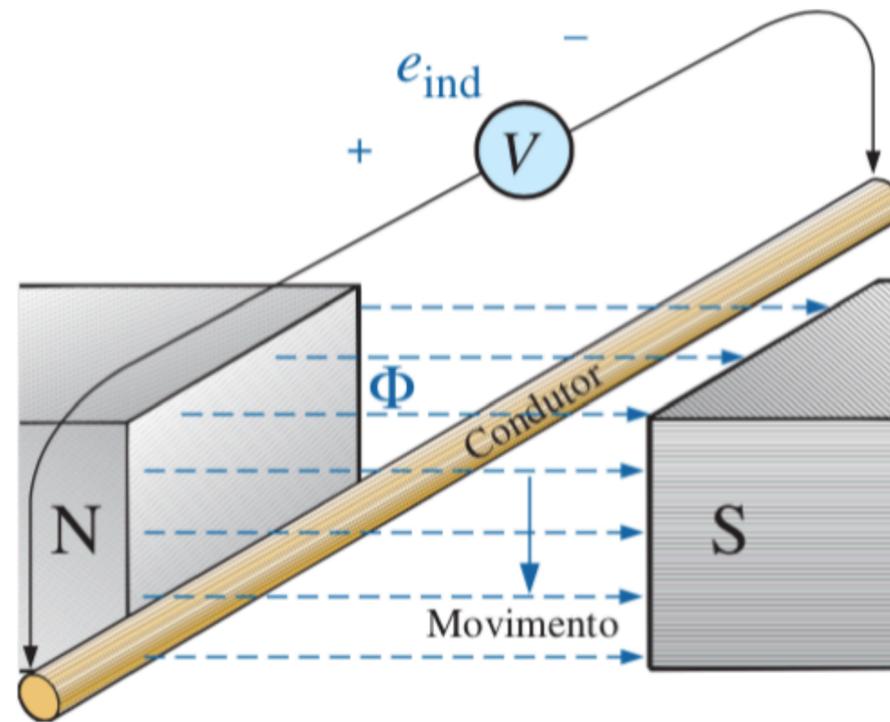
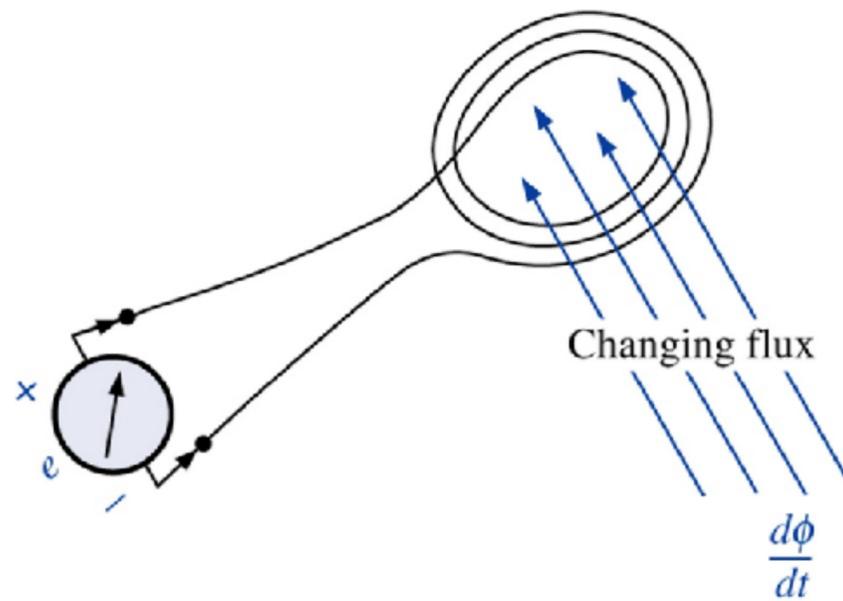
Transformadores

Indução eletromagnética:

- Leis de Faraday e Lenz.

$$e = N \cdot \frac{d(\phi)}{d(t)} [V]$$

$$e = -N \cdot \frac{d(\phi)}{d(t)} [V]$$



Indução eletromagnética em: bobina com fluxo variável, condutor em movimento, bobina em movimento

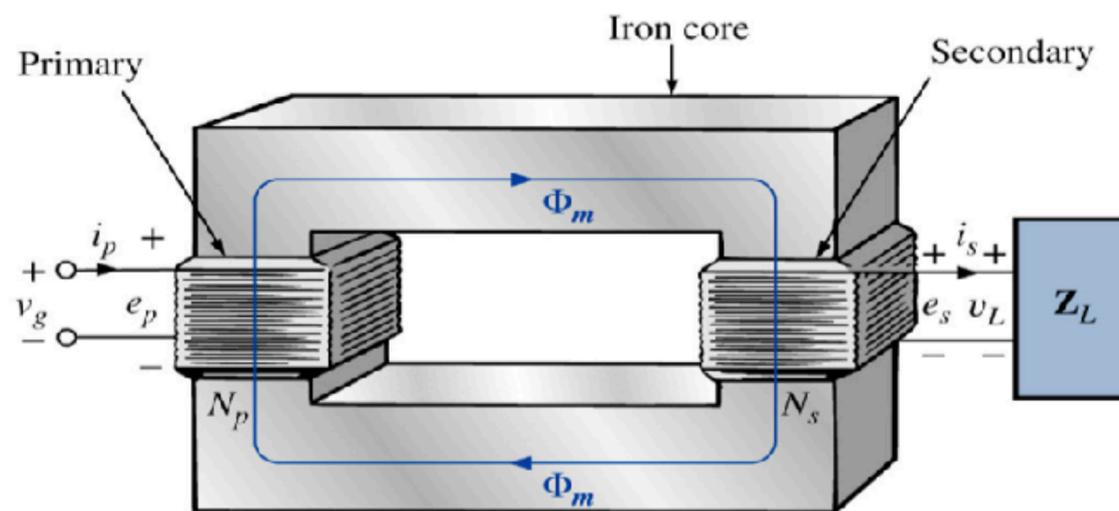
Fonte: (Boylestad, 2012)

Transformadores

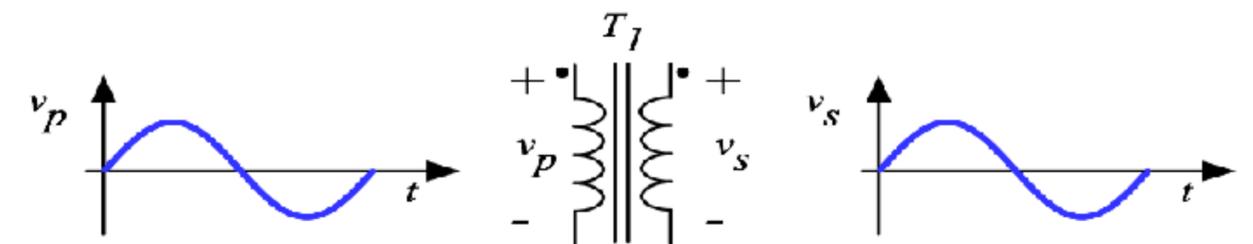
Transformador:

- Aplicando a Lei de Faraday:

$$\left\{ \begin{array}{l} e_p(t) = N_p \cdot \frac{d\phi_p}{dt} \rightarrow \frac{d\phi_p}{dt} = \frac{e_p(t)}{N_p} \\ e_s(t) = N_s \cdot \frac{d\phi_p}{dt} \rightarrow \frac{d\phi_p}{dt} = \frac{e_s(t)}{N_s} \end{array} \right. \rightarrow \frac{e_p(t)}{N_p} = \frac{e_s(t)}{N_s} \rightarrow \frac{e_p(t)}{e_s(t)} = \frac{N_p}{N_s}$$



Transformador com núcleo ferromagnético
Fonte: (Boylestad, 2012)



Modelo elétrico do transformador

Força eletromagnética

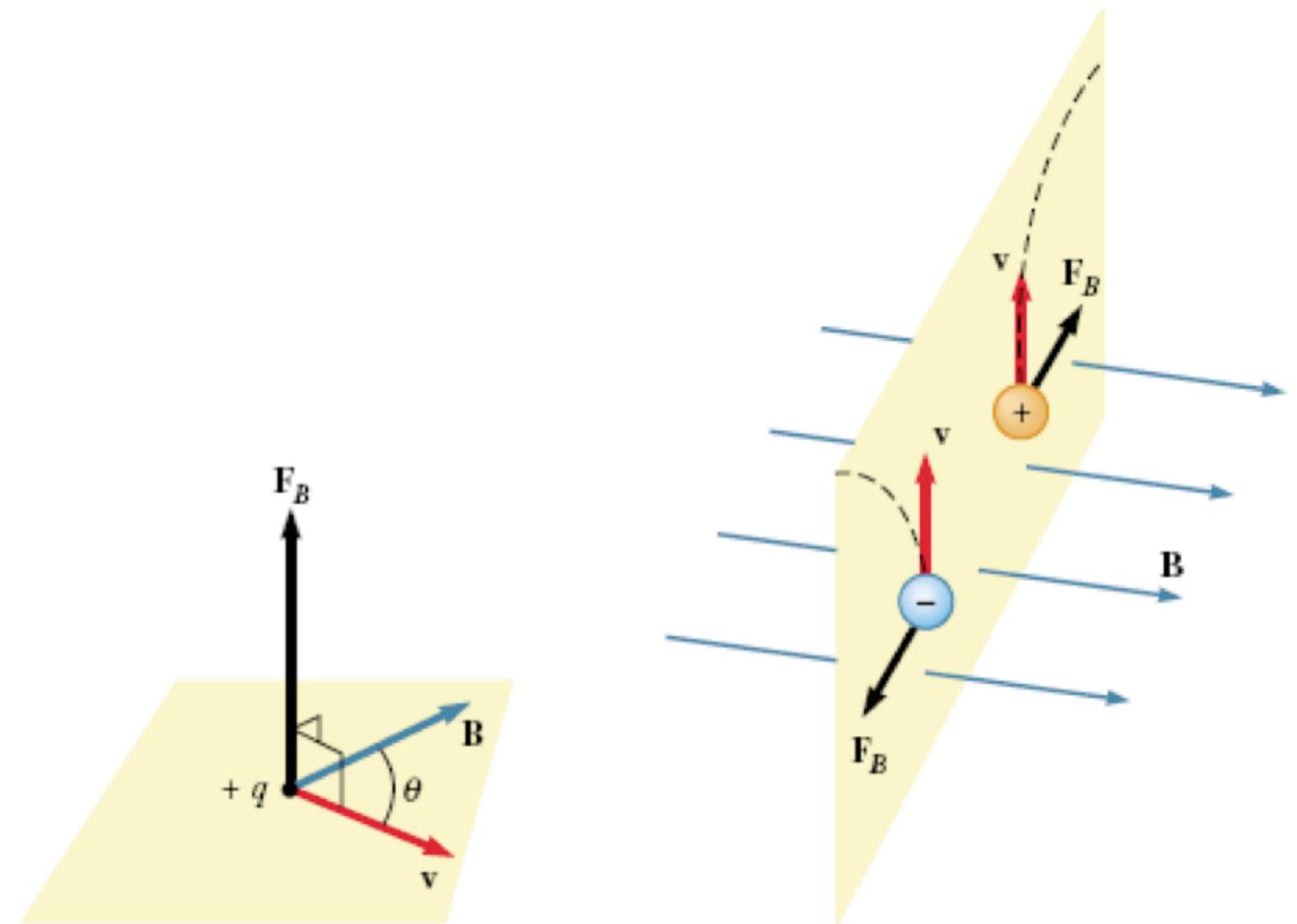
Força eletromagnética:

- Um condutor percorrido por uma corrente elétrica e imerso em um campo magnético sofre a ação de uma força eletromagnética.
- A força poderá ocorrer sobre:
 - Uma partícula (carga);
 - Um condutor retilíneo;
 - Condutores paralelos;
 - Em uma espira.

$$F = B \cdot I \cdot l \cdot \text{seno}(\theta)$$

Onde:

- F – Intensidade da força eletromagnética (N);
- B – Densidade de campo magnético (T);
- l – Comprimento do condutor inserido no campo magnético (m);
- θ – Ângulo entre as linhas de campo e a superfície longitudinal do condutor (rad).

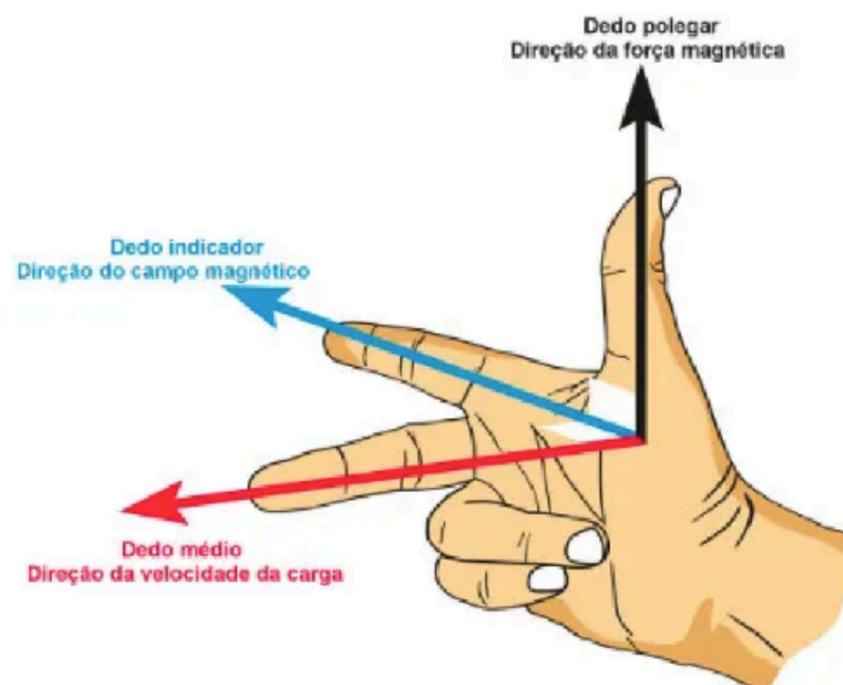


Força sobre cargas elétricas
Fonte: (Halliday, 1984)

Força eletromagnética

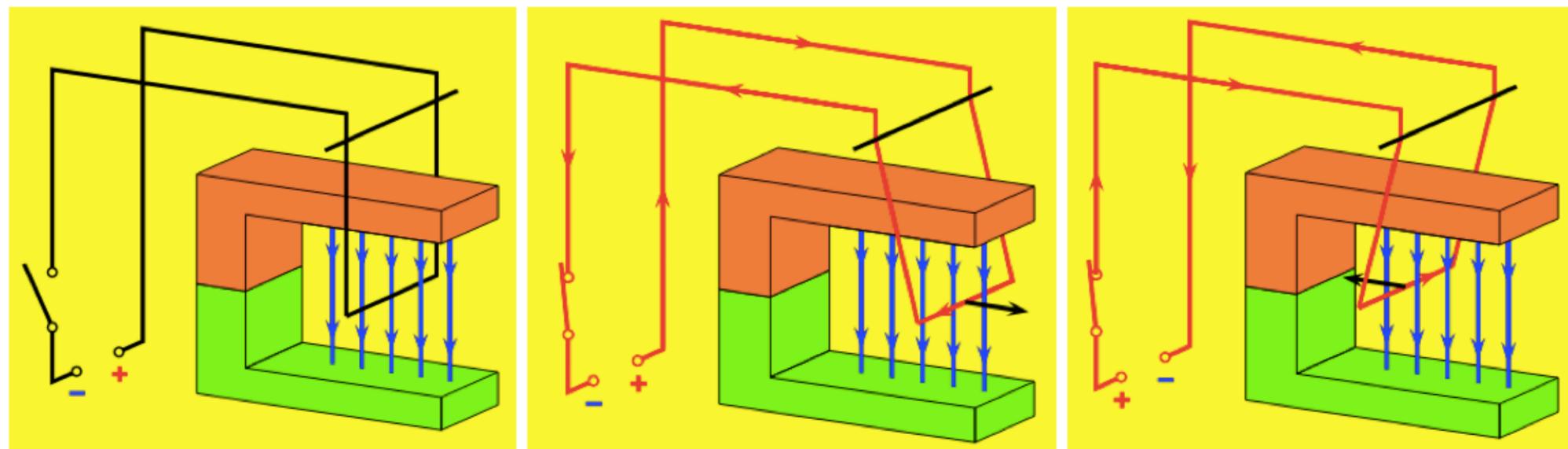
Regra de Fleming:

- Ação motora - ao circular corrente elétrica em um condutor imerso em um campo elétrico, resultará em uma força sobre este condutor. Aplica-se a Regra de Fleming utilizando a mão esquerda;
- Ação geradora - o movimento de um condutor em um campo magnético resulta em uma corrente elétrica. Aplica-se a Regra de Fleming utilizando a mão direita.



Regra de Fleming

Fonte: <https://brasilescola.uol.com.br>



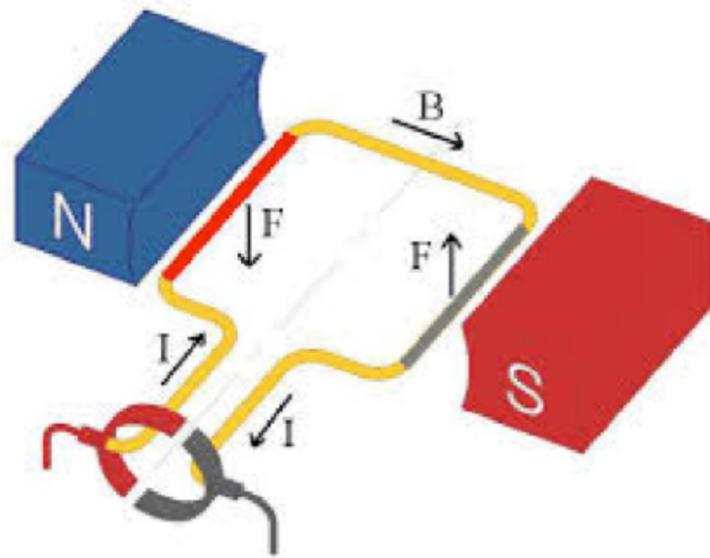
Força sobre um condutor em um campo magnético

Fonte: <https://www.walter-fendt.de>

Força eletromagnética

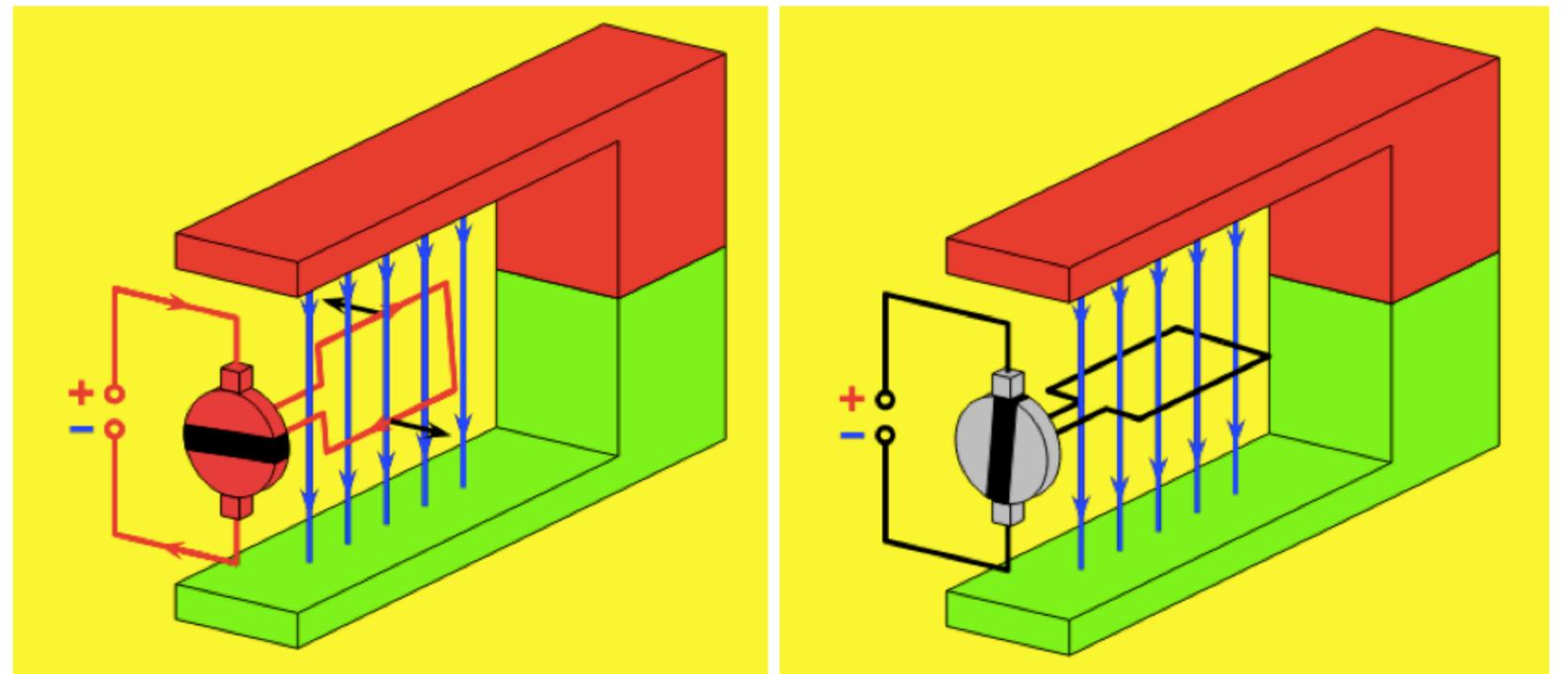
Princípios utilizando a força eletromagnética:

- Princípio motor - o princípio motor determina que um conjunto de espiras imerso em um campo magnético estará sujeito a uma força, denominada de Força de Lorentz, em decorrência dos estudos e descobertas de Hendrik Antoon Lorentz, por volta do ano 1892;
- Princípio gerador - o princípio gerador, por sua vez, determina que uma espira ou bobina, imersa em um campo magnético variante no tempo, estará sujeita a uma corrente induzida, constituindo um gerador eletromagnético.



Espira em um campo magnético

Fonte: <https://www.dt.fee.unicamp.br>

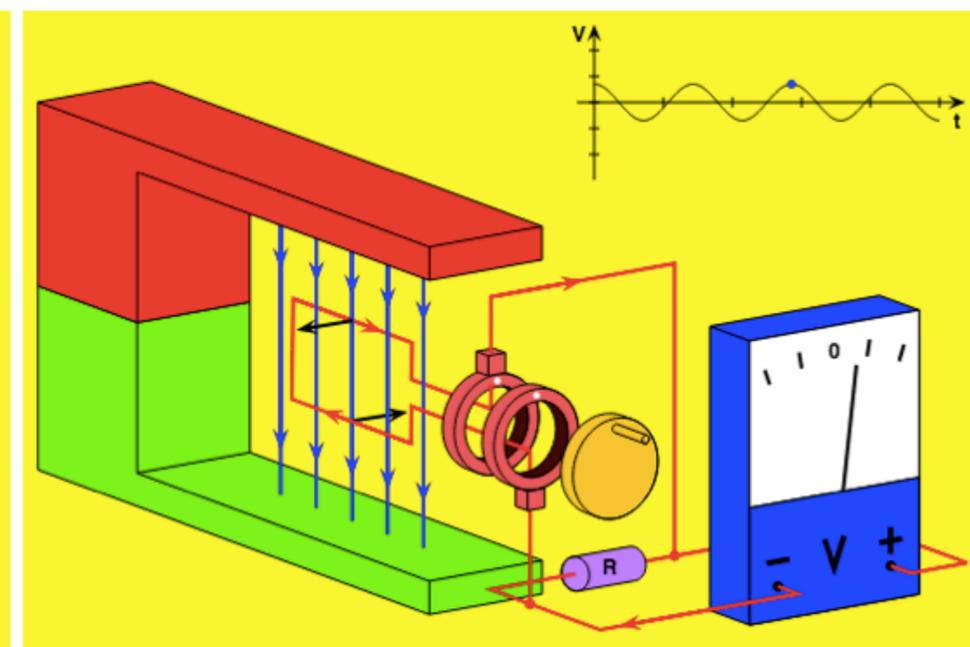
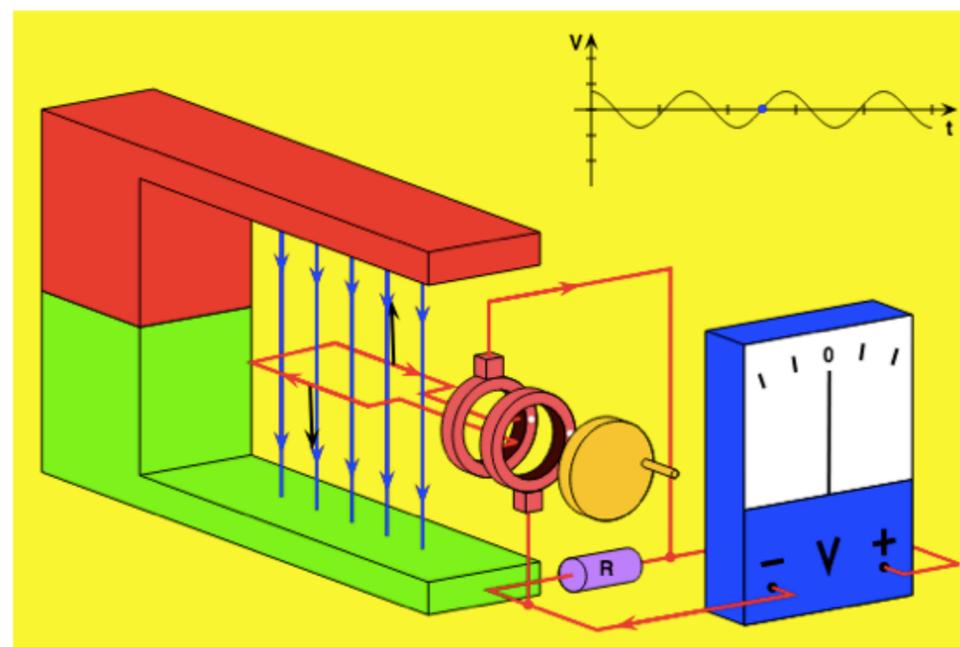
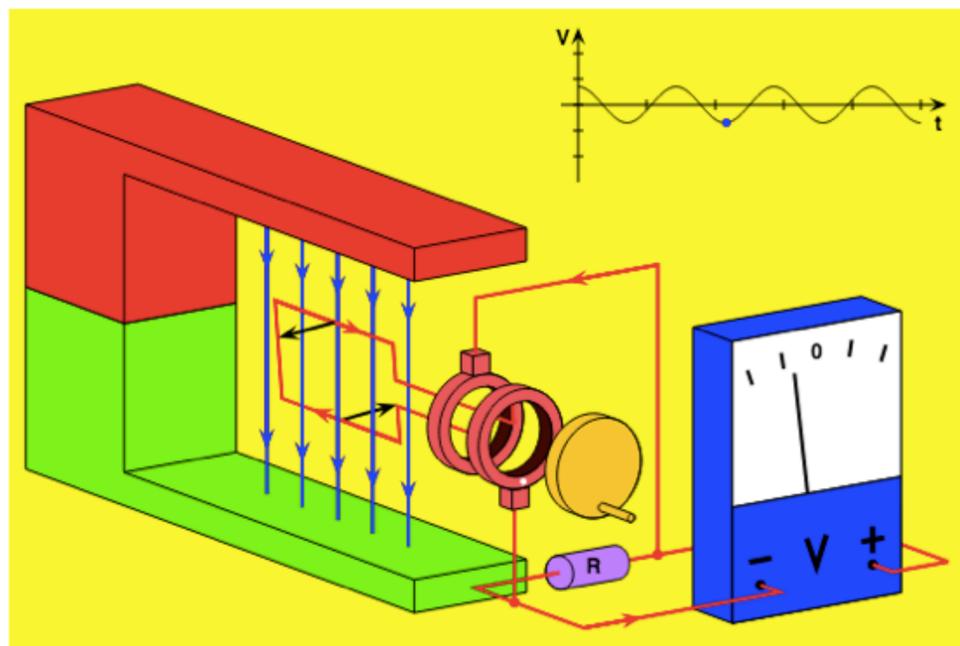
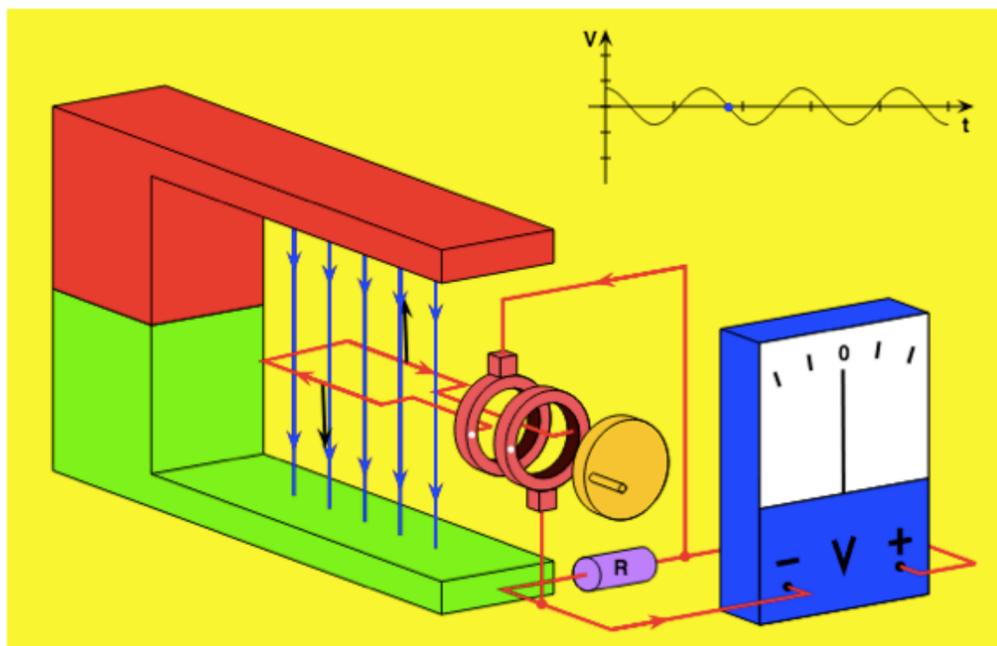


Funcionamento do motor cc

Fonte: <https://www.walter-fendt.de>

Força eletromagnética

Princípios utilizando a força eletromagnética:



Funcionamento do gerador ca
Fonte: <https://www.walter-fendt.de>

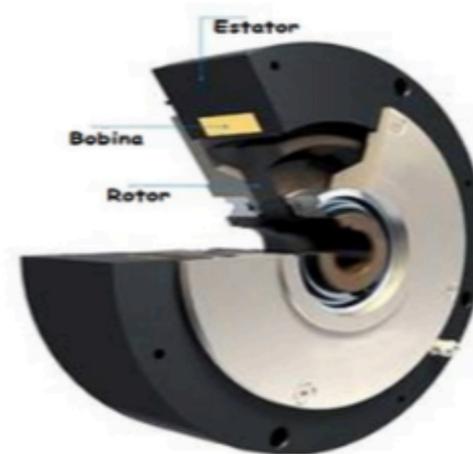
Aspectos de elementos magnéticos

Perdas nos elementos magnéticos:

- Perdas no enrolamento - perdas por efeito Joule nos condutores (espiras);
- Perdas no núcleo:
 - Perdas por histerese - perdas para a orientação dos domínios magnéticos;
 - Perdas por correntes parasitas - perdas por efeito Joule pela indução de correntes no próprio núcleo.



<http://www.nardineletrica.com.br>



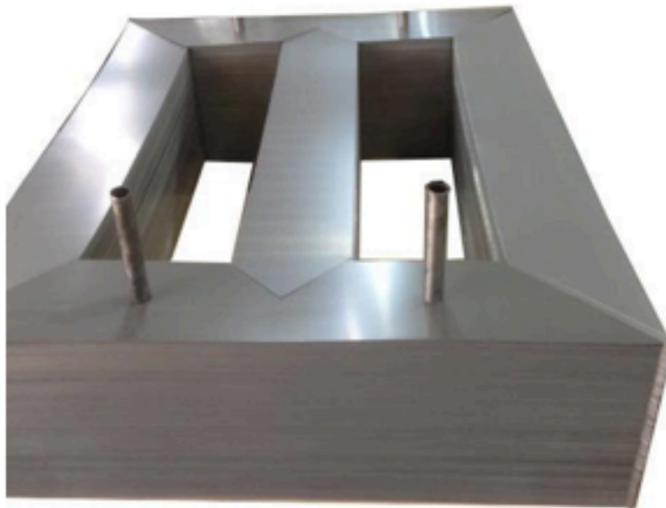
<http://www.solucoesindustriais.com.br>



<http://loja.fischer.com.br>

Aspectos de elementos magnéticos

Tipos de núcleos:



núcleo de ferro-silício

<https://www.tessin.com.br>



núcleos de ferrite

<https://www.thornton.com.br>



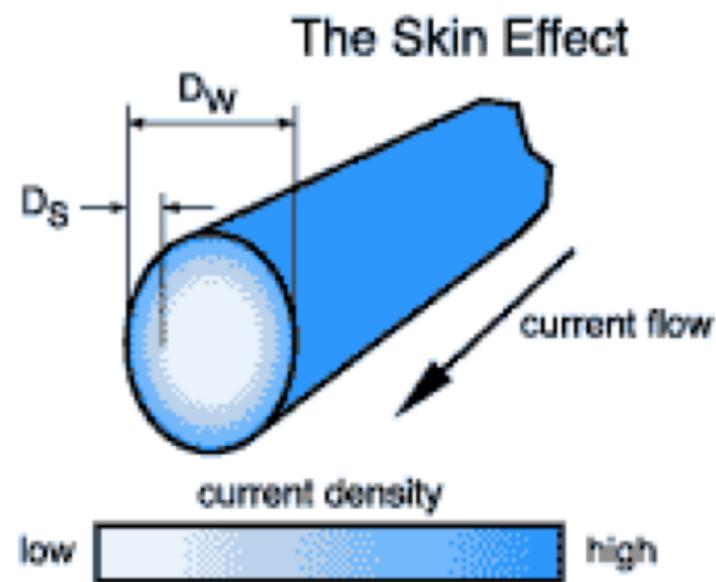
núcleos de pós-metálicos

<http://www.magmatec.com.br>

Aspectos de elementos magnéticos

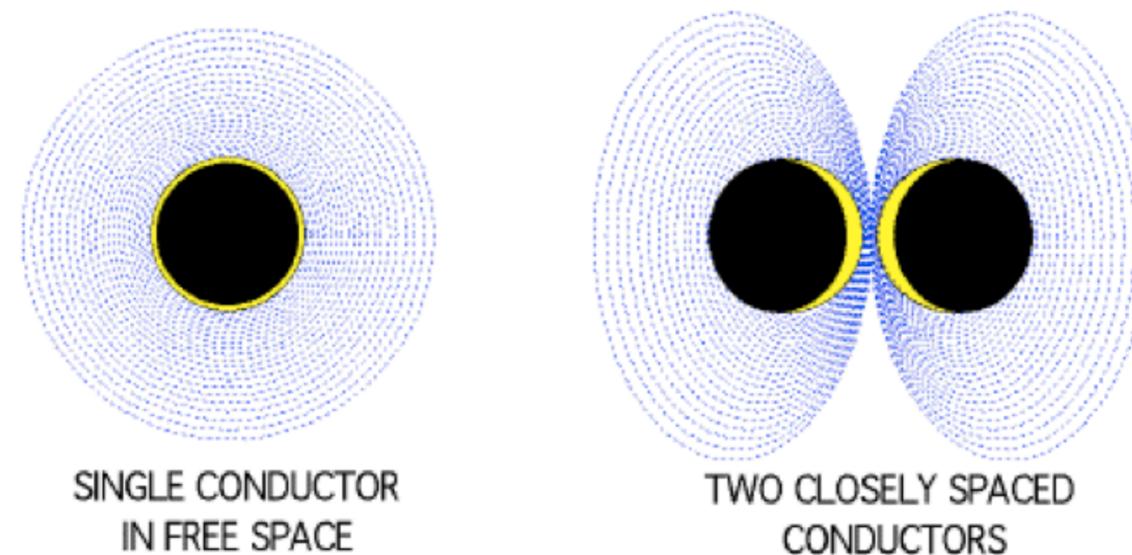
Efeitos nos condutores:

- Efeito de proximidade - Relaciona um aumento na resistência em função dos campos magnéticos produzidos pelos demais condutores colocados nas adjacências;
- Efeito pelicular (efeito skin) - Restringe a secção do condutor para frequências elevadas. Em altas frequências, a tensão oposta induzida se concentra no centro do condutor, resultando em uma corrente maior próxima à superfície do condutor e uma rápida redução próxima do centro.



Efeito pelicular (skin)

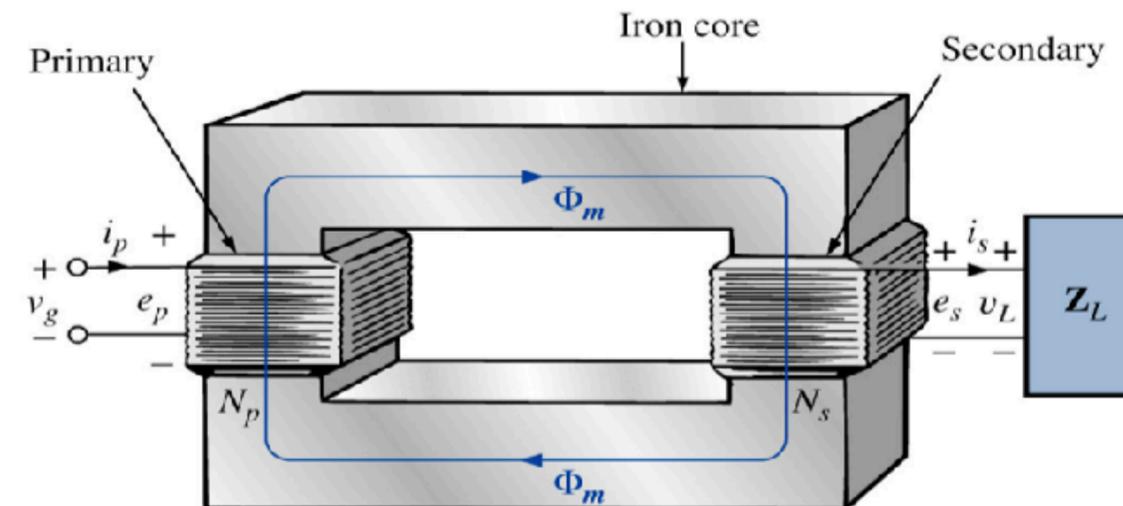
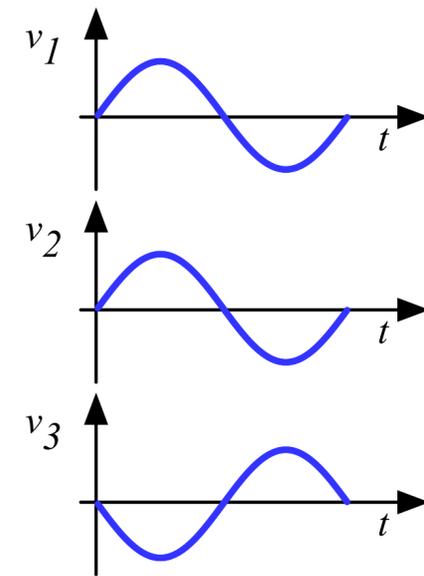
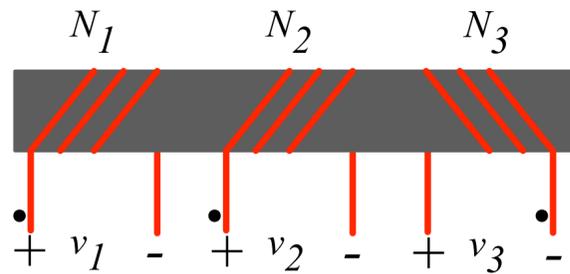
Fonte: <http://info.ee.surrey.ac.uk>



Efeito de proximidade

Fonte: <http://www.impeder.com>

Transformadores



Transformador com núcleo ferromagnético
Fonte: (Boylestad, 2012)