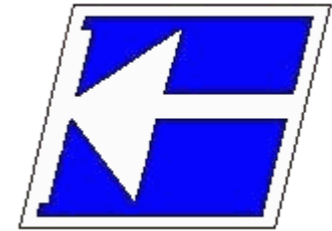


Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina
Departamento Acadêmico de Eletrônica
Máquinas Elétricas



Revisão de Eletromagnetismo

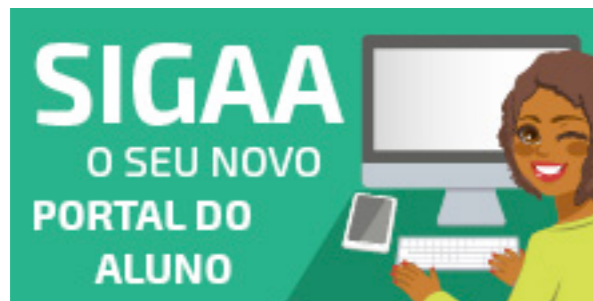
Prof. Clovis Antonio Petry.

Florianópolis, fevereiro de 2026.

Máquinas Elétricas

O material do curso está disponível em:

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



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

ProfessorPetry
Conhecimento para uma vida plena

PRINCIPAL PROJETO PUBLICAÇÕES CONTATO



Bem vindo ao Website pessoal de Clovis Antonio Petry

O objetivo desta página é a divulgação de informações sobre eletrônica, em especial eletrônica de potência. Todos os materiais disponibilizados podem ser livremente utilizados, desde que citados os autores. As disciplinas do semestre corrente podem ser acessadas clicando na imagem da esquerda abaixo. Material didático pode ser encontrado clicando na imagem da direita abaixo.



Eventos

Outubro, 2020
SNCT 2020
Semana Nacional de Ciência e Tecnologia 2020, Florianópolis, SC.
[Acesse...](#)

Setembro, 2020
COBENGE 2020
XLVIII Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia (COBENGE) e III Simpósio Internacional de Educação em Engenharia da ABENGE, Bento Gonçalves, RS. [Acesse...](#)

www.ProfessorPetry.com.br



<https://www.youtube.com>

Agenda

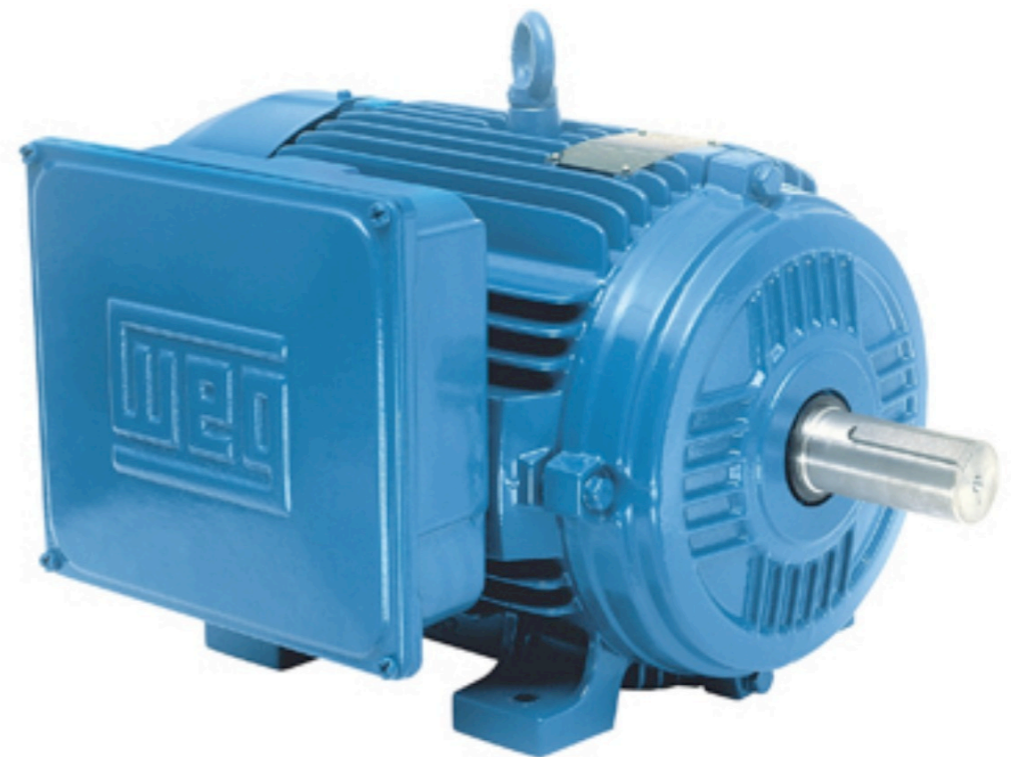
Esta aula está organizada em:

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.



Motivação

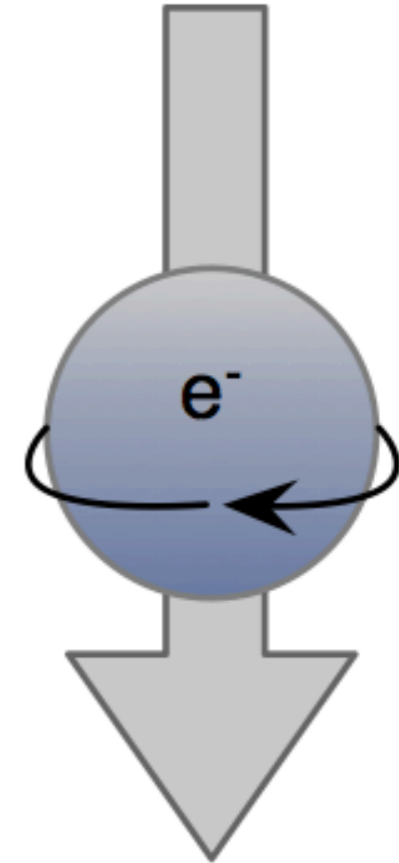
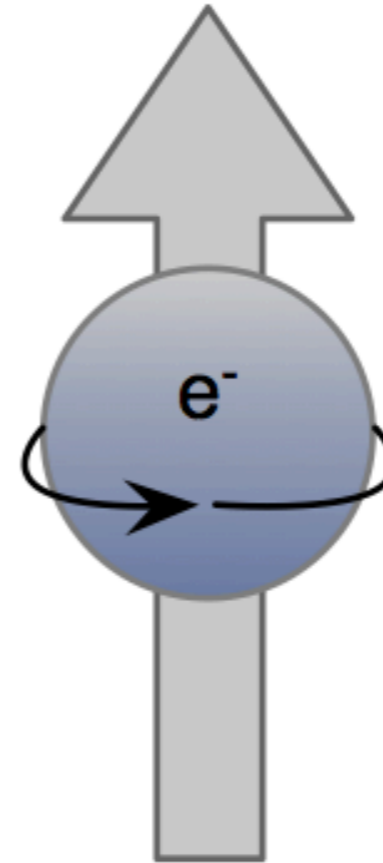
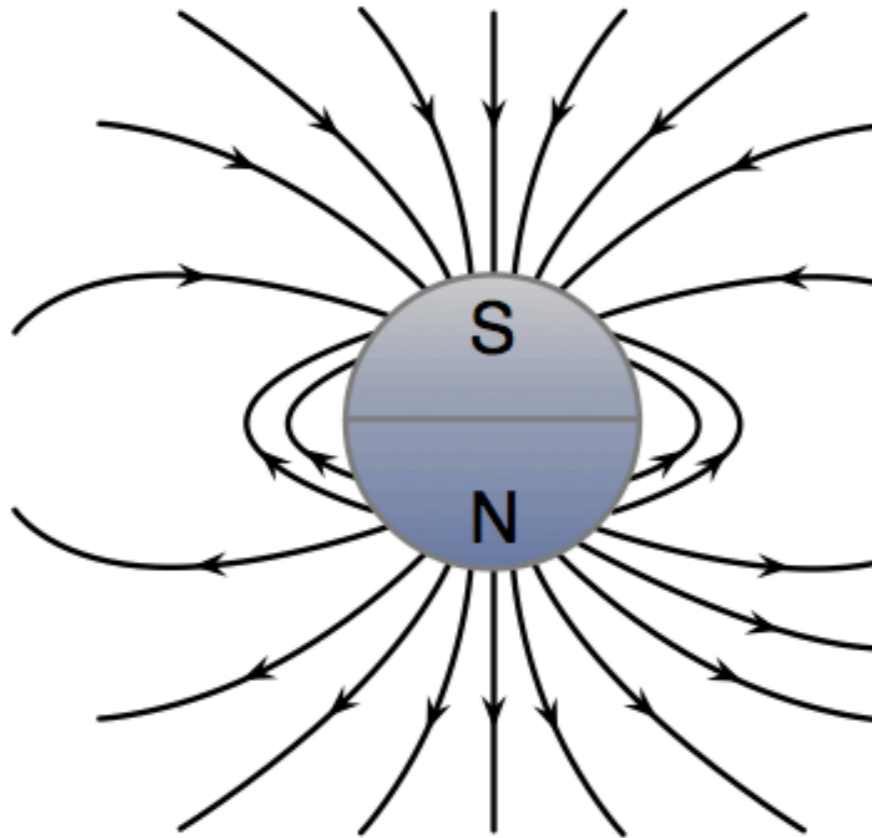
Os dispositivos eletromagnéticos estão presentes em diversas aplicações de eletroeletrônica.



<https://www.weg.net>

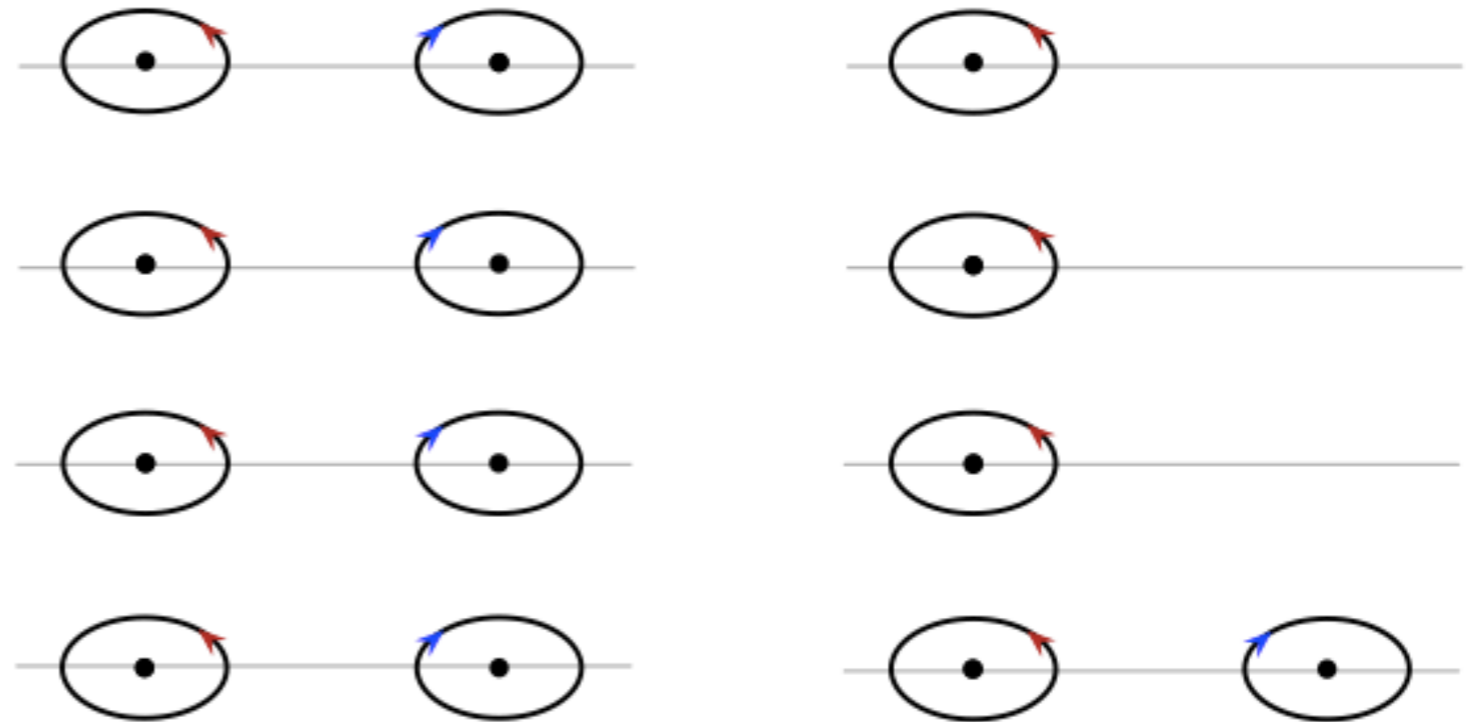
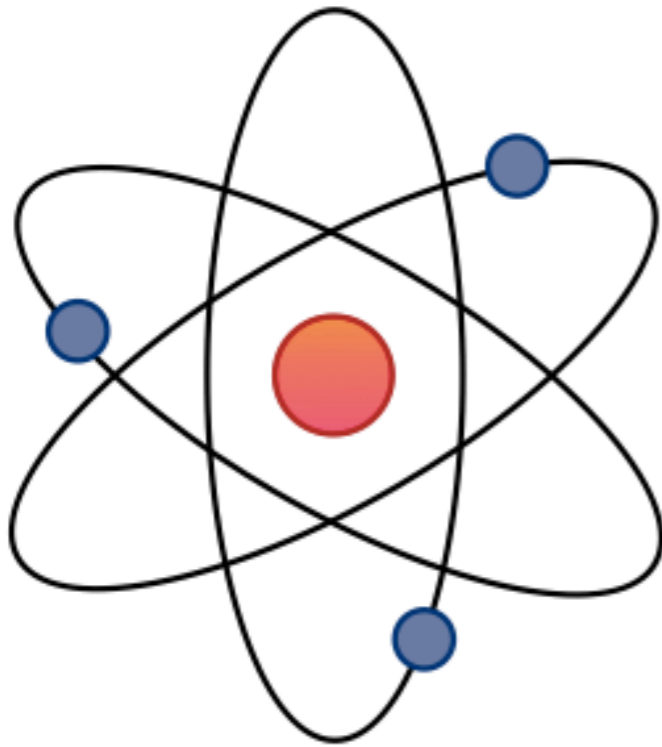
Magnetismo atômico

Dipolos magnéticos



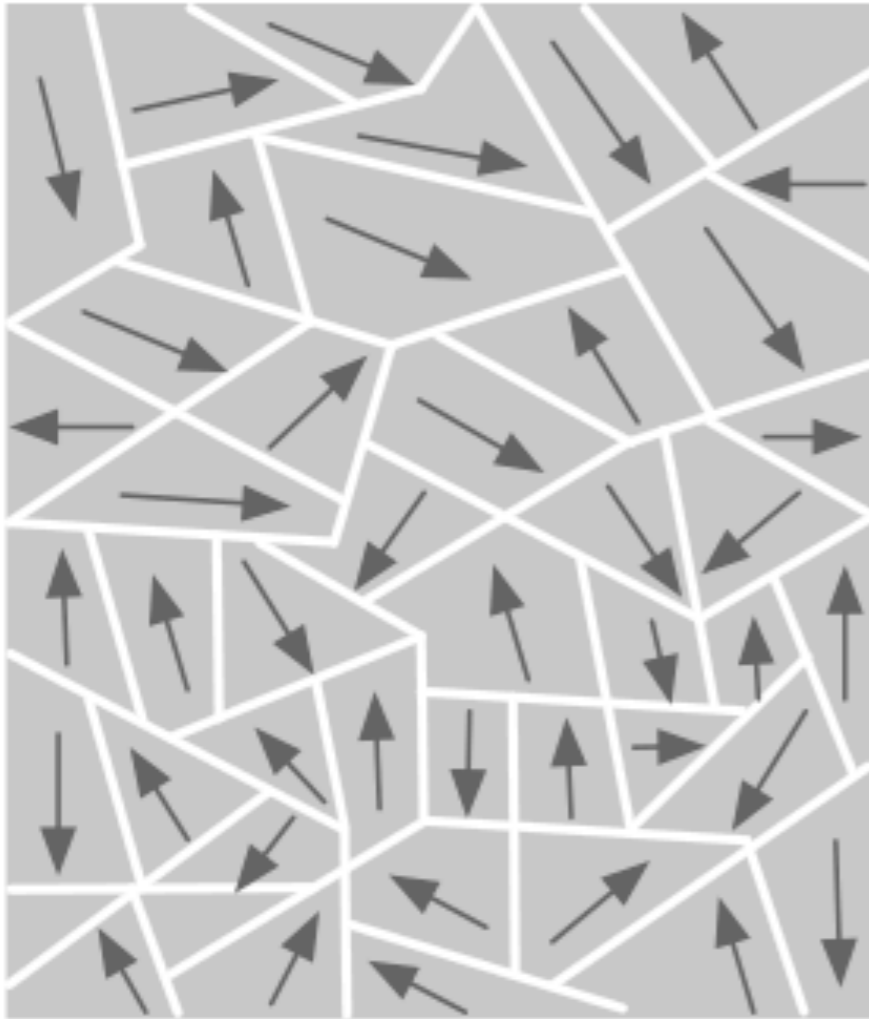
Magnetismo atômico

Magnetismo atômico



Magnetismo atômico

Domínios magnéticos



Domínios magnéticos

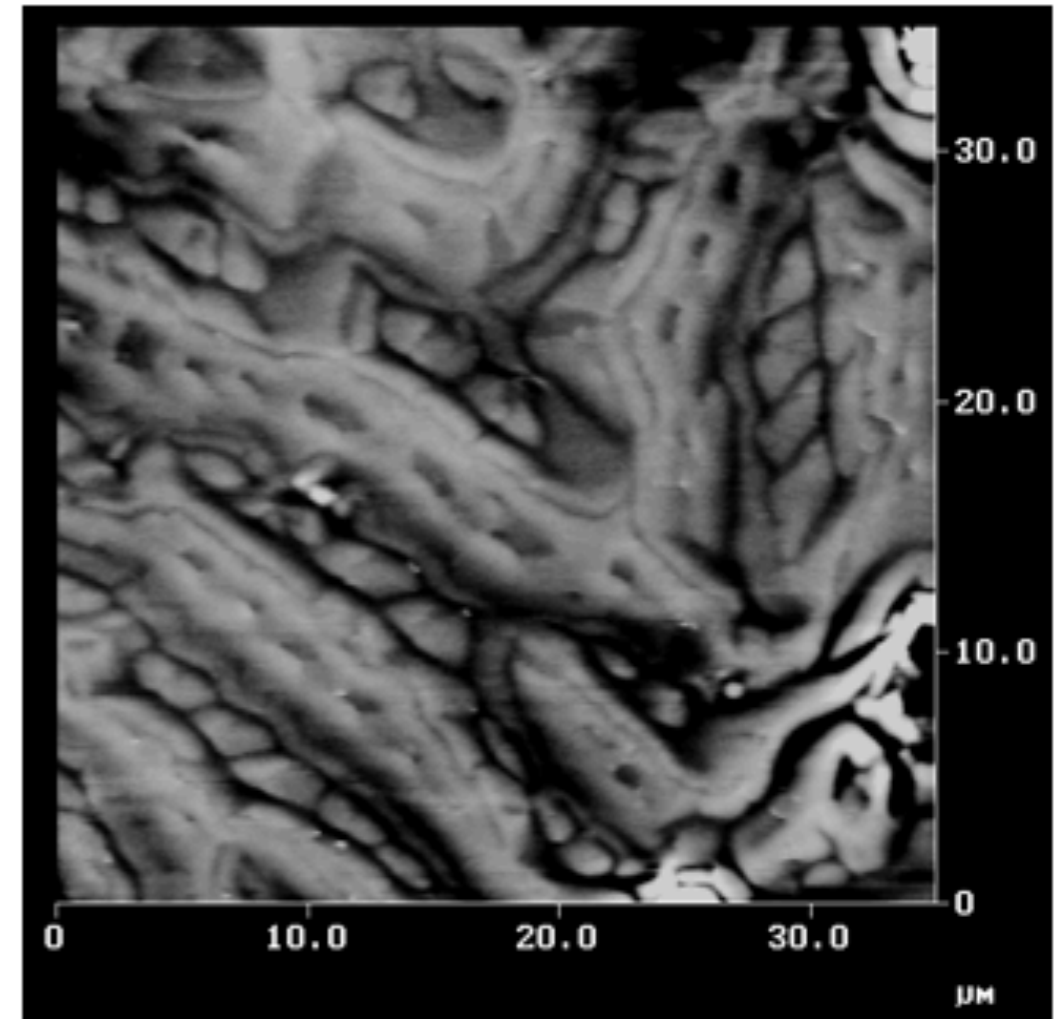
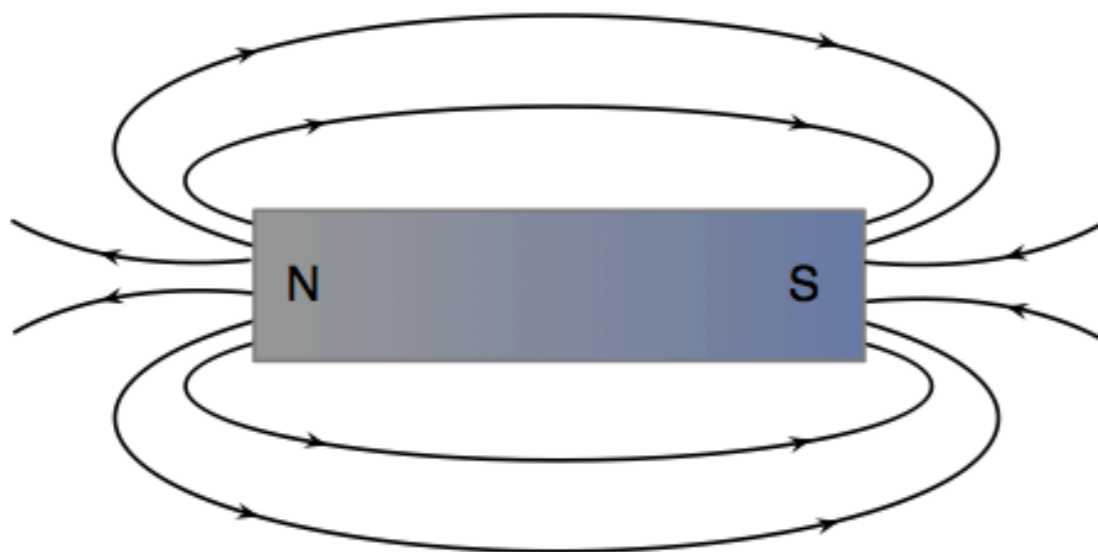


Imagem do material magnético

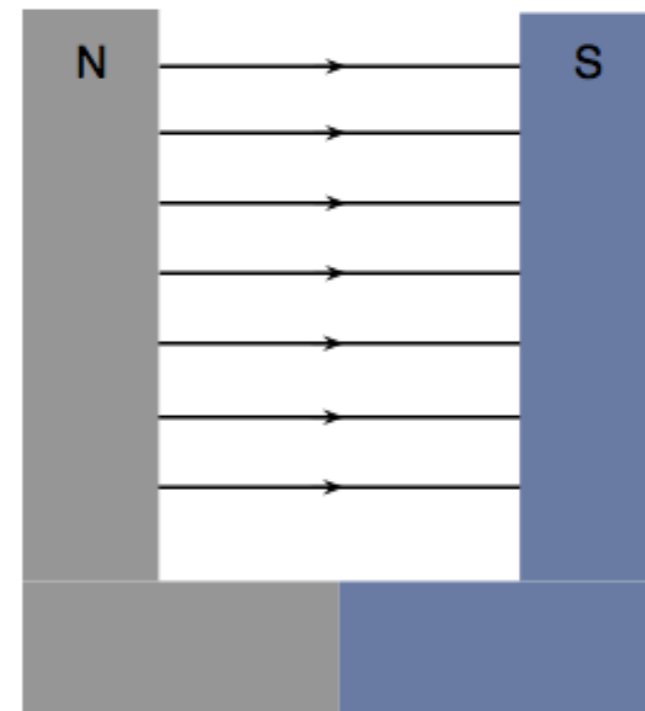
Conceitos e grandezas eletromagnéticas

Campo magnético:

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



Não-uniforme

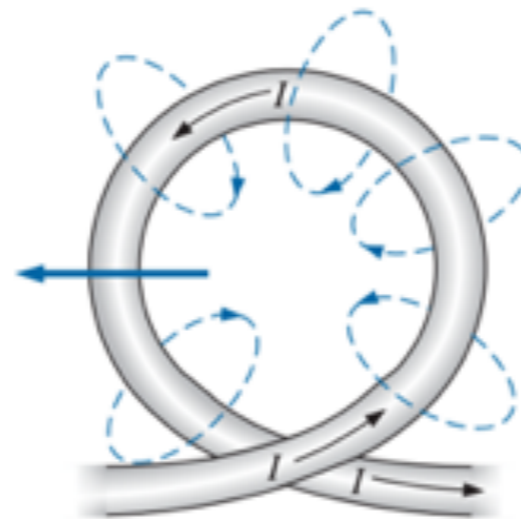
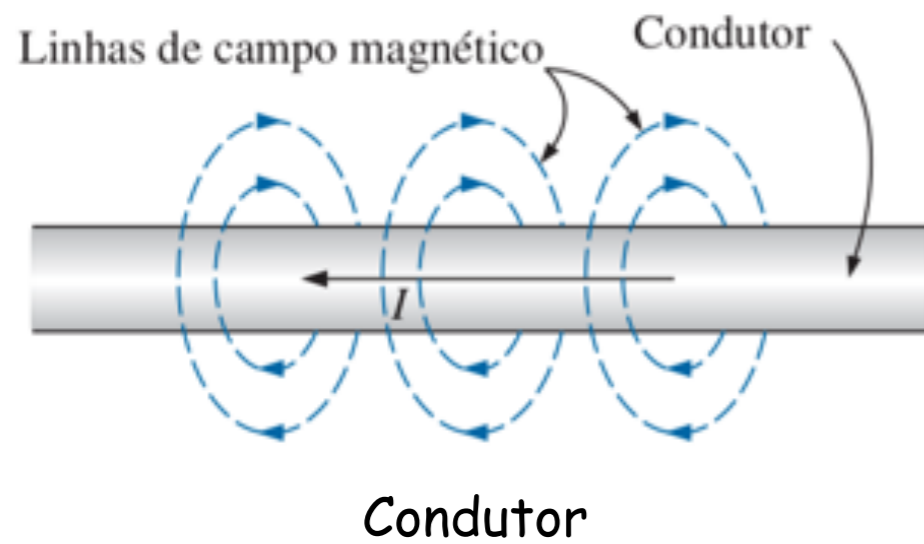


Uniforme

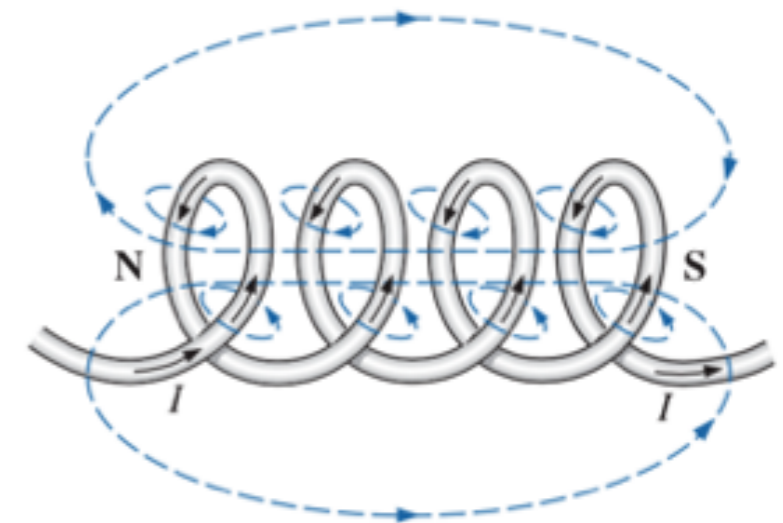
Conceitos e grandezas eletromagnéticas

Campo magnético:

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



Espira



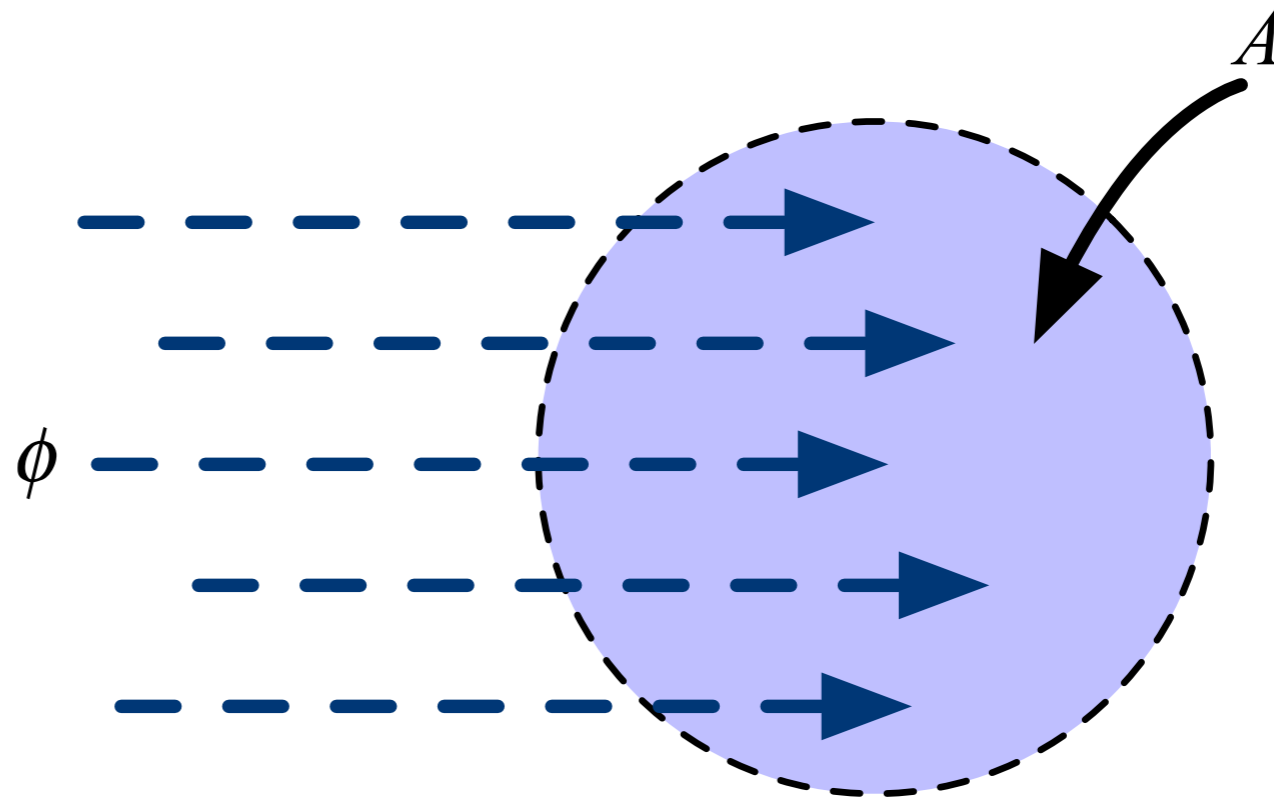
Bobina

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:

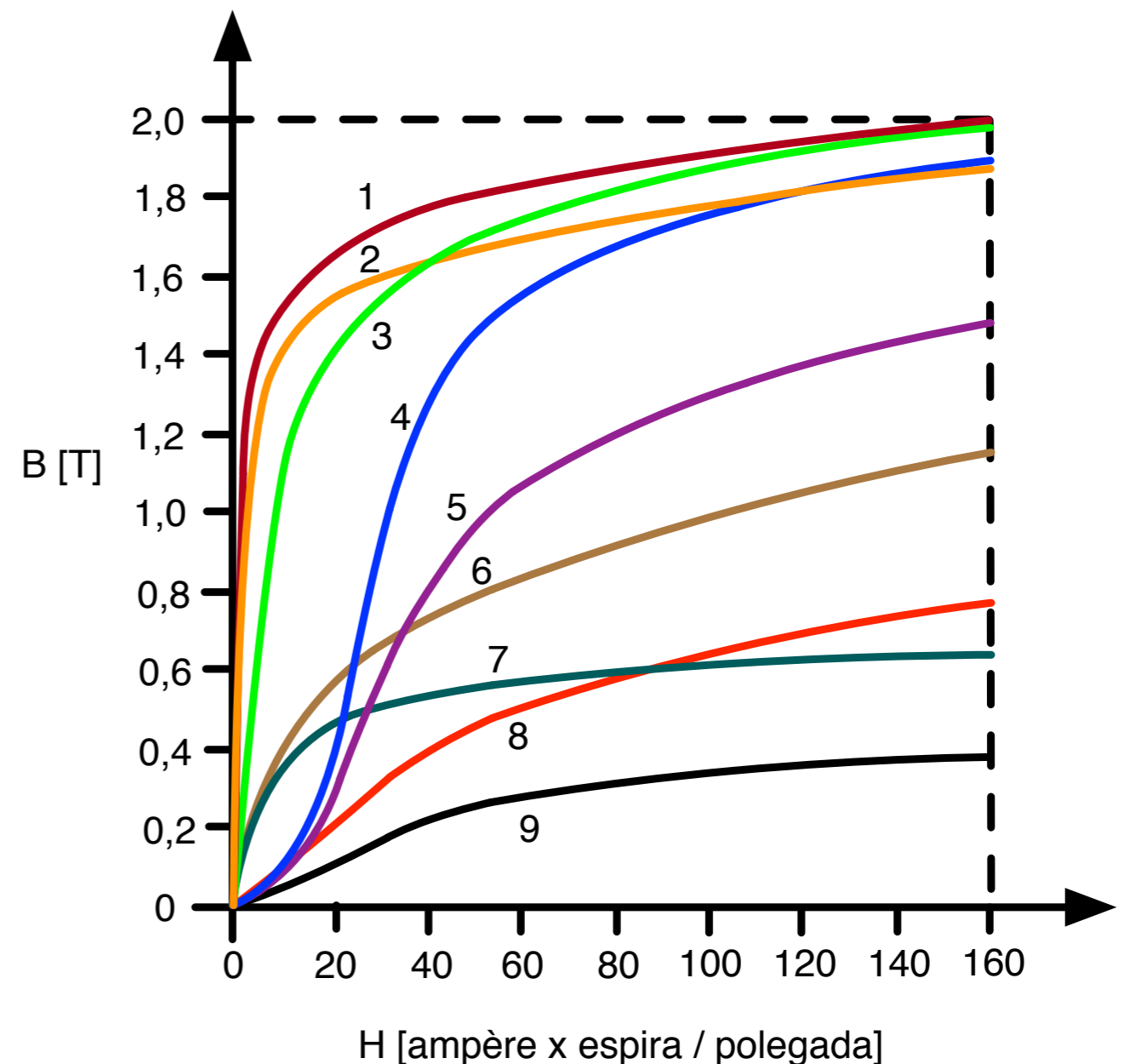
- A reação do material ao campo magnético é denominada de força magnetizante (H), sendo dependente da corrente elétrica, do número de espiras e da geometria do elemento magnético.

- Curva B x 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.



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



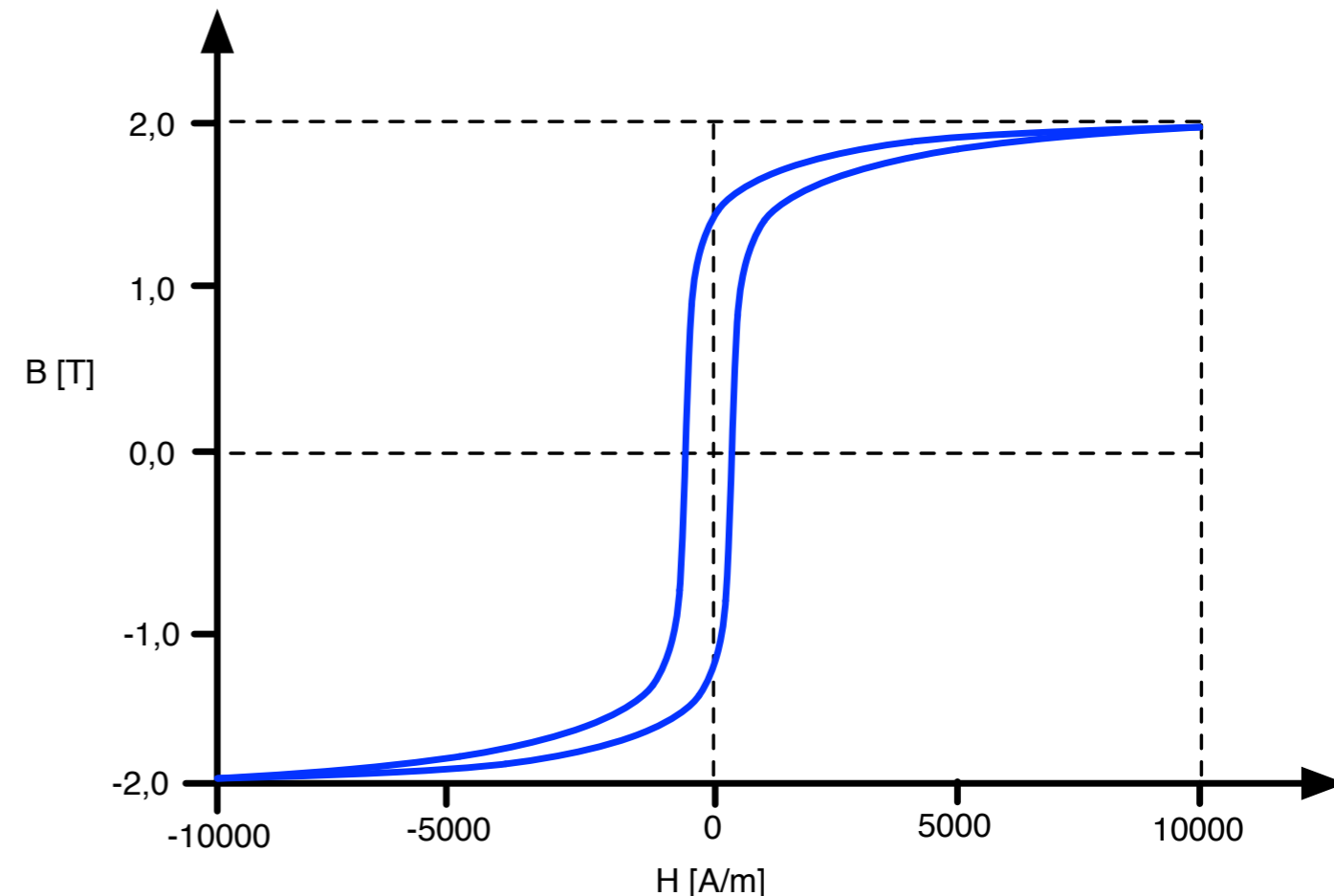
Conceitos e grandezas eletromagnéticas

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.

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

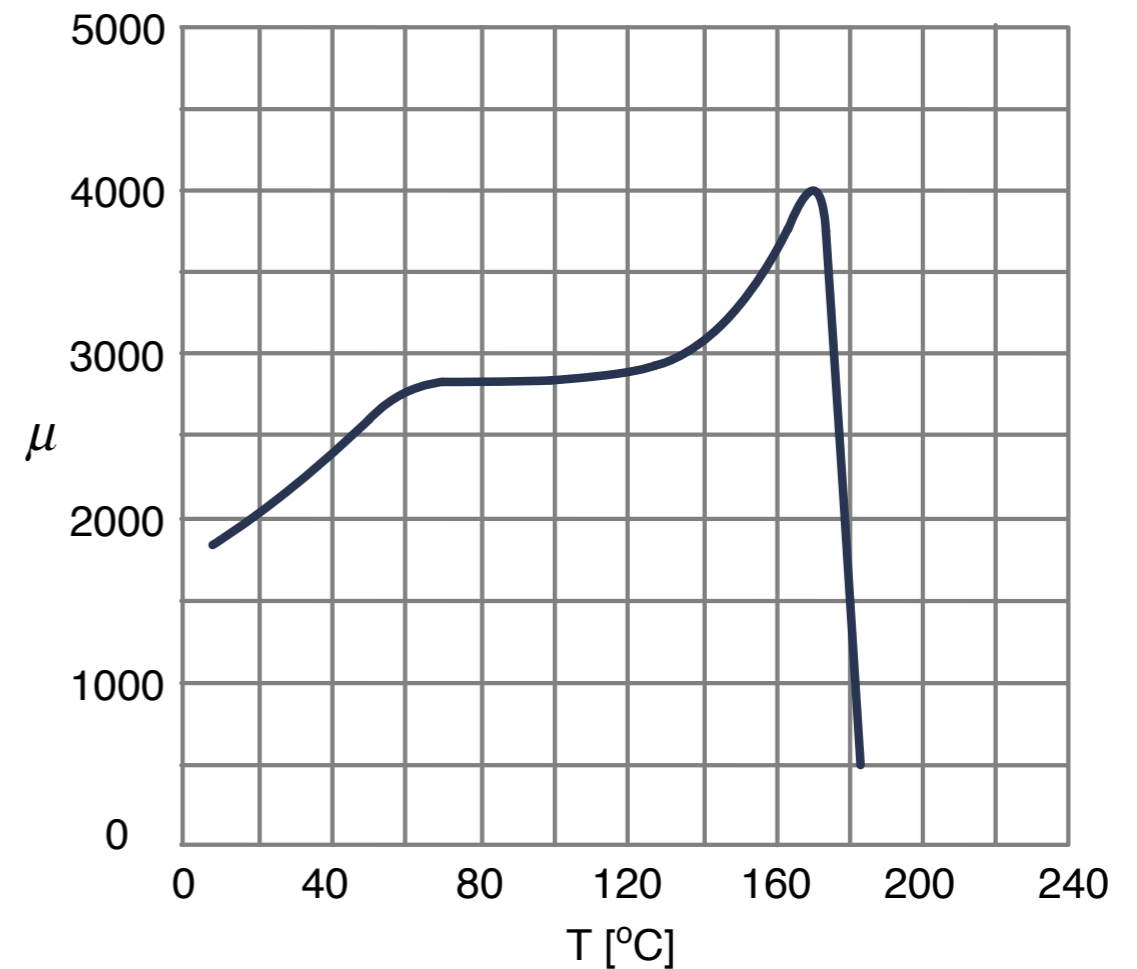
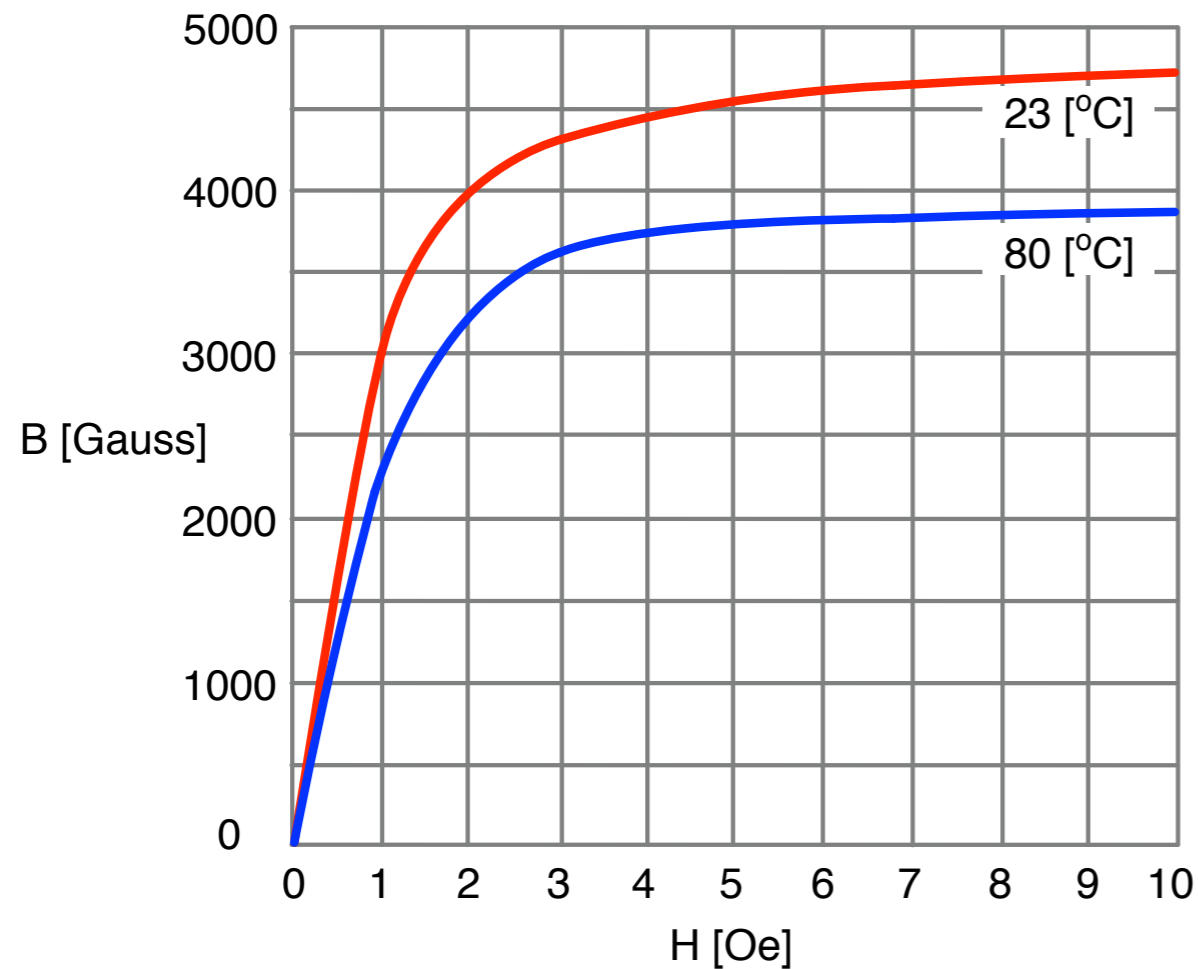
Material	Permeabilidade relativa (μ_r)
Ar	1
Papel, plástico, fenolite	1
Ferrite	2.000
Ferro comercial	9.000
Ferro silício	55.000
Permalloy	1.000.000
Super permalloy	10.000.000



Curva B x H (histerese)

Conceitos e grandezas eletromagnéticas

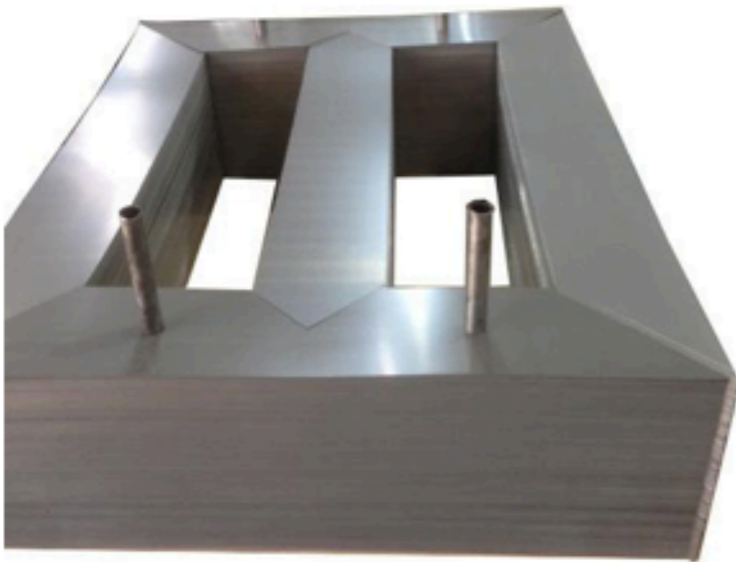
Curva B x H



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

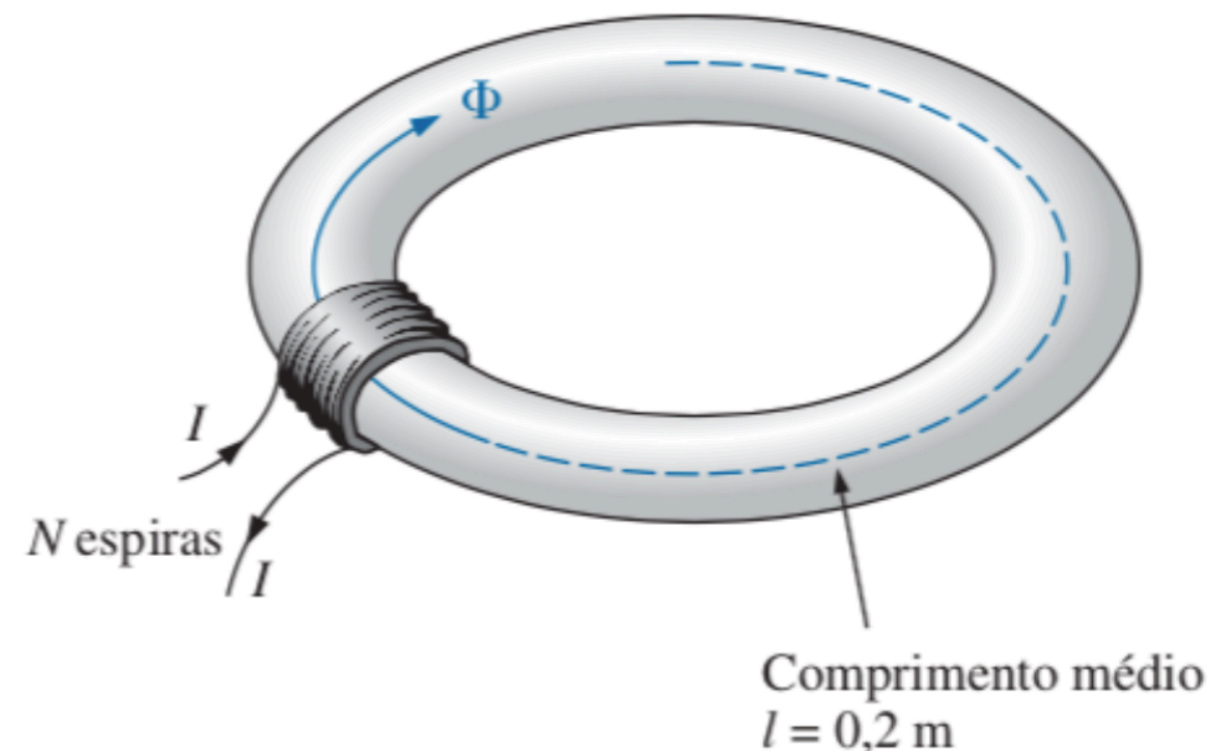
Circuitos magnéticos:

- 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.

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

Onde:

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



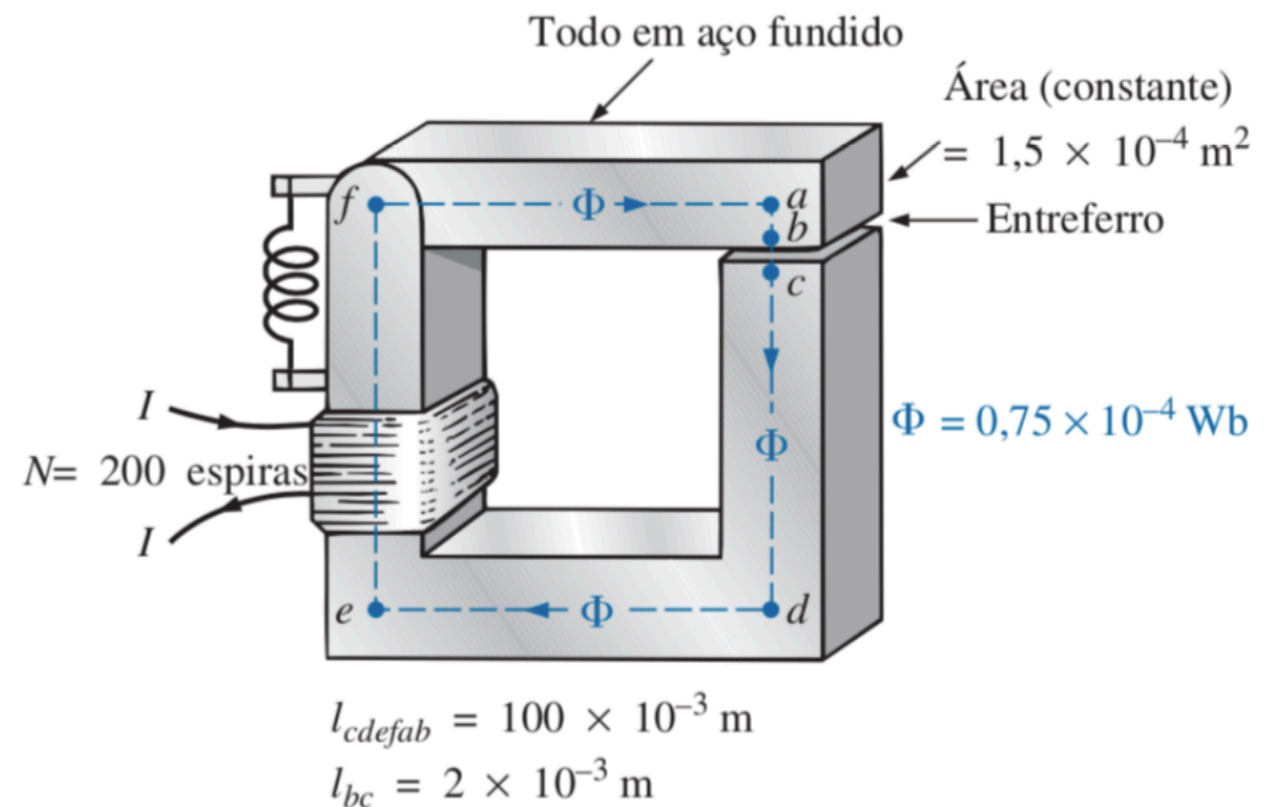
Exemplo de circuito magnético
Fonte: (Boylestad, 2012)

Conceitos e grandezas eletromagnéticas

Circuitos magnéticos:

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

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



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)

Indutância

Lei de Faraday:

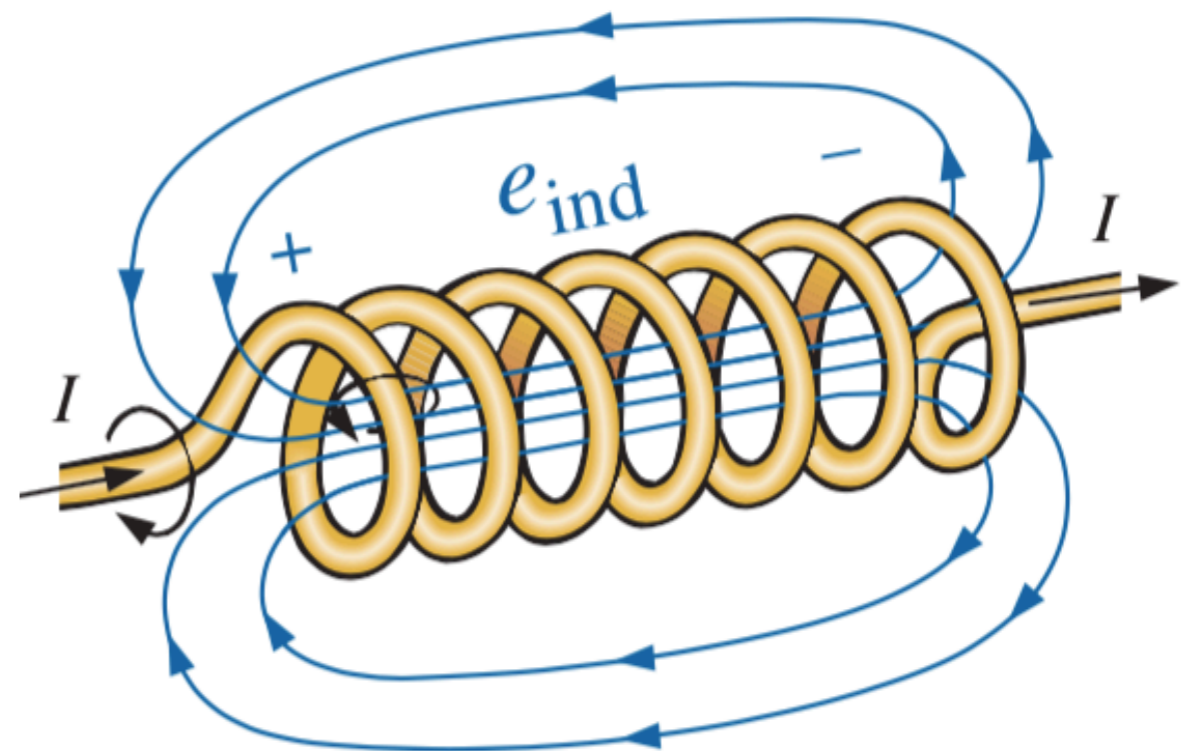
- A Lei de Faraday explicita que em todo condutor enquanto sujeito a uma variação de fluxo magnético é estabelecida uma força eletromotriz (tensão) induzida.

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

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.

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



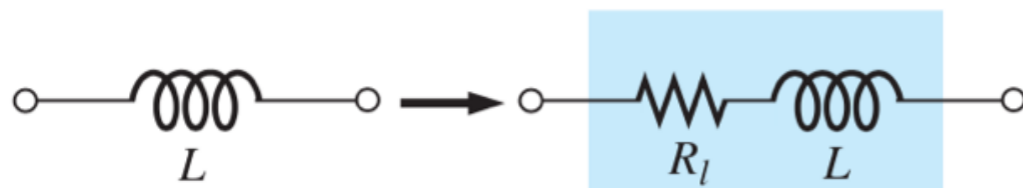
Leis de Faraday e Lenz
Fonte: (Boylestad, 2012)

Indutância

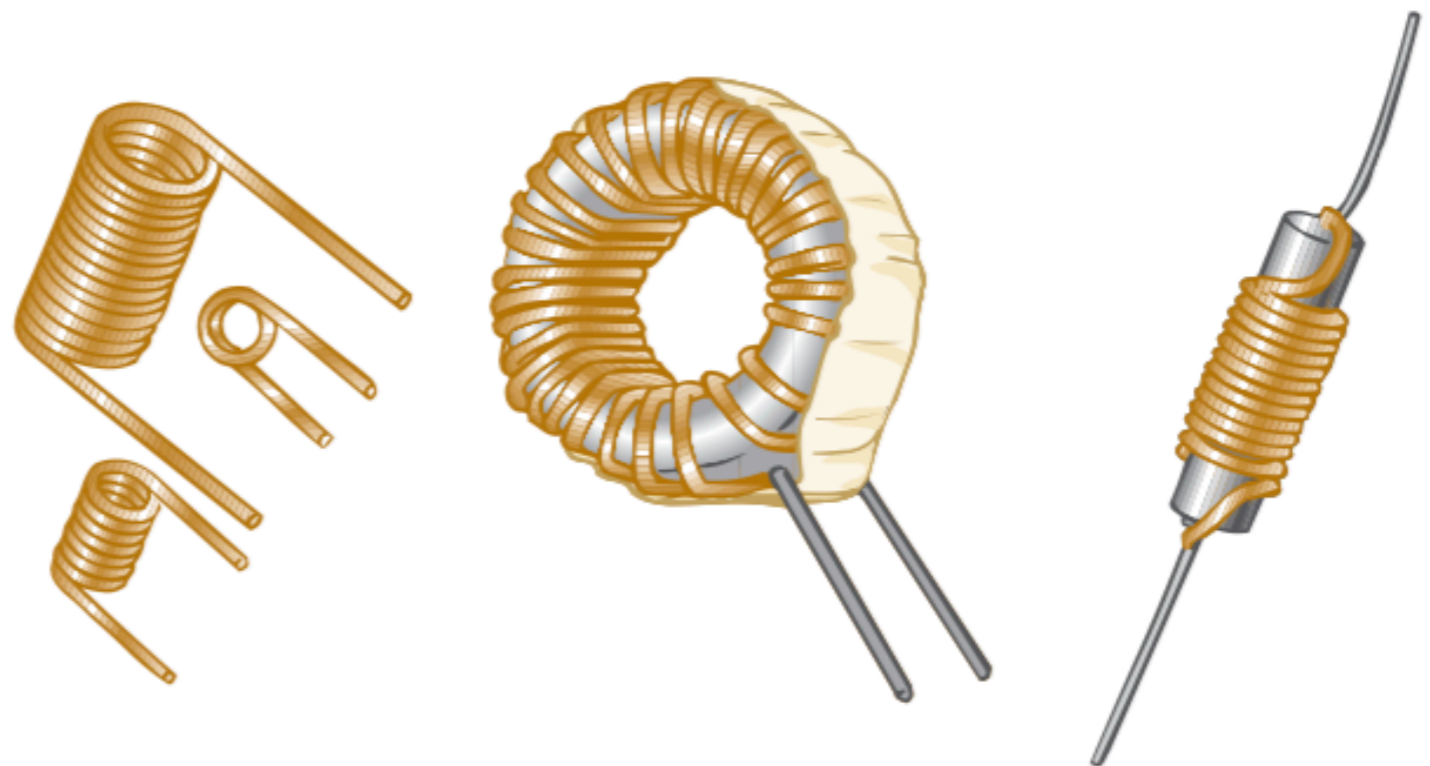
Indutância:

- 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

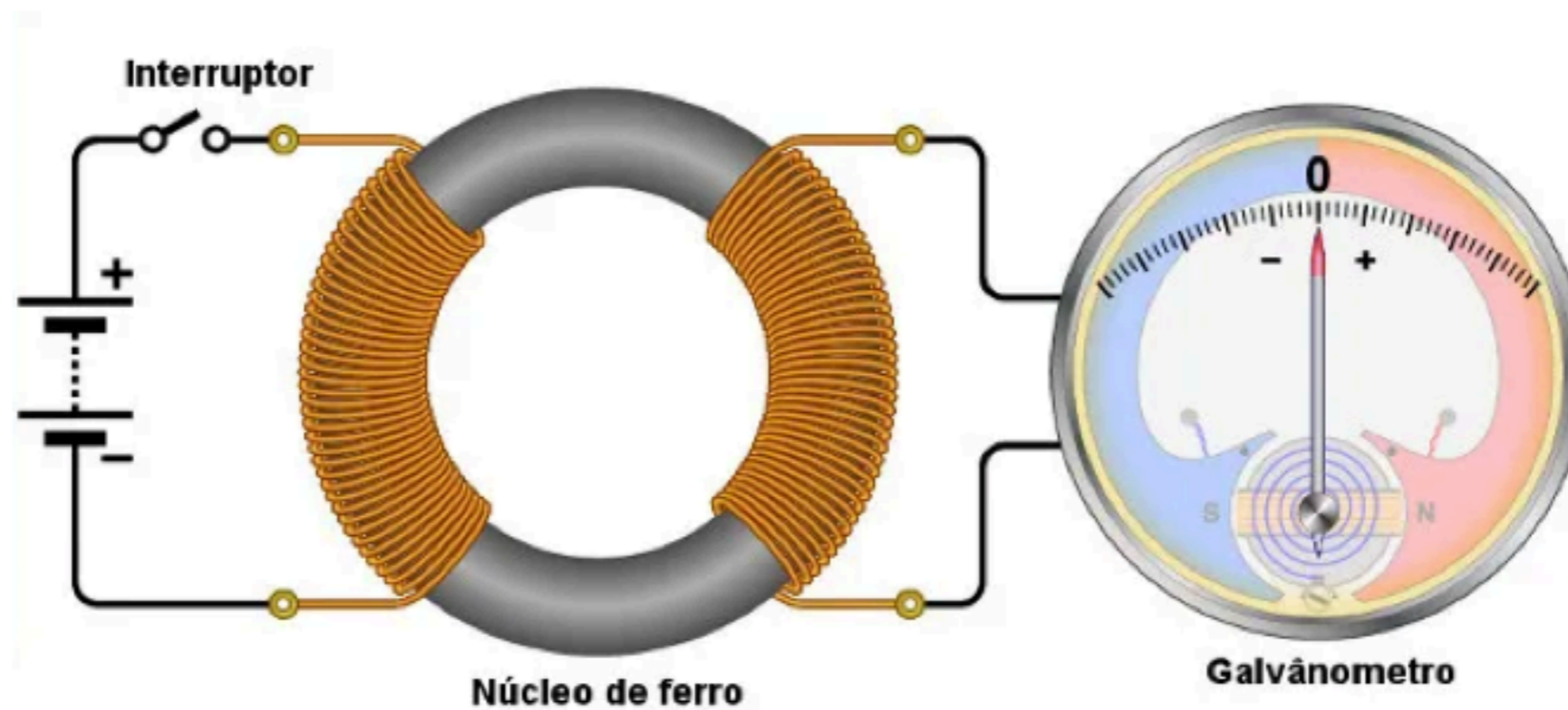


Exemplos de indutores
Fonte: (Boylestad, 2012)

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>

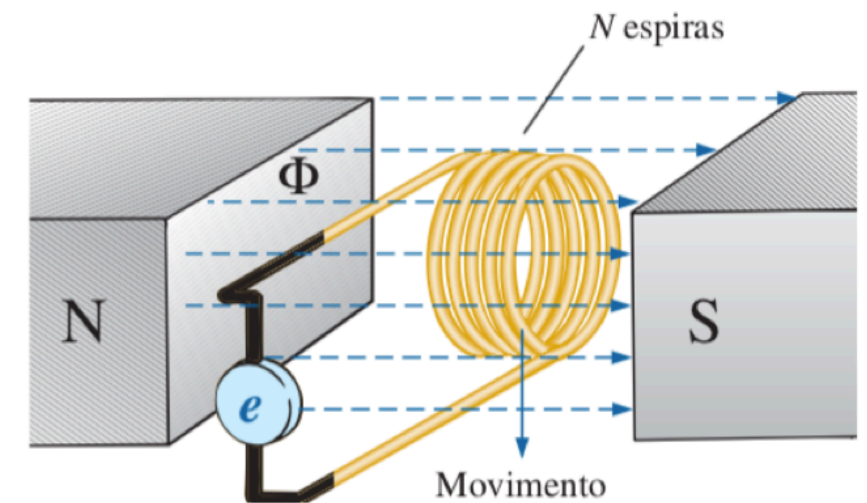
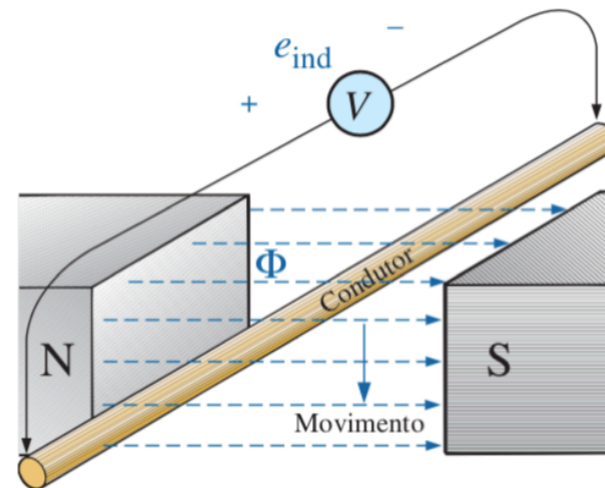
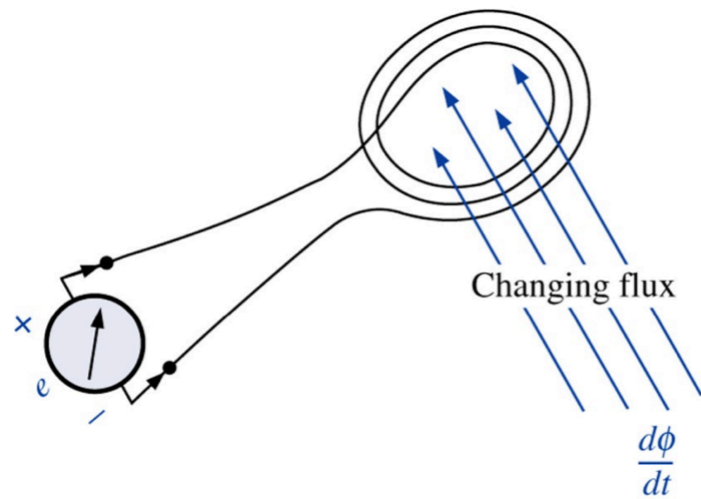
Transformadores

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

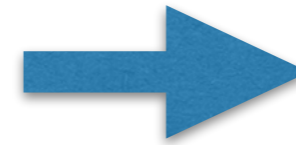
Fonte: (Boylestad, 2012)

Transformadores

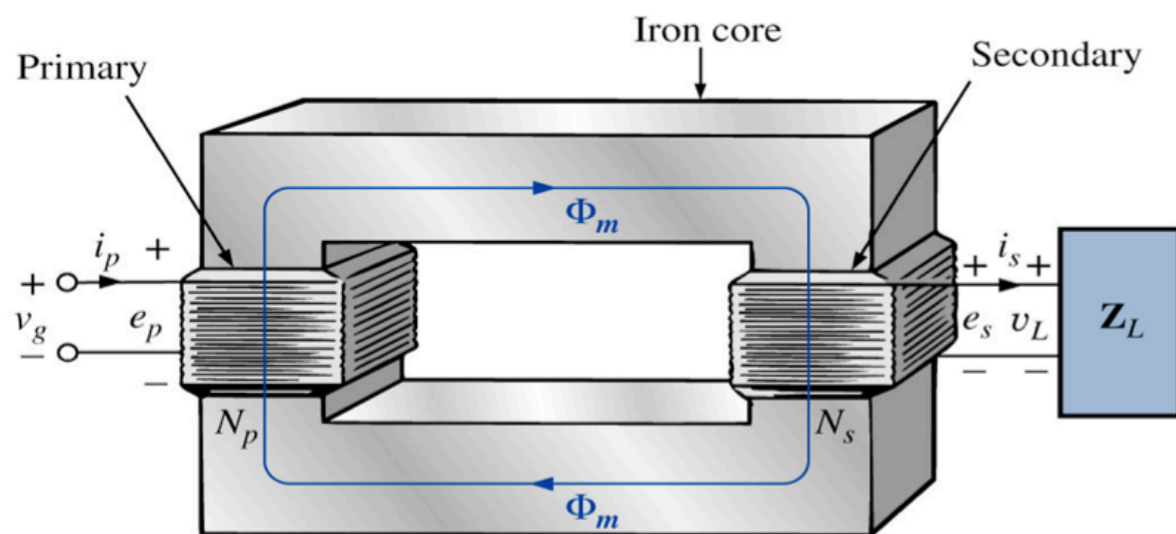
Indução eletromagnética:

- Aplicando a Lei de Faraday.

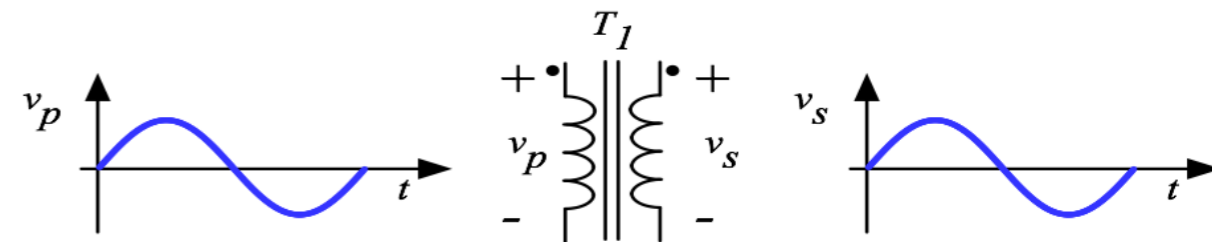
$$\begin{cases} e_p(t) = N_p \cdot \frac{d\phi_p}{dt} \rightarrow \frac{d\phi_p}{dt} = \frac{e_p(t)}{N_p} \\ e_s(t) = N_s \cdot \frac{d\phi_p}{dt} \rightarrow \frac{d\phi_p}{dt} = \frac{e_s(t)}{N_s} \end{cases} \rightarrow \frac{e_p(t)}{N_p} = \frac{e_s(t)}{N_s}$$



$$\frac{e_p(t)}{e_s(t)} = \frac{N_p}{N_s}$$



Transformador com núcleo ferromagnético
Fonte: (Boylestad, 2012)



Modelo elétrico do transformador

Força eletromagnética

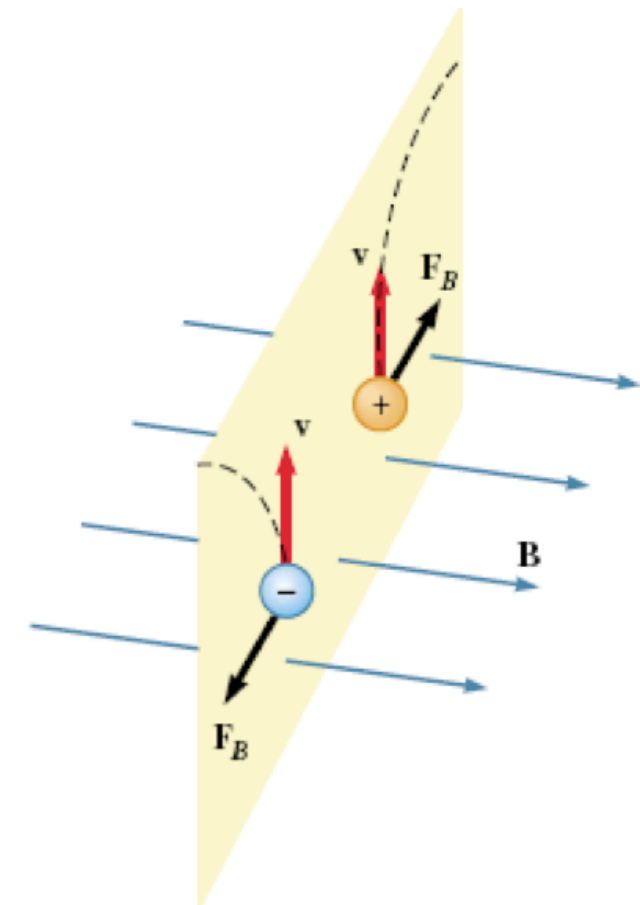
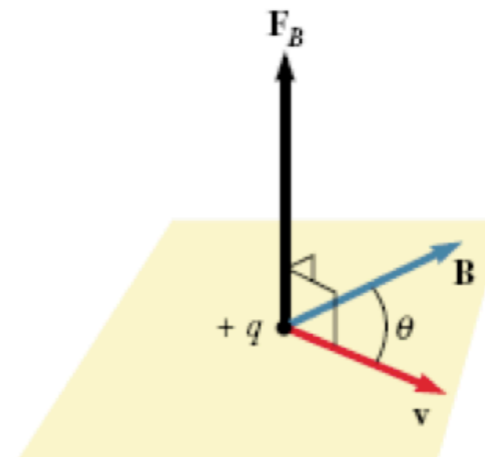
Força eletromagnética:

- 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).

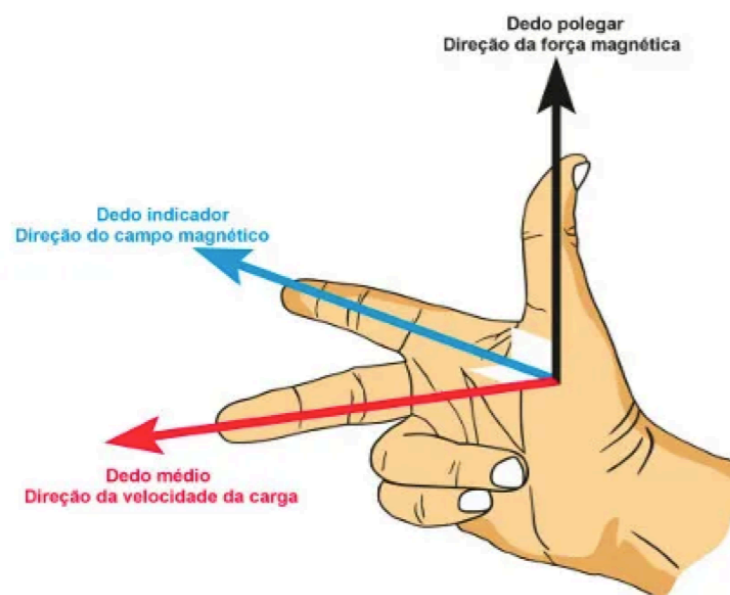


Força sobre cargas elétricas
Fonte: (Halliday, 1984)

Força eletromagnética

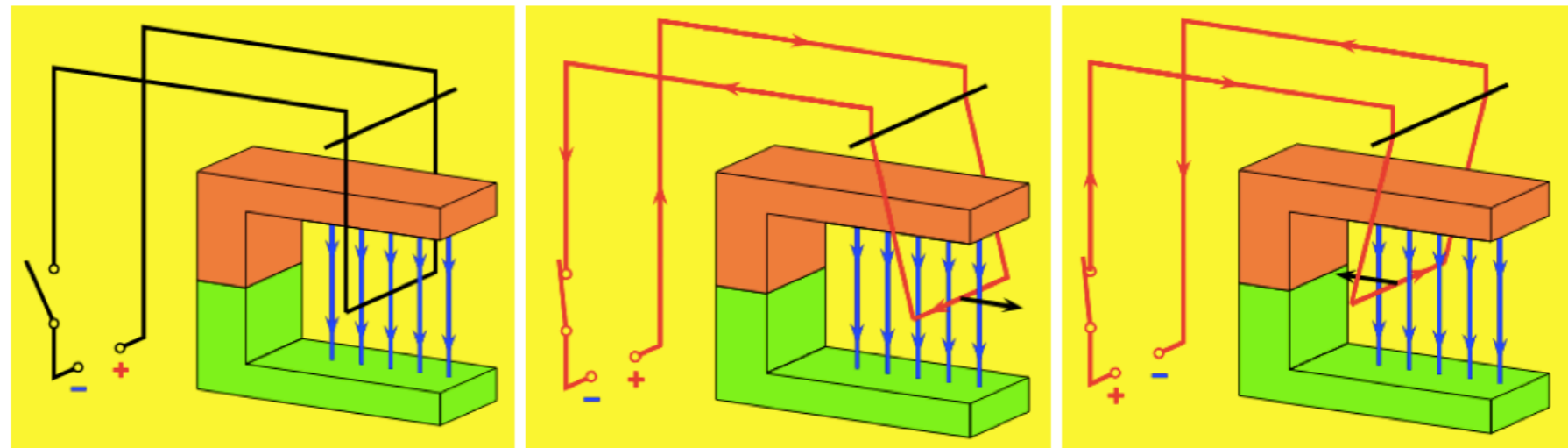
Regra de Fleming:

- 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://brasilecola.uol.com.br>



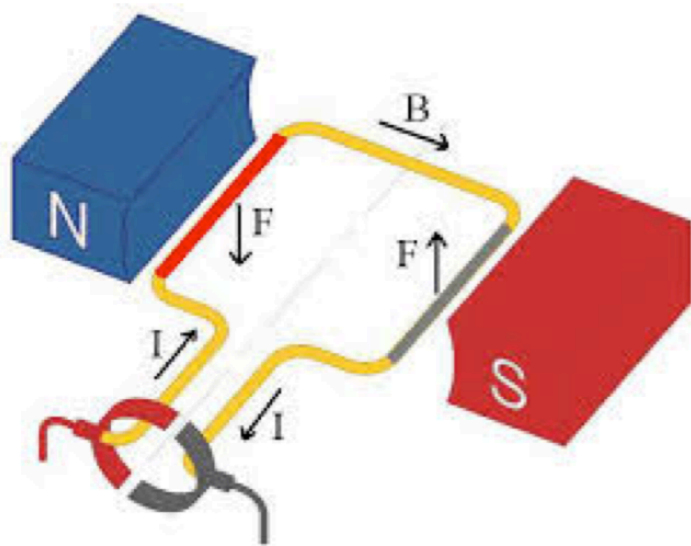
Força sobre um condutor em um campo magnético

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

Força eletromagnética

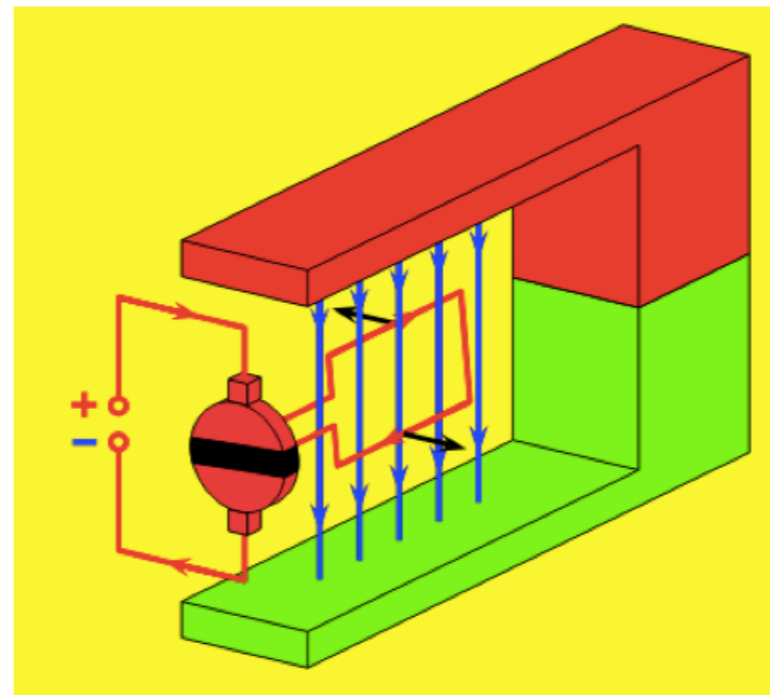
Princípios utilizando a força eletromagnética:

- 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>

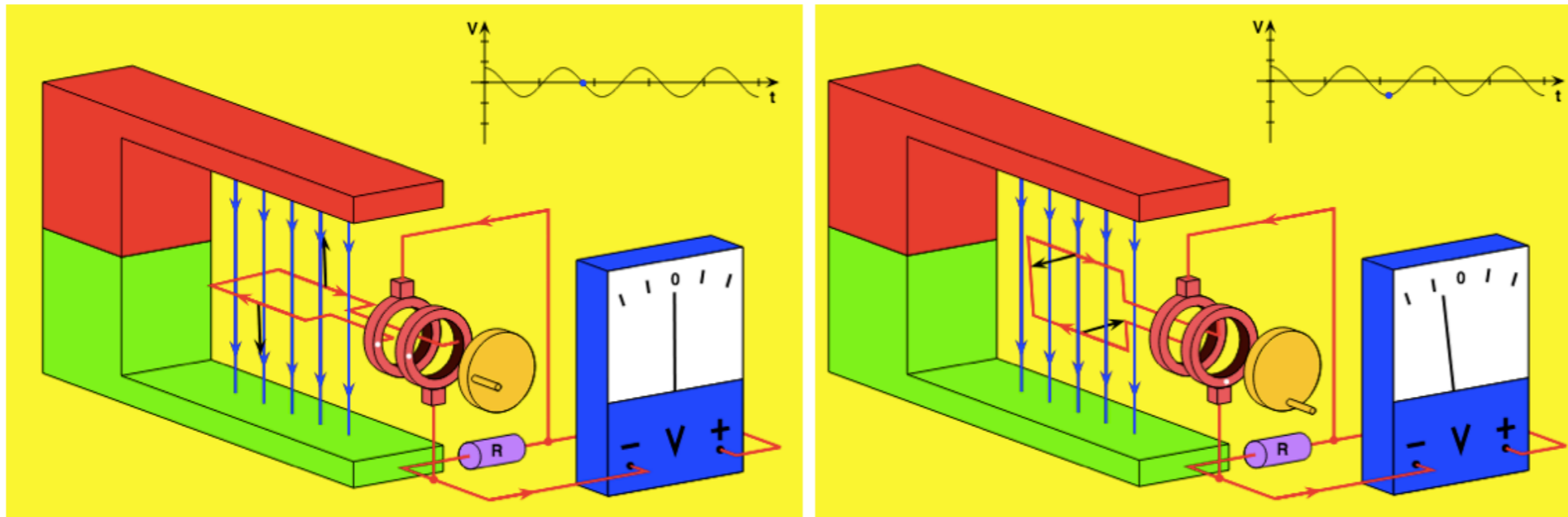


Funcionamento do motor cc

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

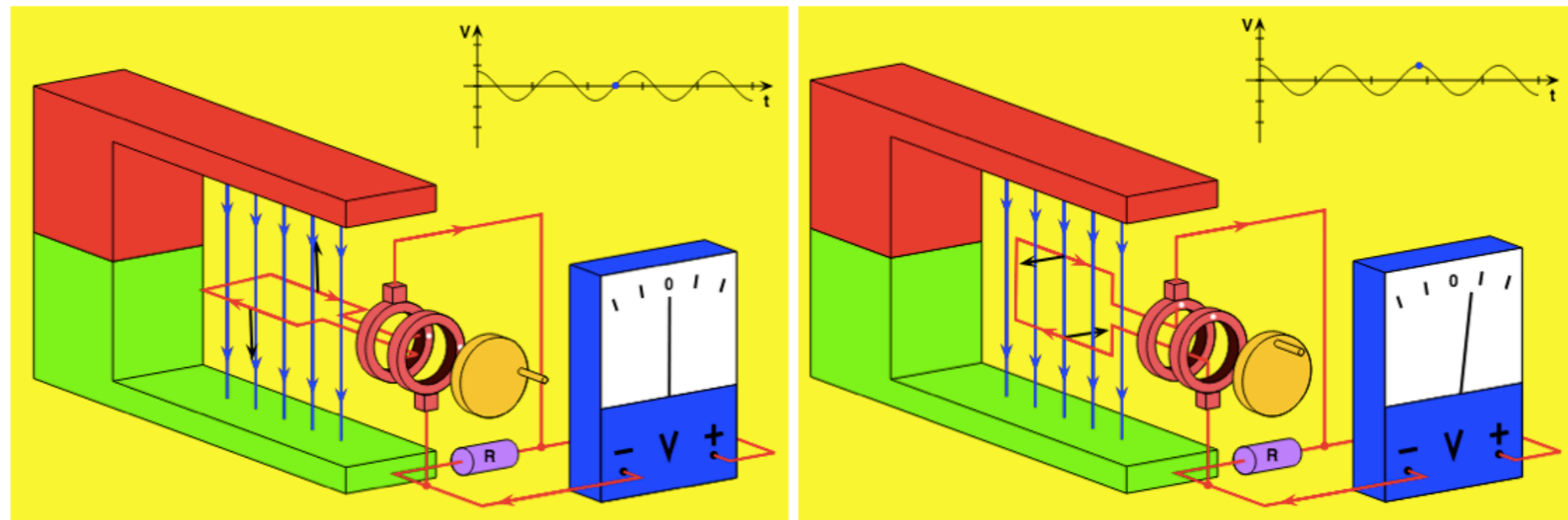
Força eletromagnética

Princípios utilizando a força eletromagnética:



Funcionamento do gerador ca

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



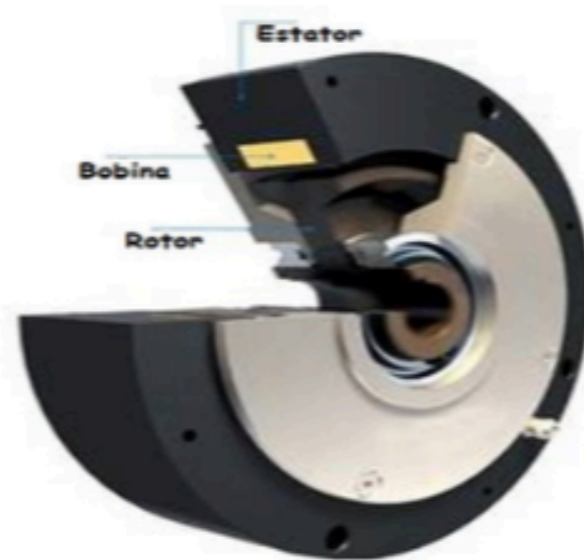
Aspectos de elementos magnéticos

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>



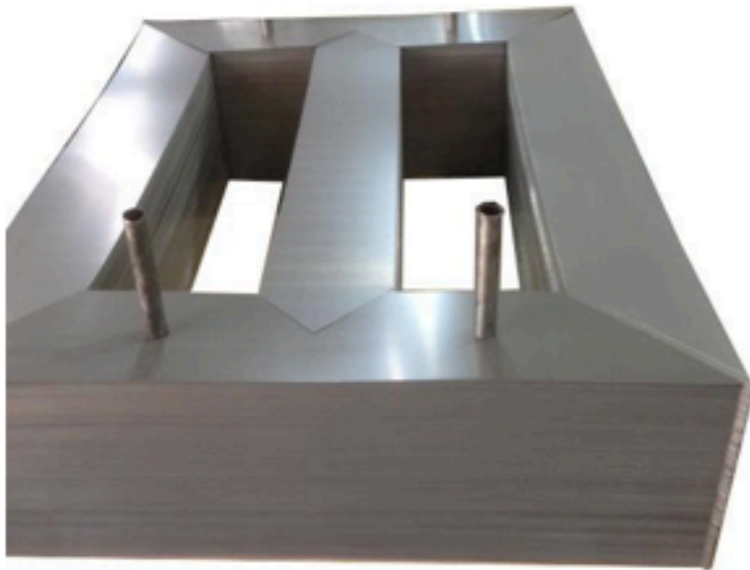
<http://www.solucoesindustriais.com.br>



<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>



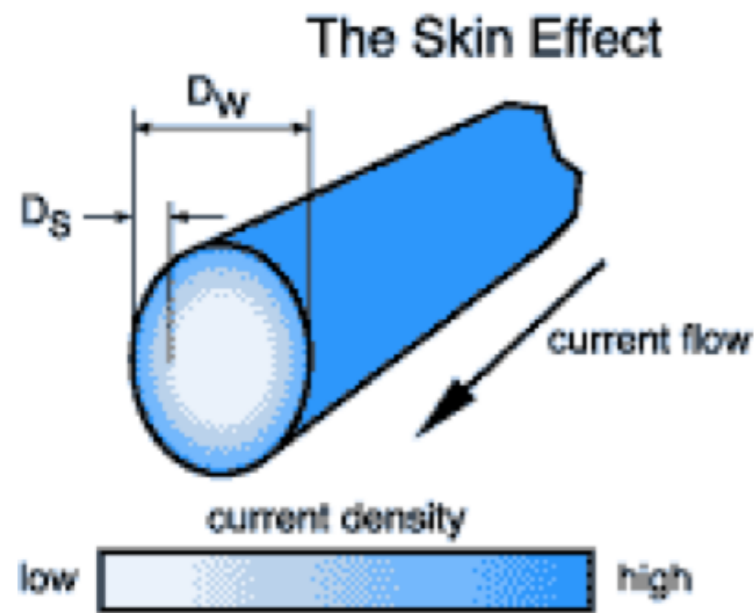
núcleos de pós-metálicos

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

Aspectos de elementos magnéticos

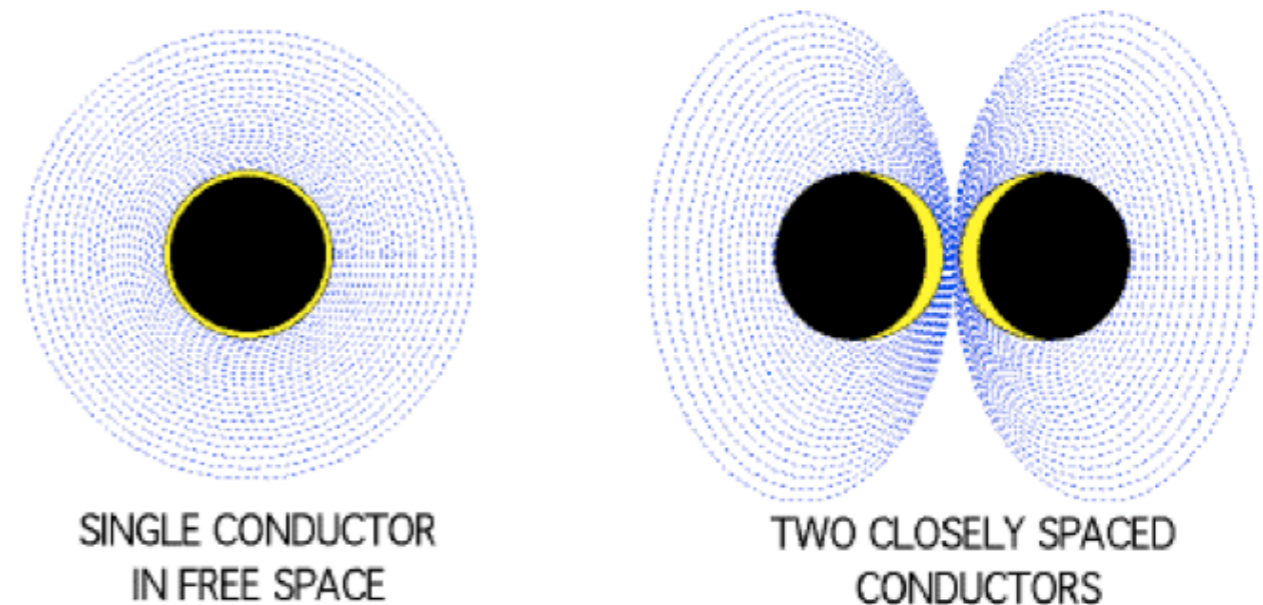
Efeitos nos condutores:

- 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>

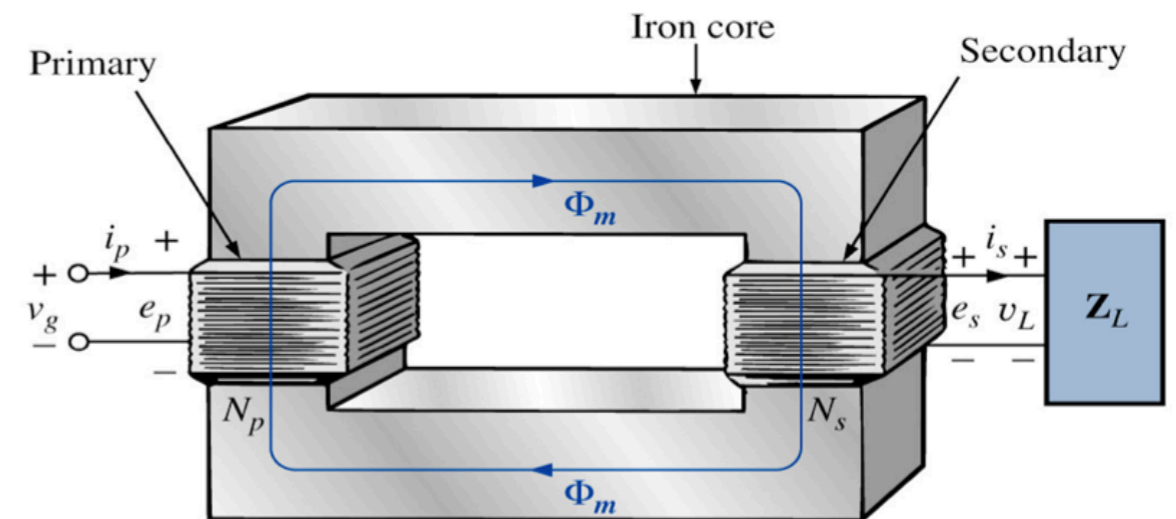
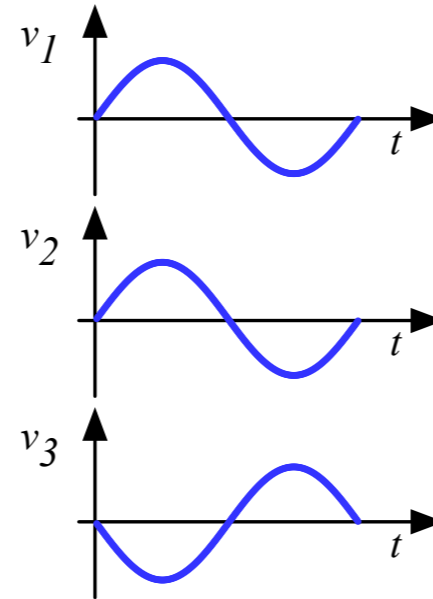
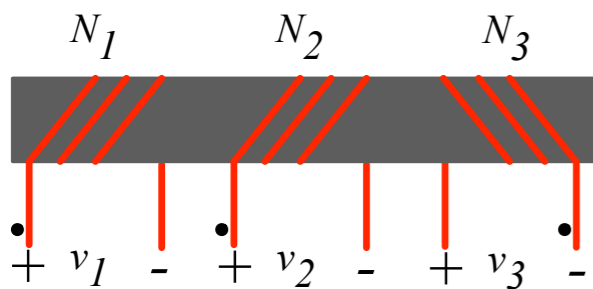


Efeito de proximidade

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

Próxima Aula

Transformadores



Transformador com núcleo ferromagnético
Fonte: (Boylestad, 2012)