

CONVERSÃO DE ENERGIA



Engenharia Elétrica

Prof. Dr. Giuliano Pierre Estevam

www.electroenge.com.br



Programa de ensino (Conteúdo programático)



- INTRODUÇÃO AO SISTEMA ELETROMECHANICO;
- PRINCÍPIOS DE ELETROMAGNETISMO;
- CIRCUITOS MAGNÉTICOS;
- TRANSFORMADORES;
- CONVERSÃO DE ENERGIA:
 - Princípios de Conversão de energia;
 - Análise da conversão de energia em campos magnéticos e campos elétricos;
 - Forças atuantes;
 - Energia e coenergia.

Avaliação



$$***MF = 0,8 . NP + 0,2 . MT***$$

NP: MÉDIA DAS NOTAS DAS PROVAS APLICADAS

MT: MÉDIA DAS NOTAS DOS TRABALHOS APLICADOS

BIBLIOGRAFIA BÁSICA



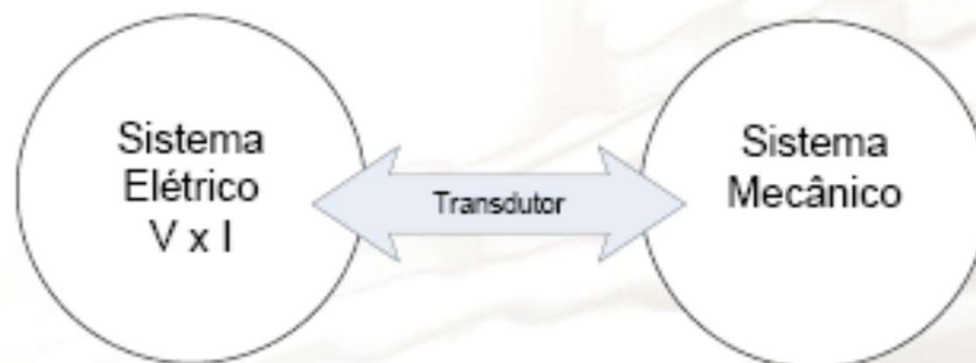
SISTEMA ELETROMECHANICO DE ENERGIA

A conversão eletromecânica de energia envolve a troca de energia entre um sistema elétricos e um sistema mecânico ou vice-versa, através de acoplamento magnético.



Conversão de energia entre as formas elétricas e mecânicas

- campos magnéticos e elétricos por transdutores;

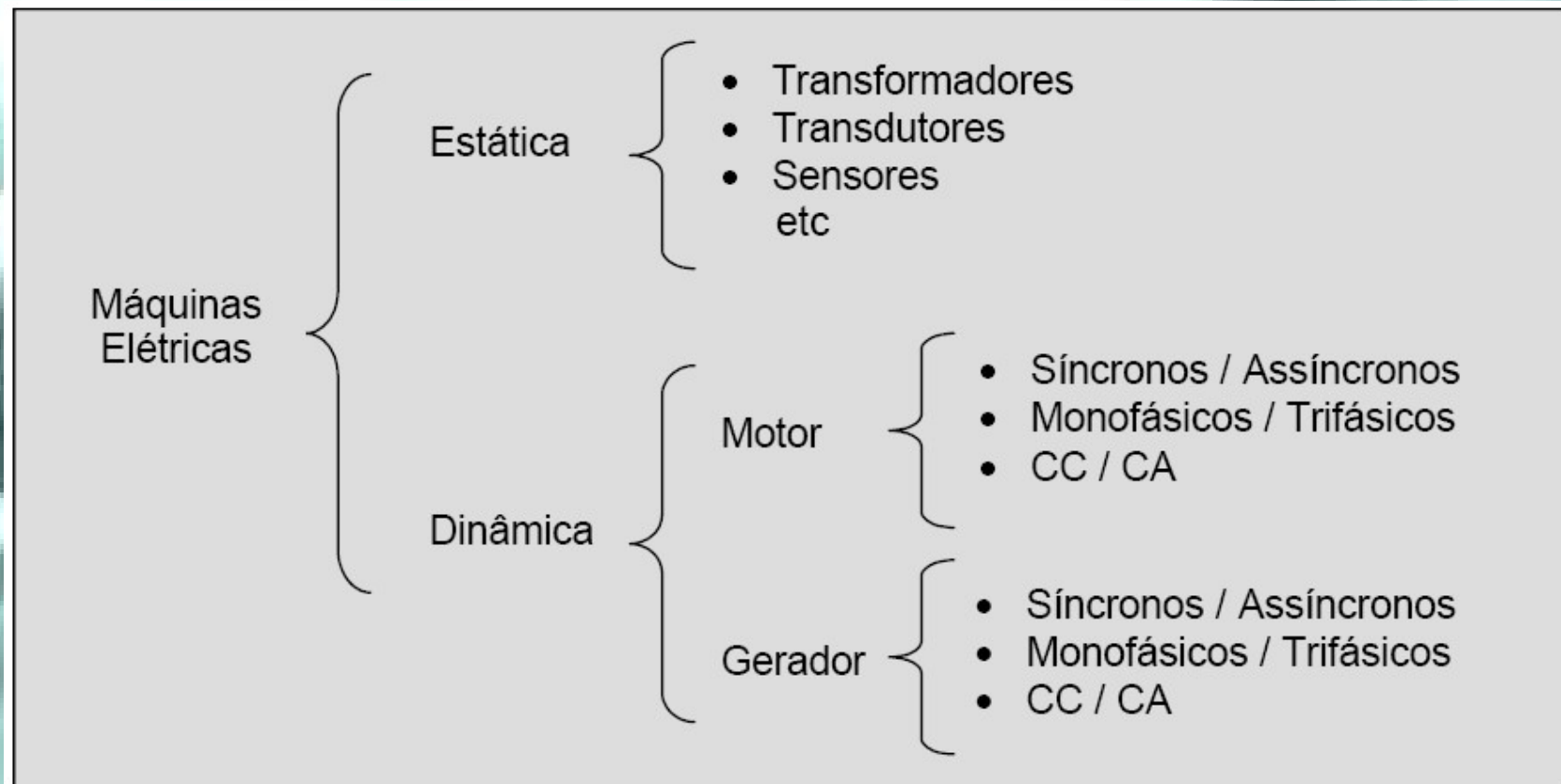


Campos magnéticos causam fenômenos elétricos e mecânicos:

Elétrico: induz tensão em condutores;

Mecânico: produzir forças e conjugados de atração e repulsão, em dispositivo eletromecânicos

CLASSIFICAÇÃO DAS MÁQUINAS ELÉTRICAS



EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

- Sistema de gravação magnética (fita cassete, disquete, VHS, HD)
- Alto falante (converte sinal elétricas em movimento mecânico)
- Microfone (converte movimento mecânico em sinal elétrico)
- Instrumentos analógicos de ponteiro
- Transformadores
- Relés
- Telefone
- Eletroímã

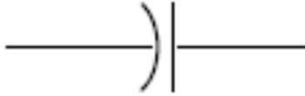


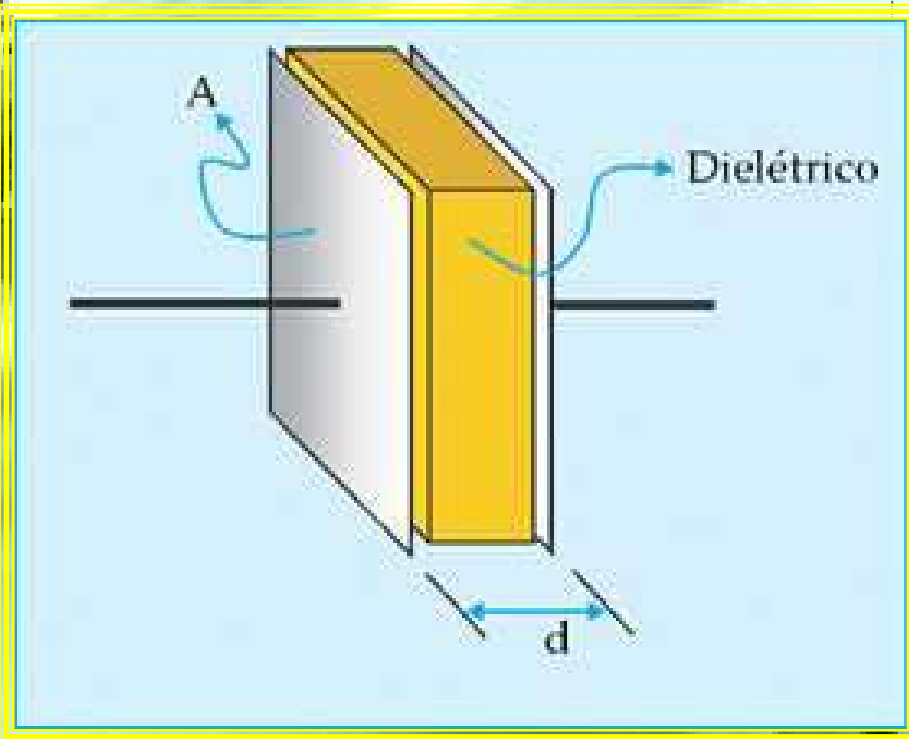
RESISTÊNCIA ELÉTRICA

- Unidade de medida : Ω
- Símbolo do componente:
- Dissipa energia em forma de calor
- Condutância: inverso da resistência.



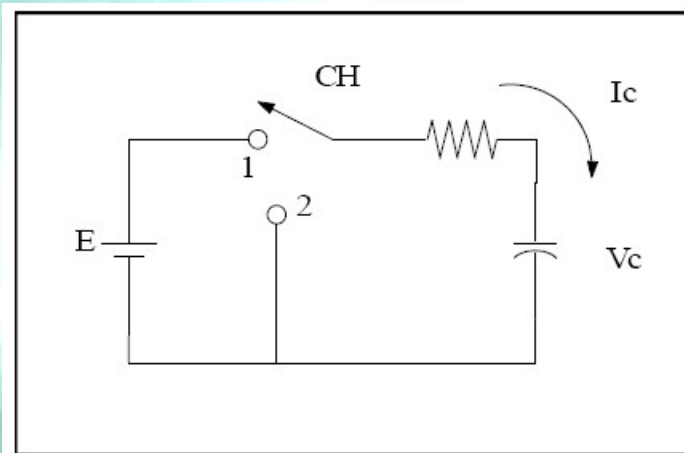
CAPACITÂNCIA

- **Unidade de medida : Farad (F)**
- **Símbolo do componente:** 
- **Armazena energia em forma de campo elétrico**



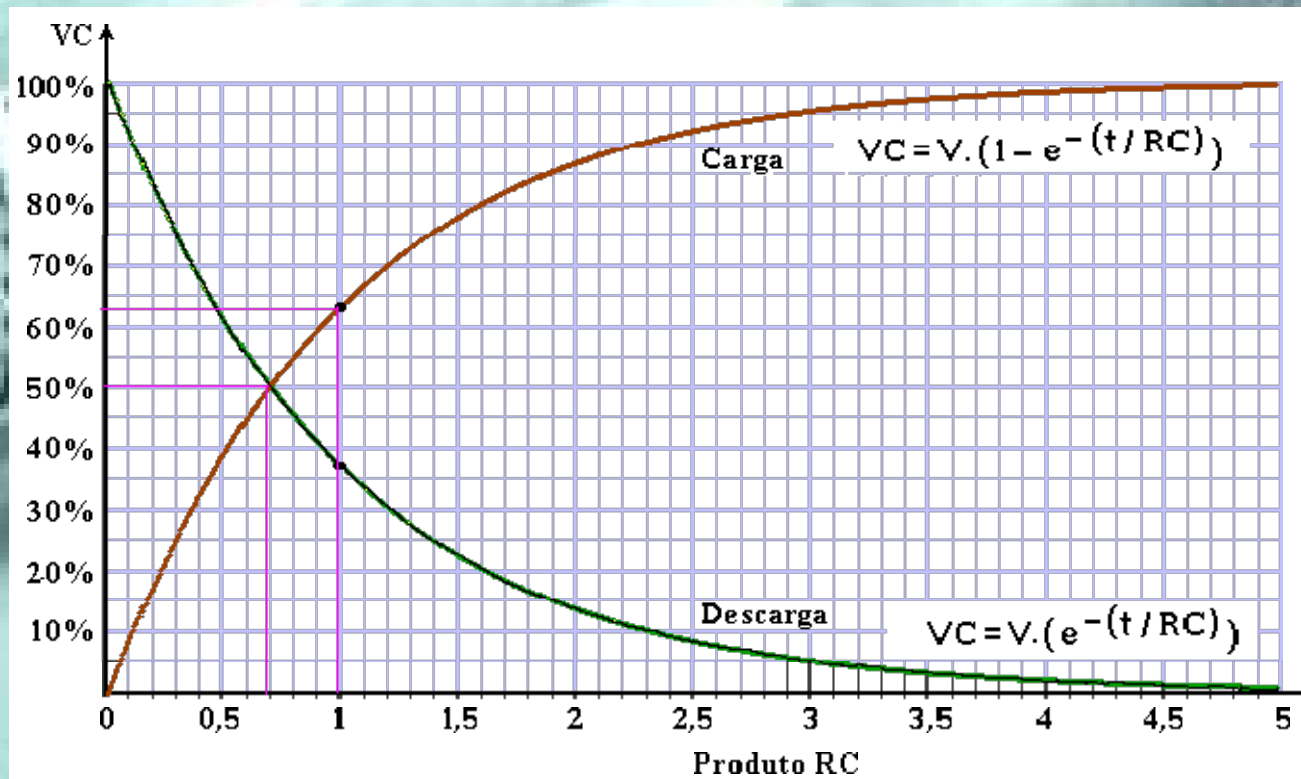
$$E = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C}$$

Capacitor (comportamento)



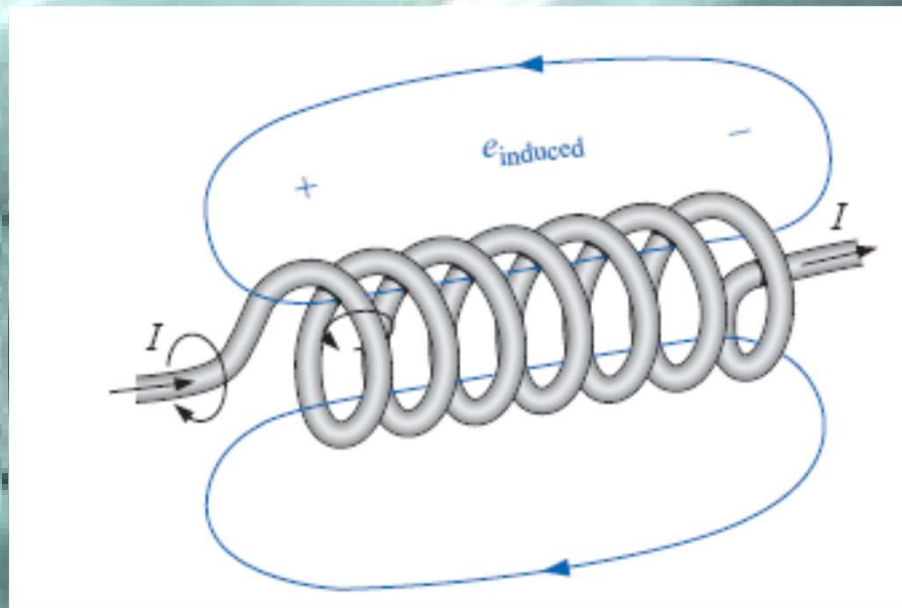
$$i_c = C \frac{dv_c}{dt}$$

$$\tau = RC$$

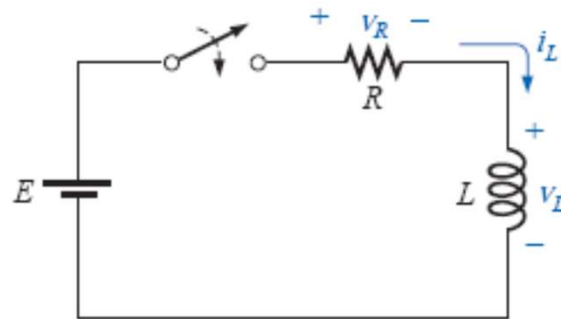


INDUTÂNCIA

- Unidade de medida : Henry (H)
- Símbolo do componente: 
- Armazena energia em forma de campo magnético

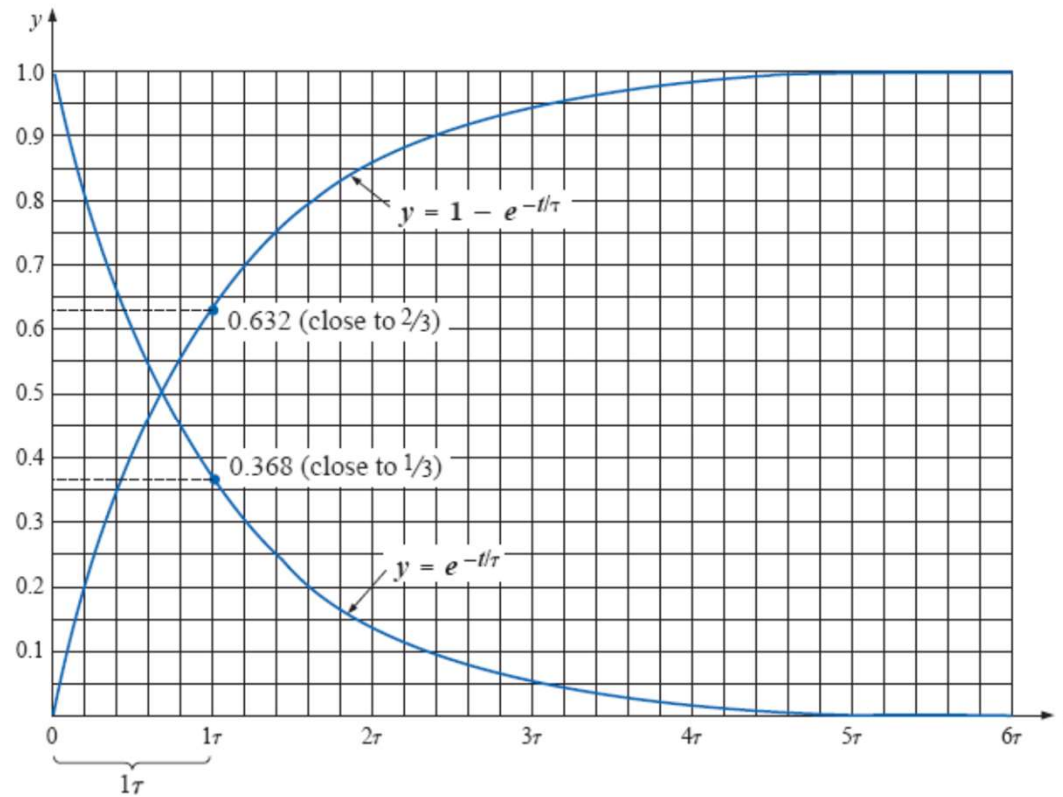


Indutor (comportamento)

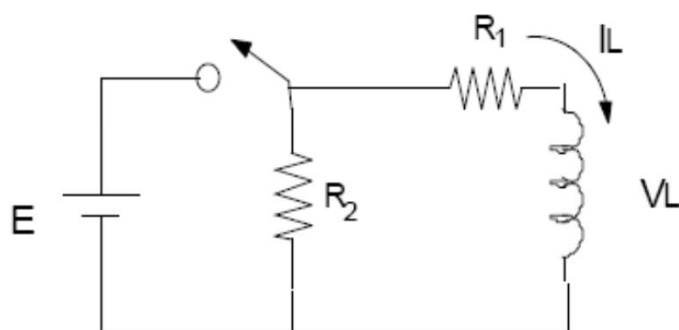


$$v_L = L \frac{di}{dt}$$

$$\tau = \frac{L}{R}$$



Seja o circuito mostrado abaixo. Determine:



a) As expressões matemáticas para V_L , i_L , V_{R1} e V_{R2} para cinco constantes de tempo na fase de armazenamento.

b) A tensão e a corrente na bobina duas constantes de tempo após o fechamento da chave.

Os valores dos componentes são: $E = 50 \text{ V}$; $R_1 = 2 \text{ k}\Omega$; $R_2 = 3 \text{ k}\Omega$; $L = 4 \text{ H}$.

a) Determinação da constante de tempo: $\tau = \frac{L}{R} = \frac{4 \text{ H}}{2 \text{ k}\Omega} = 2 \text{ ms}$

* Determinação da expressão matemática de V_L . Pela equação (1.5), temos:

$$v_L = E \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad \text{Logo: } v_L = 50 \cdot e^{-\frac{t}{2 \cdot 10^{-3}}}$$

* Determinação da expressão matemática de i_L . Pela equação (1.4), temos:

$$i_L = \frac{E}{R_1} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad \rightarrow \quad i_L = \frac{50}{2k} (1 - e^{-\frac{t}{2 \cdot 10^{-3}}})$$

Logo:

$$i_L = 25 \cdot 10^{-3} (1 - e^{-\frac{t}{2 \cdot 10^{-3}}})$$

* Determinação da expressão matemática de V_{R1} e V_{R2} .

$$\text{Como } V_R = i_R \cdot R = i_L \cdot R \rightarrow v_R = E \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

Logo:

$$v_{R1} = 50(1 - e^{-\frac{t}{2 \cdot 10^{-3}}}) \rightarrow v_{R2} = 50V$$

b) Para $t = 2\tau$, temos:

$$V_L: \quad v_L = 50 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} = 50 \cdot e^{-2} = 6,77V$$

$$i_L: \quad i_L = 25 \cdot 10^{-3} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

$$i_L = 25 \cdot 10^{-3} \cdot (1 - e^{-2})$$

$$i_L = 25 \cdot 10^{-3} \cdot 0,86 = 21,5mA$$

V_{R1} :

$$v_{R1} = 50 \cdot (1 - e^{-2})$$

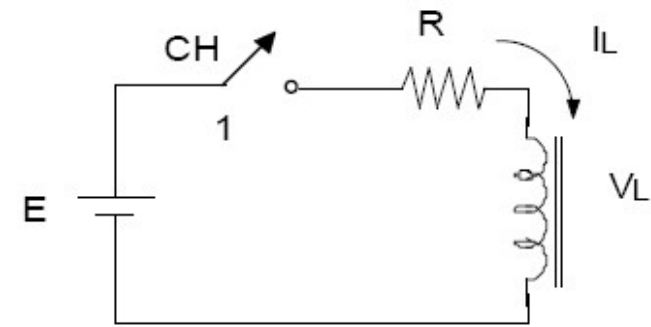
$$v_{R1} = 50 \cdot 0,86 = 43V$$

V_{R2} :

$$v_{R2} = 50V$$

1) Para o circuito da figura abaixo, determine:

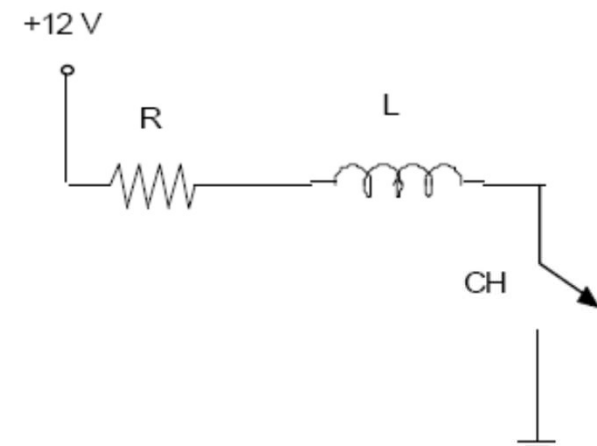
- a) a constante de tempo;
- b) a expressão matemática para a corrente i_L após a chave ser fechada em $t=0$ s;
- c) o mesmo para V_L e V_R ;
- d) i_L e V_L para uma, três e cinco constantes de tempo;
- e) as formas de onda de i_L , V_L e V_R .



$$R = 20k\Omega; L = 250 \text{ mH}; E = 40 \text{ mV}$$

2) Para o circuito da figura abaixo, determine:

- a) a constante de tempo;
- b) a expressão matemática para a corrente i_L após a chave ser fechada em $t=0$ s;
- c) o mesmo para V_L e V_R ;
- d) i_L e V_L para uma, três e cinco constantes de tempo;
- e) as formas de onda de i_L , V_L e V_R .



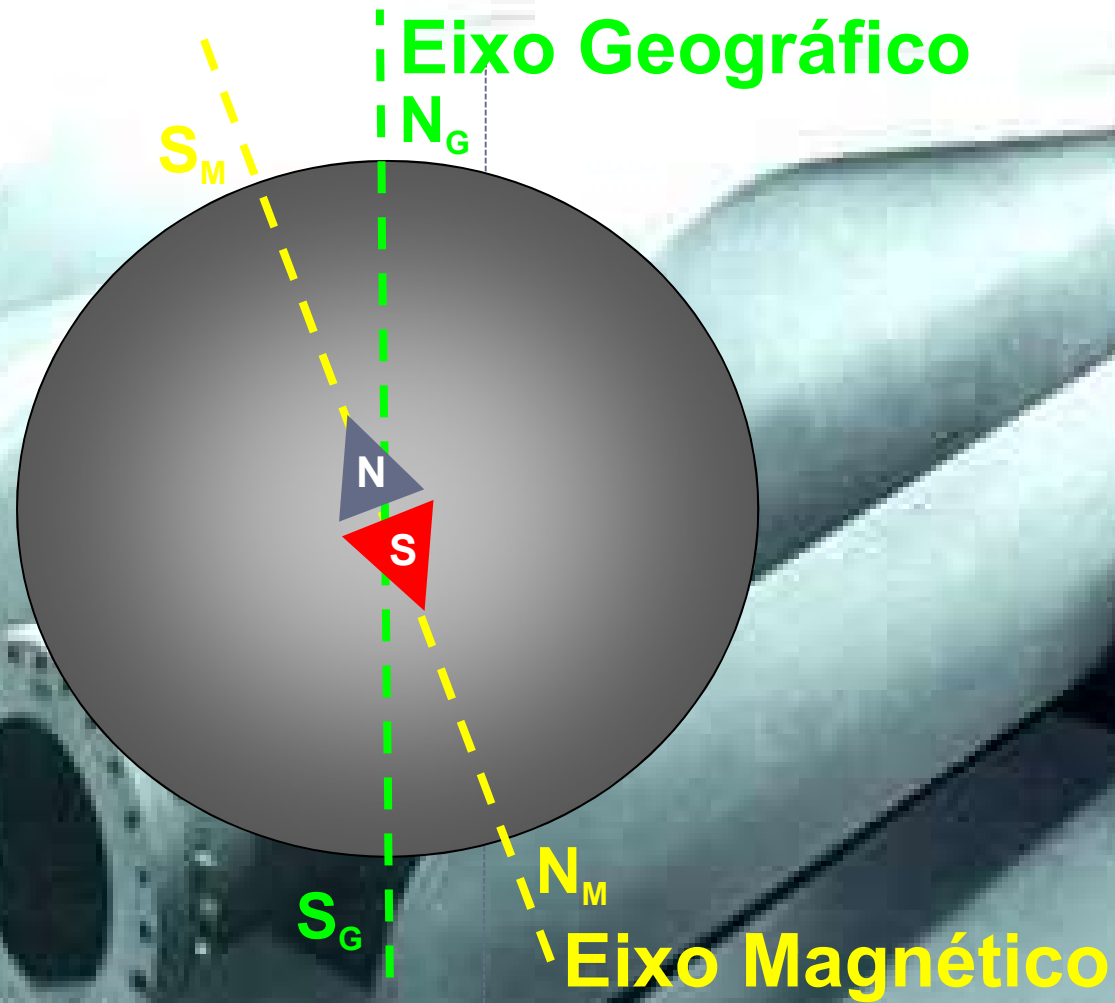
$$R = 2,2k\Omega; L = 5\text{mH}; E = 12 \text{ V}$$

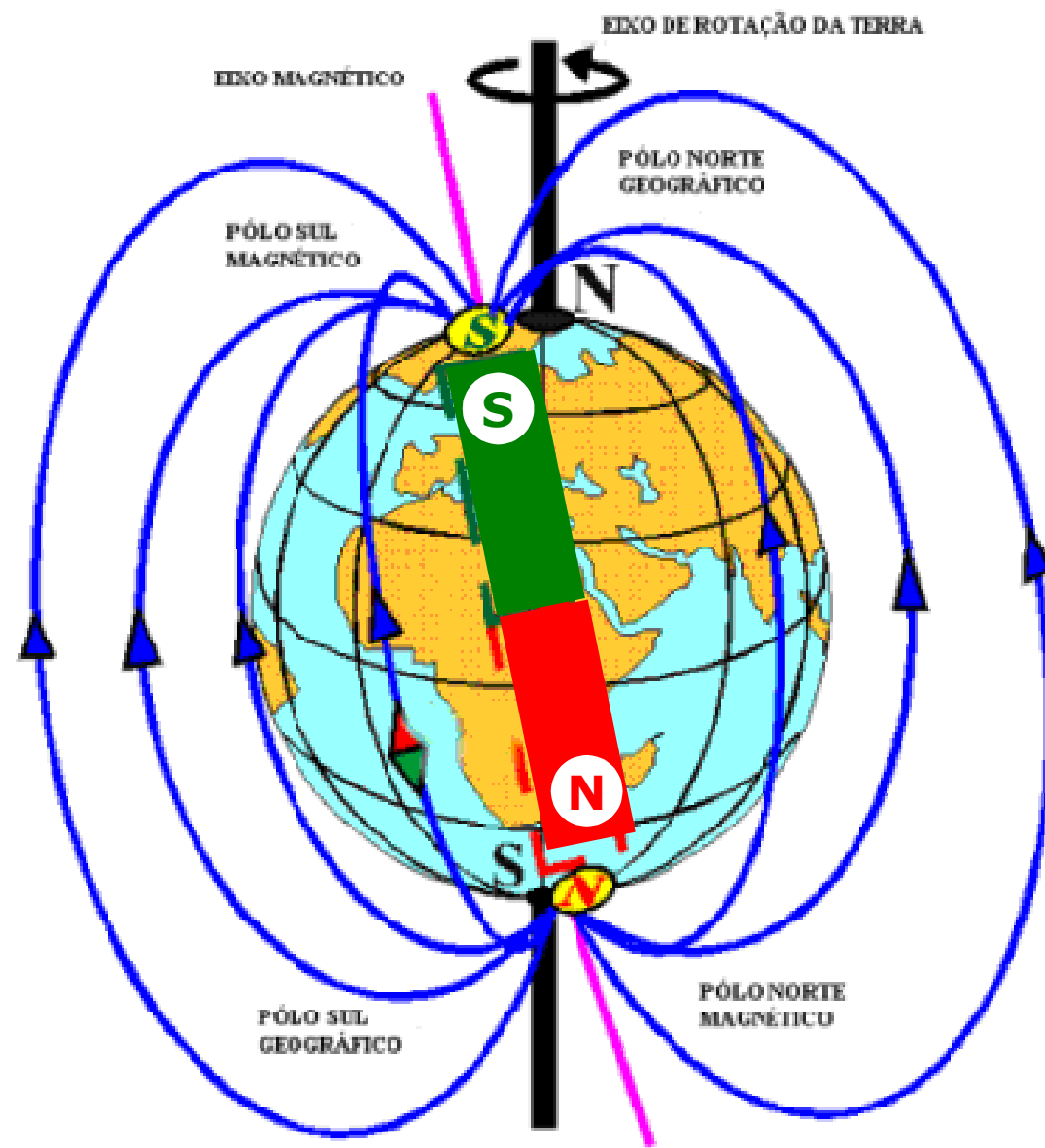
Magnetismo



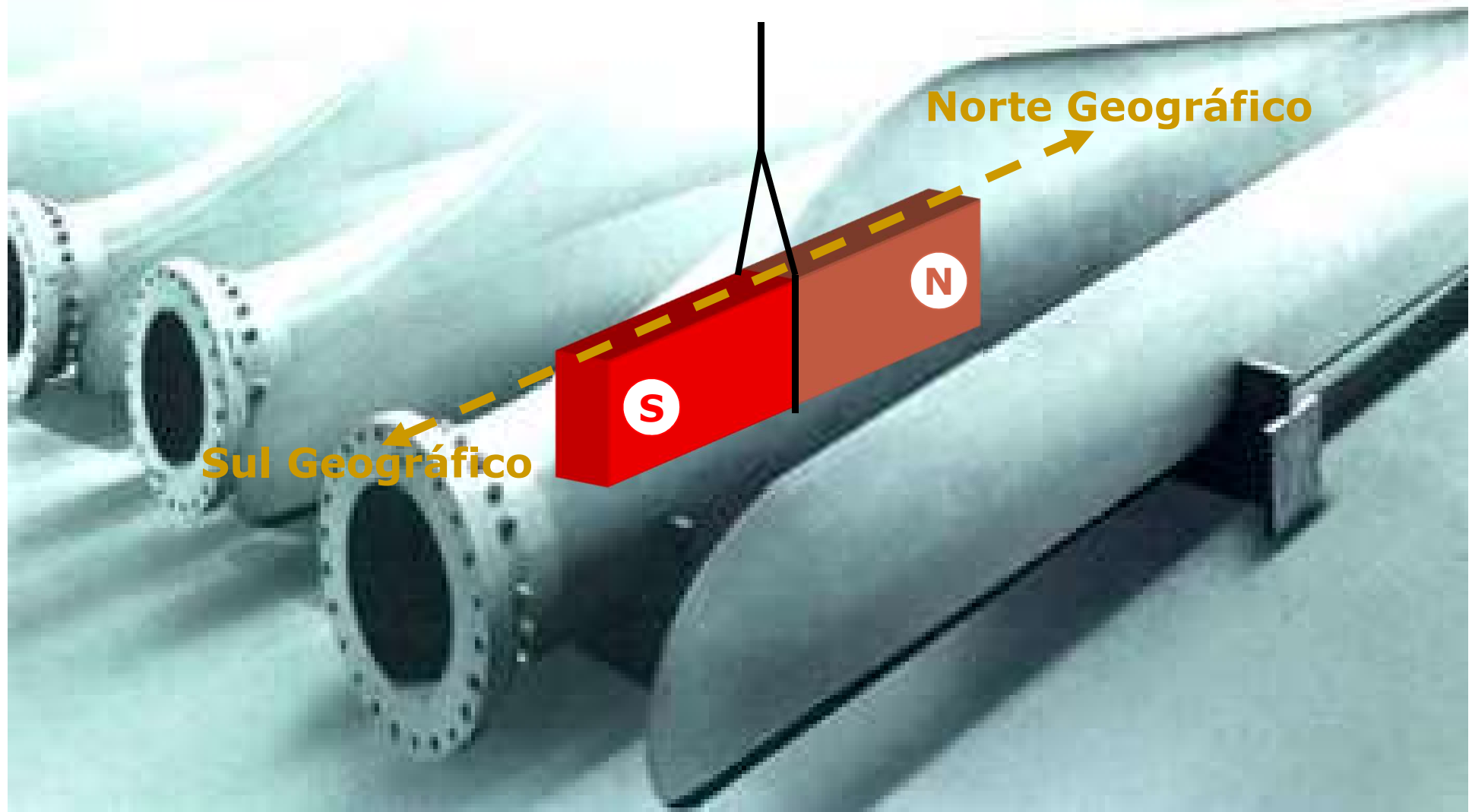
- **PRINCÍPIOS DO MAGNETISMO**
- **CAMPO MAGNÉTICO**
- **VETOR INDUÇÃO MAGNÉTICA**
- **INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA**

Magnetismo Terrestre

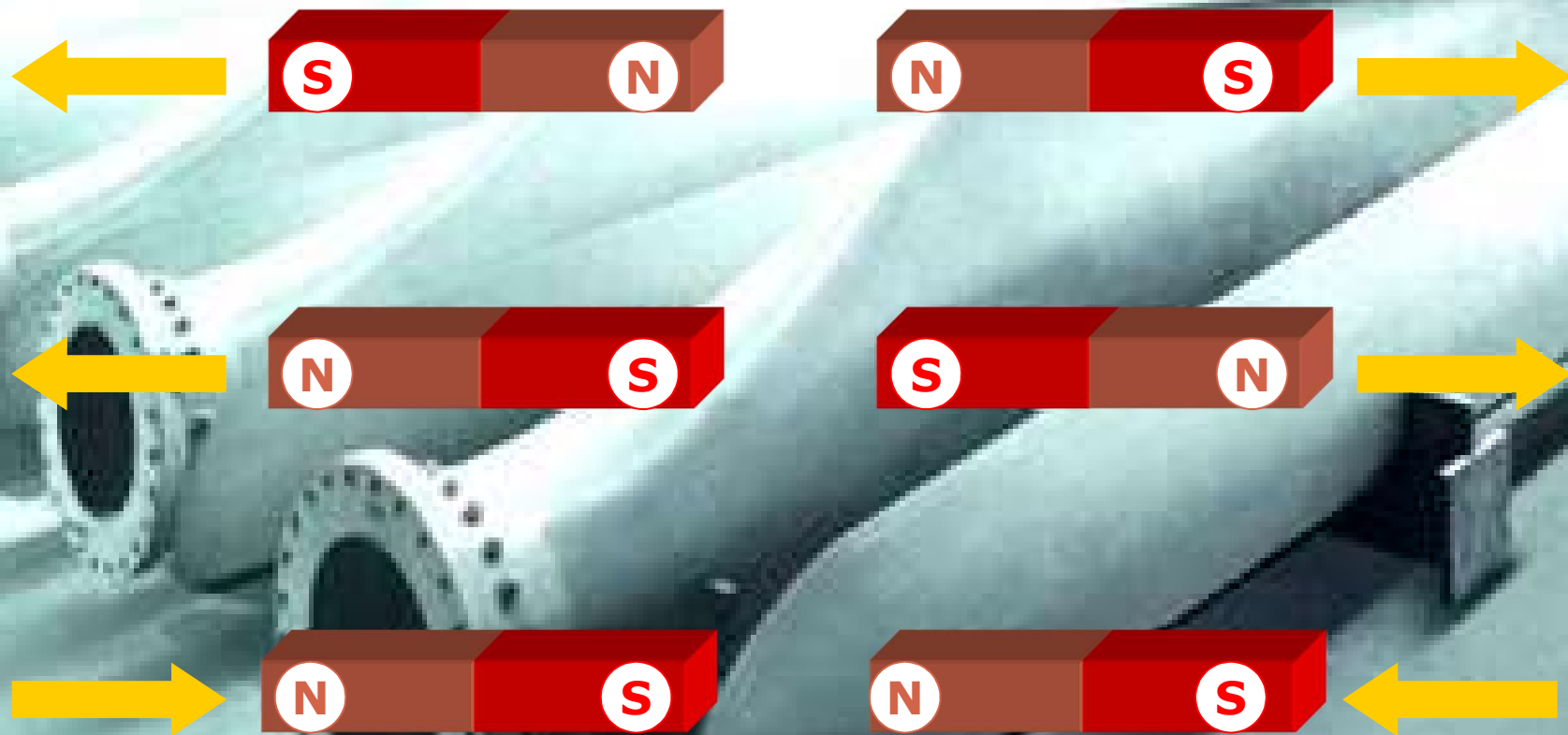




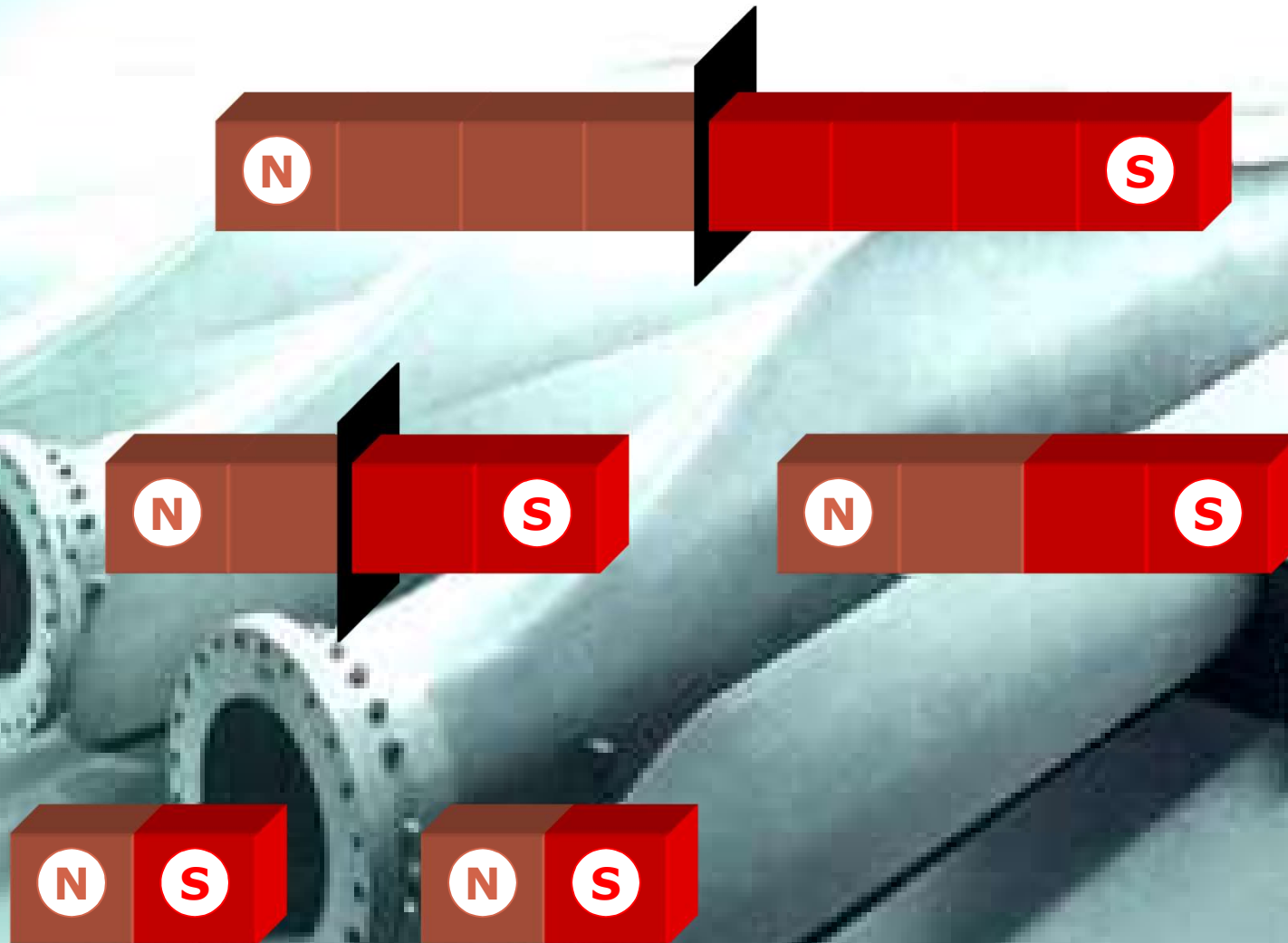
Orientação Geográfica



Atração e Repulsão

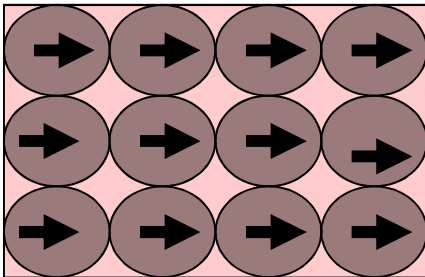


Inseparabilidade

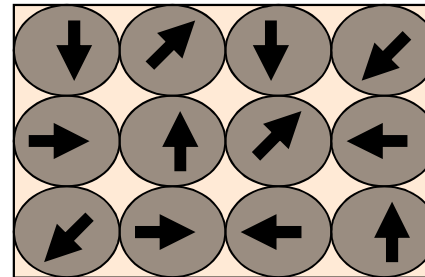


Observação:

Isso acontece porque a orientação magnética está nos átomos do material:



Magnético



Não-Magnético

Campo Magnético

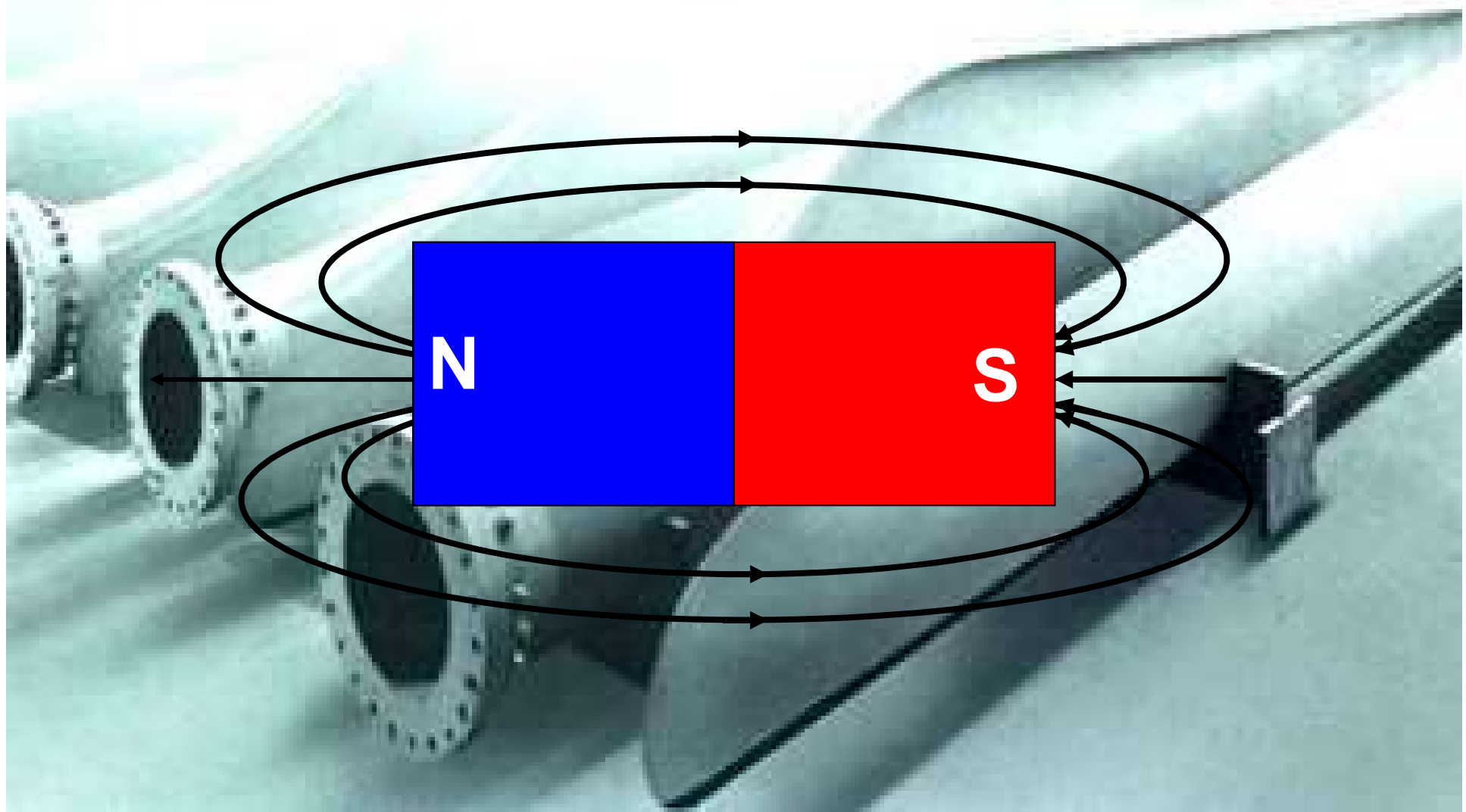
É a região ao redor de um ímã na qual podem haver forças de origem magnética.

Linhas de Força

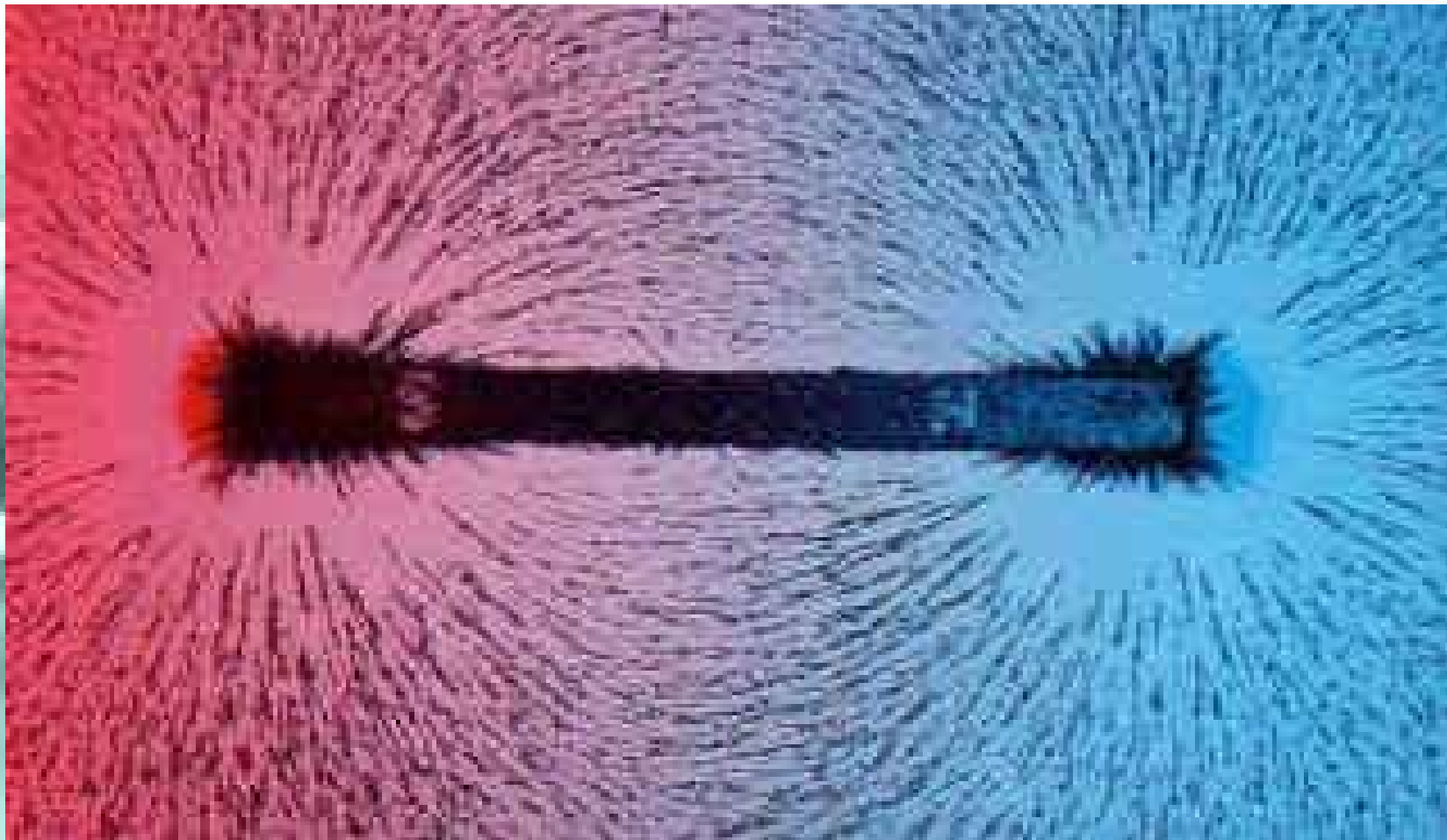
- **São linhas fechadas que saem do pólo norte e chegam no pólo sul;**
- **Representam geometricamente a atuação do campo magnético;**
- **Sua concentração indica a intensidade do campo magnético.**



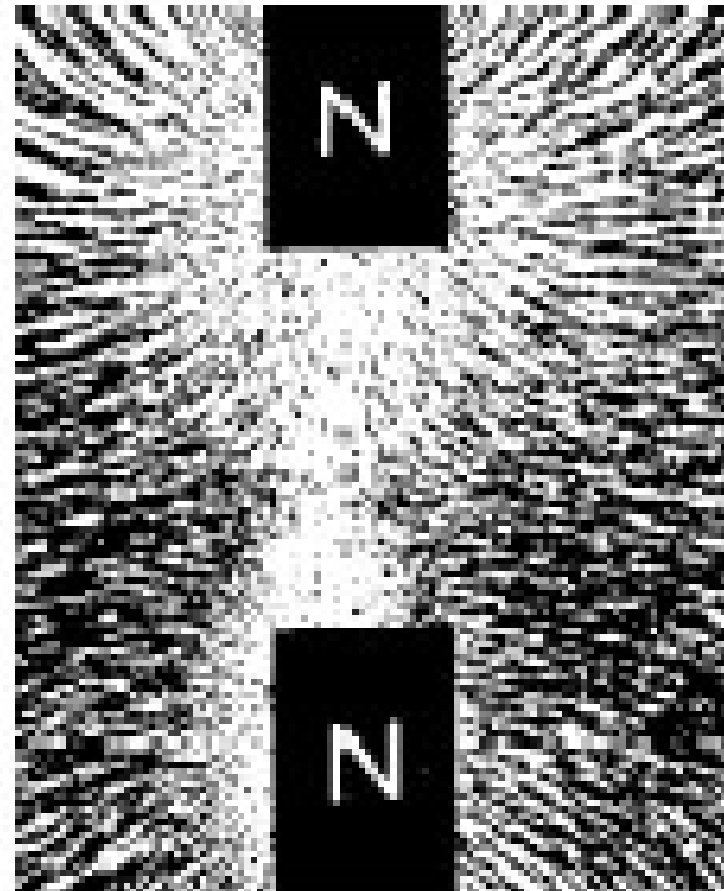
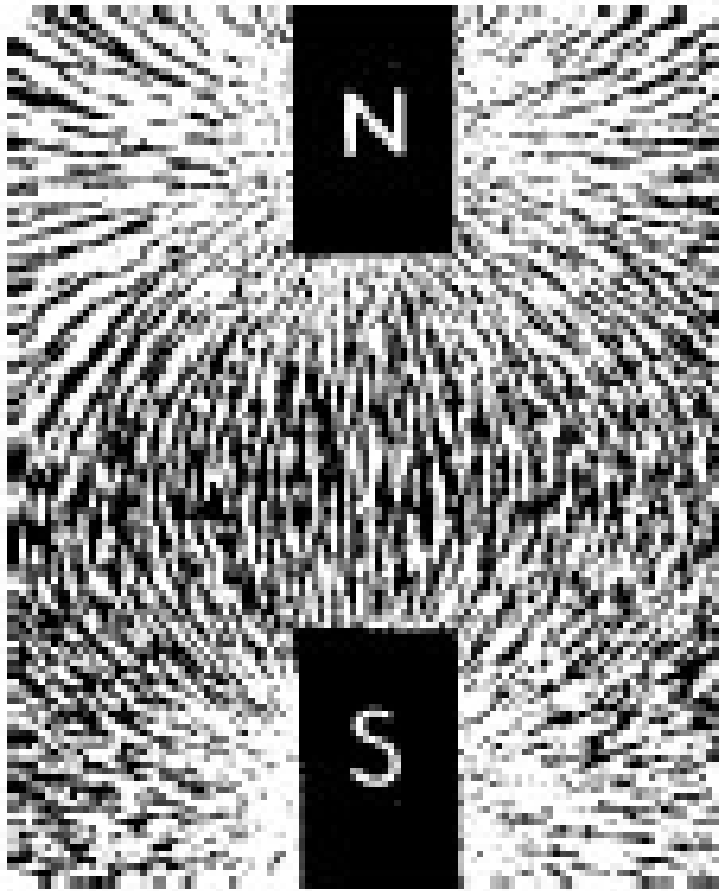
Representação das L.F.



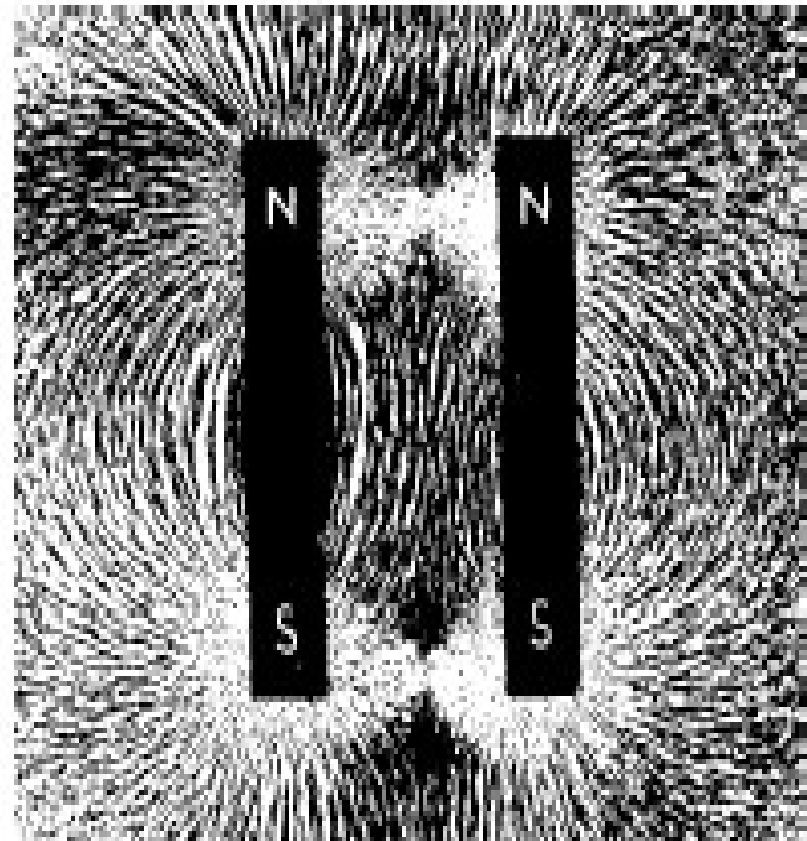
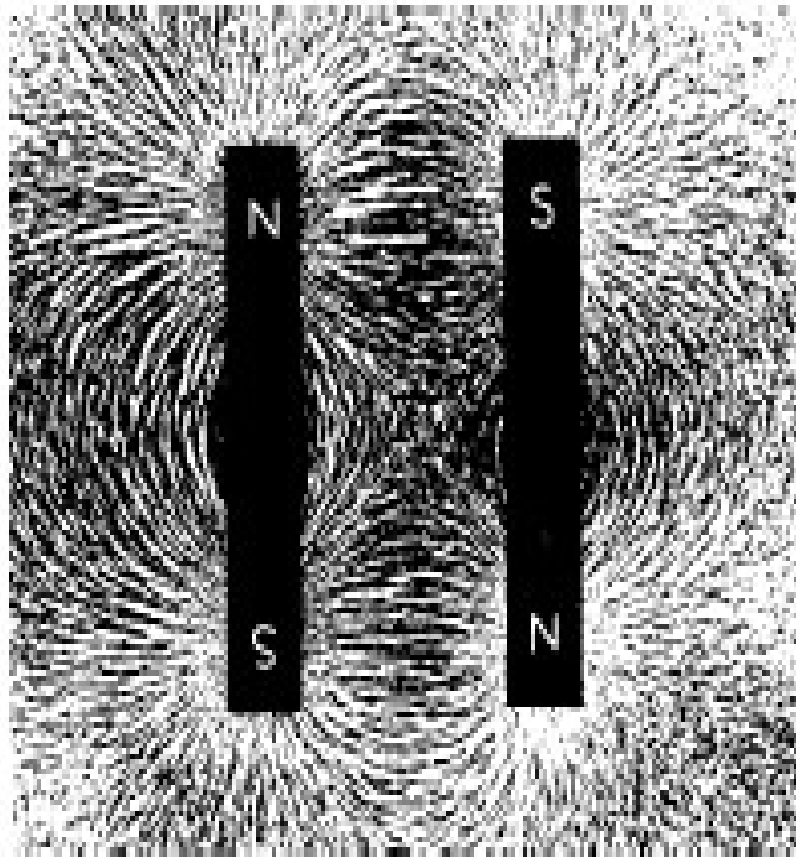
Representação das L.F.



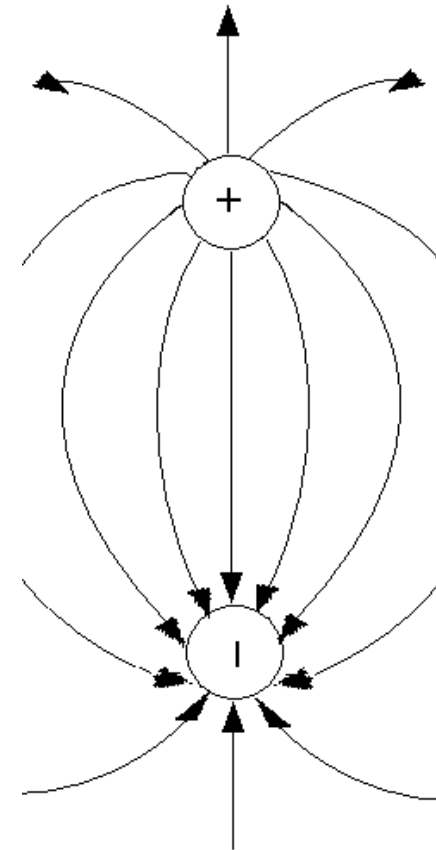
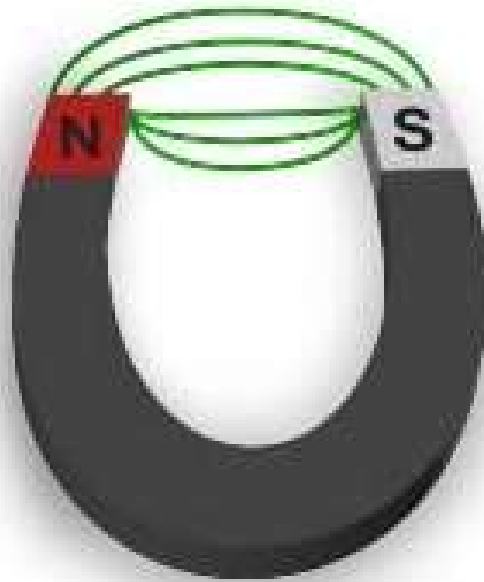
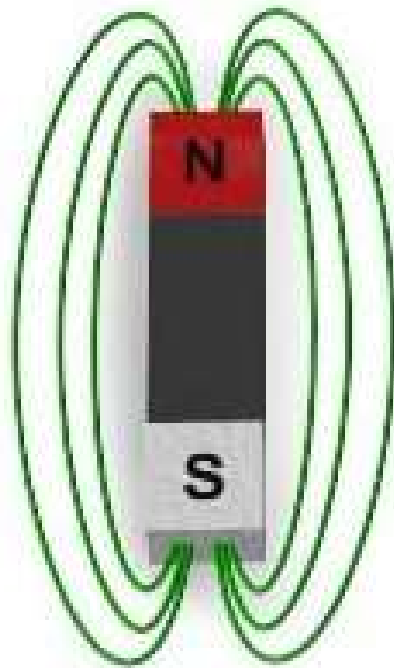
Representação das L.F.



Representação das L.F.



Representação das L.F.



Vetor Indução Magnética

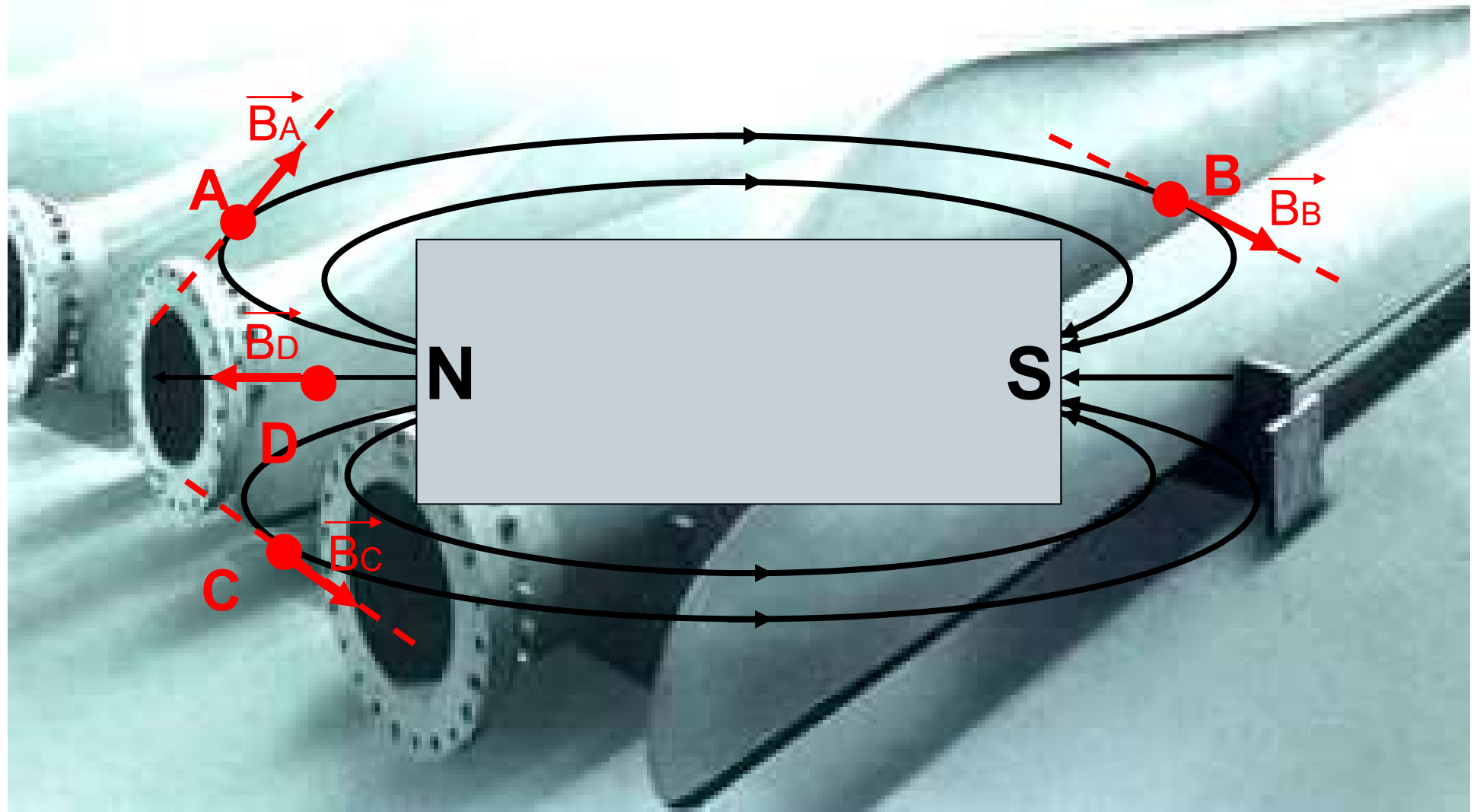
Módulo: Depende da intensidade do campo magnético.

Direção: Tangente às linhas de força do campo magnético.

Sentido: O mesmo das linhas de força do campo magnético

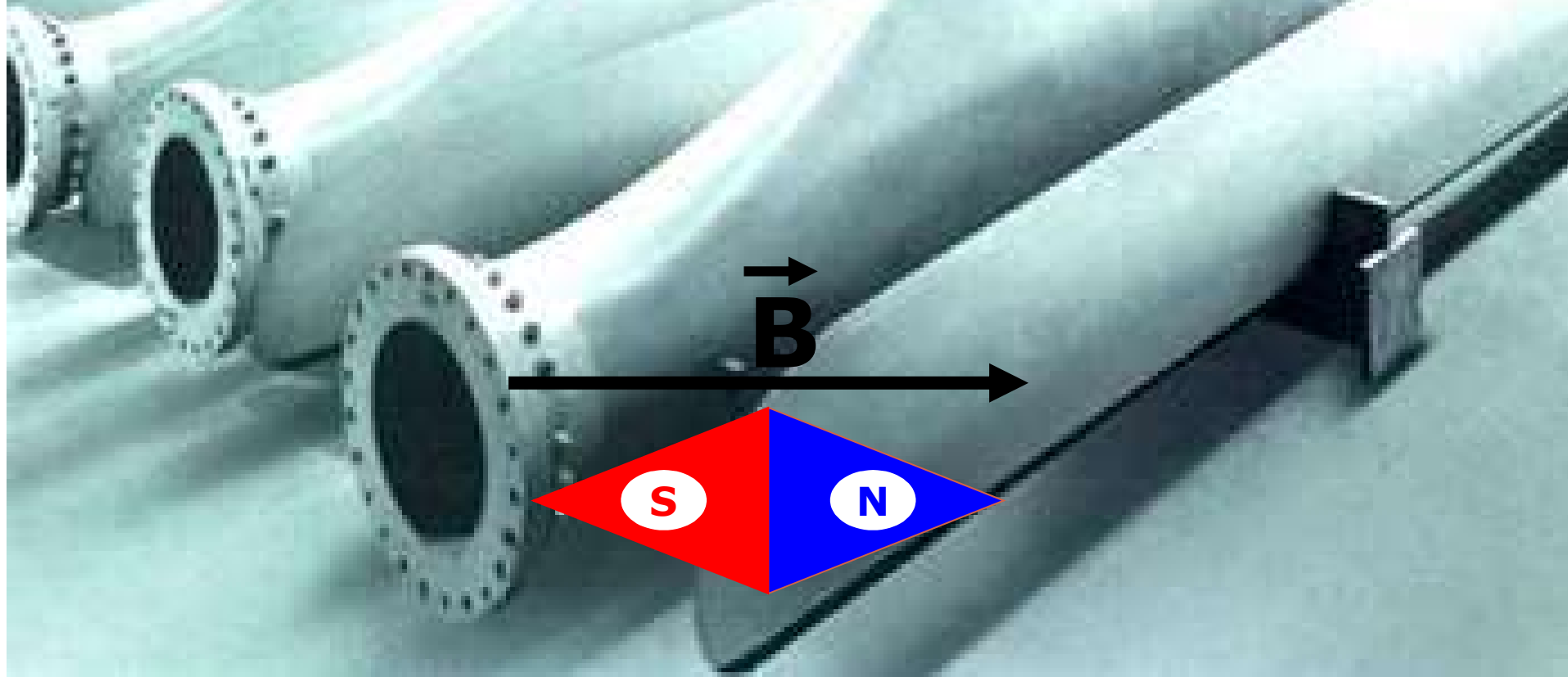


Vetor Indução Magnética

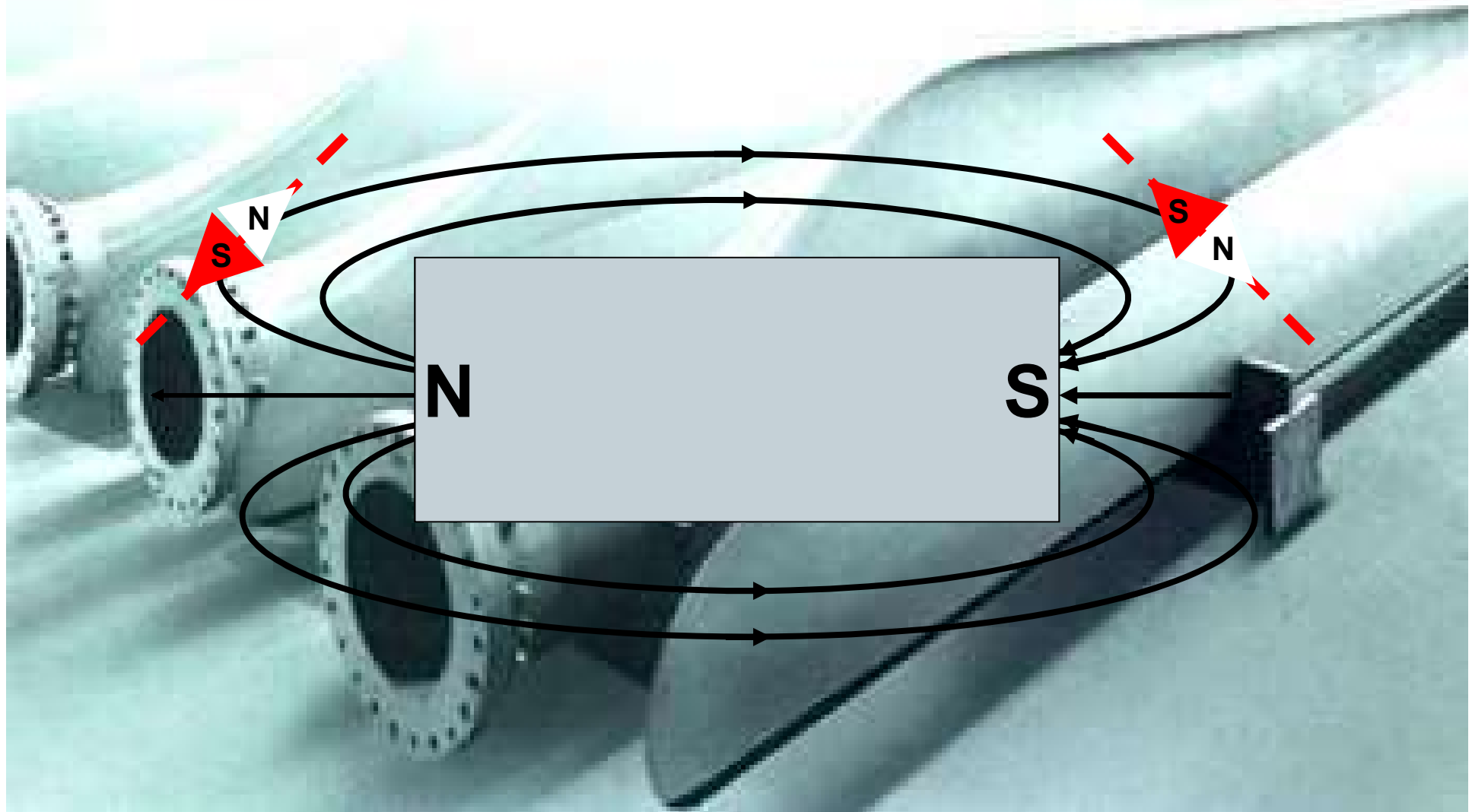


Orientação de uma Bússola

A agulha tem a mesma direção do vetor indução magnética com o pólo norte apontando no mesmo sentido do vetor indução magnética



Orientação de uma Bússola



Campo Magnético Gerado por Corrente Elétrica

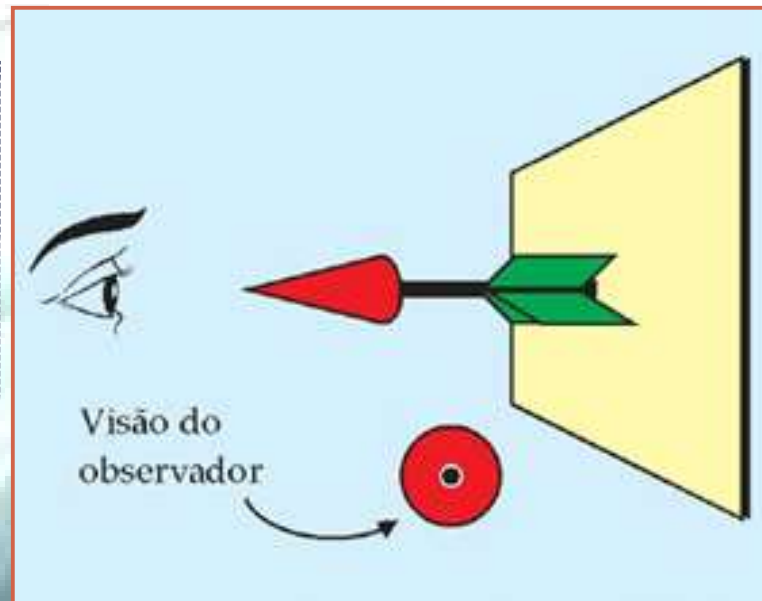
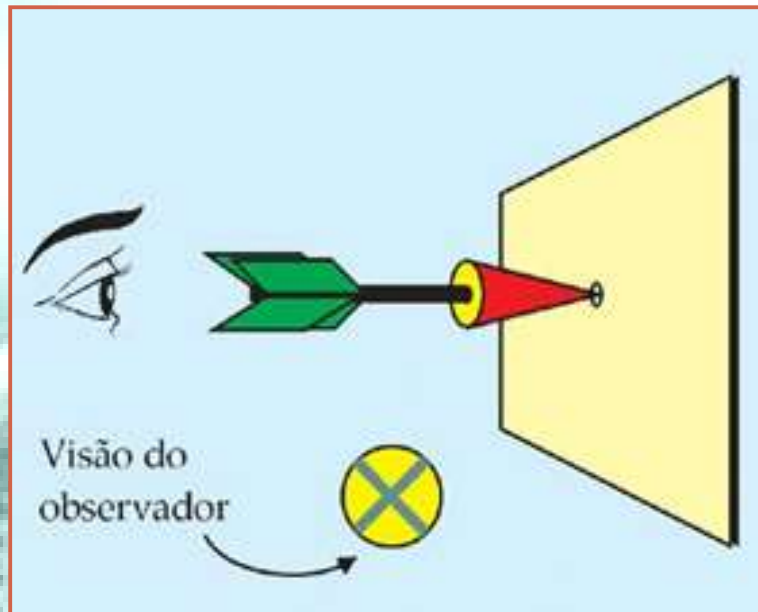


- **EXPERIÊNCIA DE OERSTED**
- **VETOR PERPENDICULAR AO PLANO**
- **CAMPO AO REDOR DE FIO RETILÍNEO**

VÍDEO ELETROIMÃ



Vetor Perpendicular ao Plano



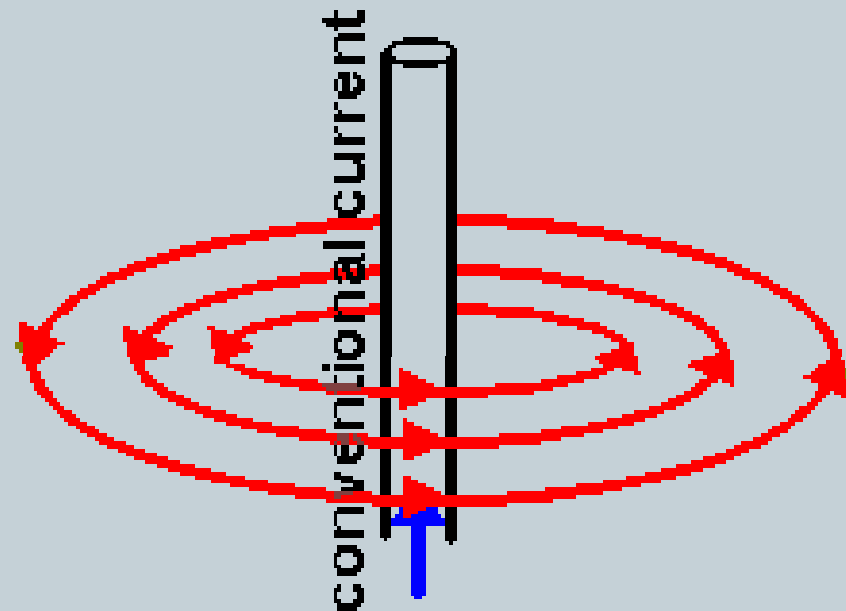
Vetor Entrando



Vetor Saindo

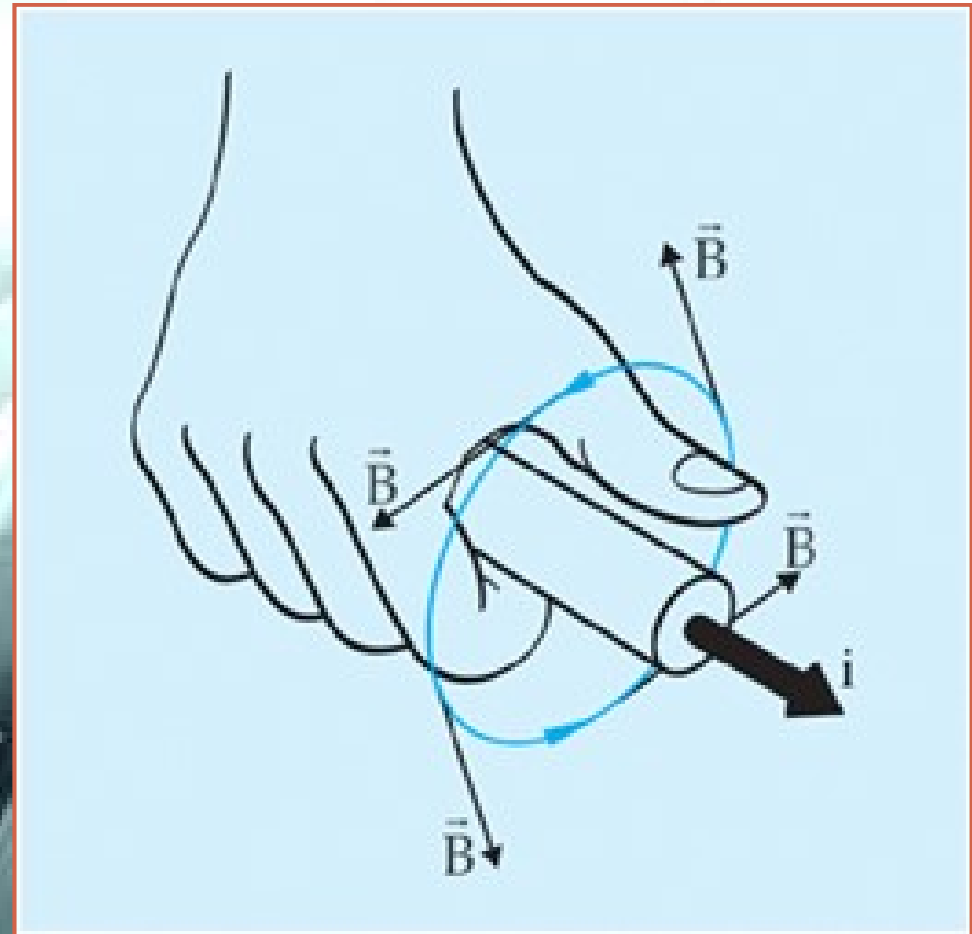
Campo Magnético ao redor de um fio condutor retílineo

AO REDOR DE UM CONDUTOR RETILÍNEO PERCORRIDO POR UMA CORRENTE ELÉTRICA EXISTE UM CAMPO MAGNÉTICO CUJAS LINHAS DE FORÇA SÃO CIRCUNFERÊNCIAS CONCÊNTRICAS AO FIO.



Sentido do Vetor B

Envolvendo-se a **mão direita** no fio condutor, o polegar indicará o sentido da corrente e o restante dos dedos indicará o sentido do campo magnético

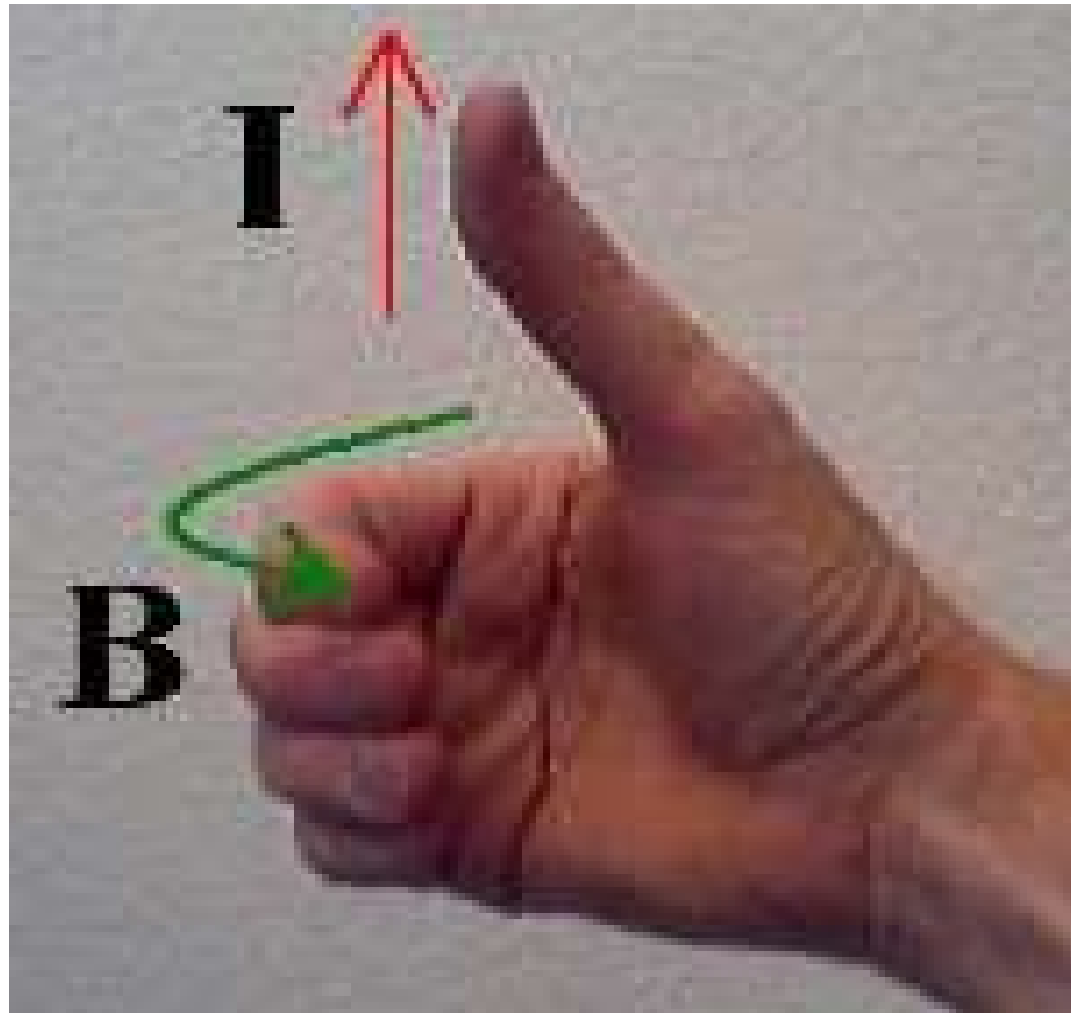


Regra da mão direita:

Serve para indicar a direção e o sentido do campo magnético produzido por uma corrente elétrica:

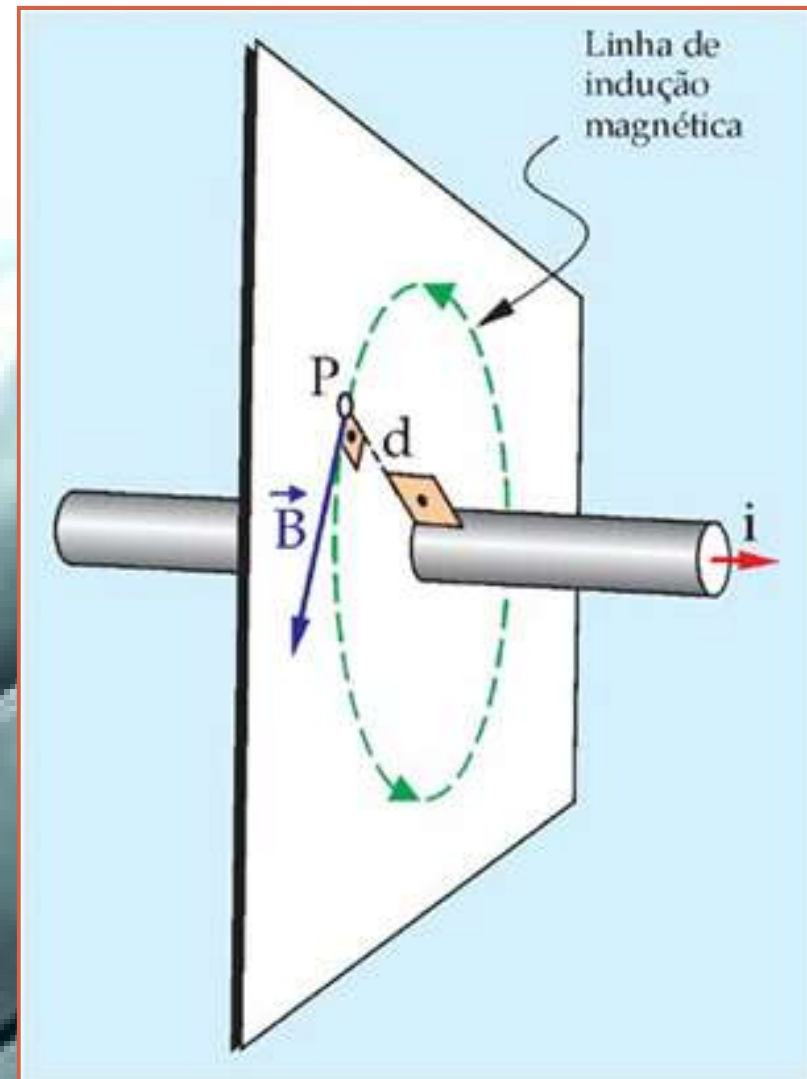
Dedão: Corrente Elétrica (i)

Outros dedos: Linhas do Campo Magnético (B)

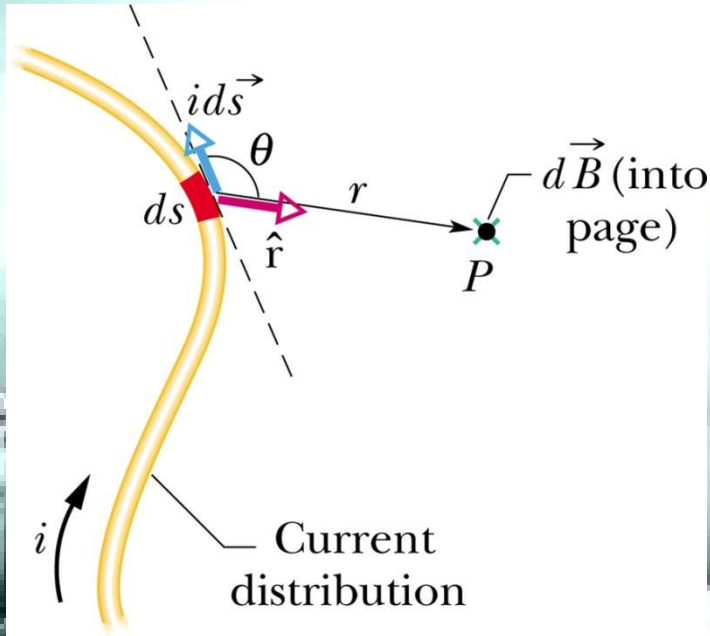


Direção do Vetor B

O vetor indução magnética é tangente às linhas de força do campo magnético e no mesmo sentido delas.



A lei de Biot e Savart



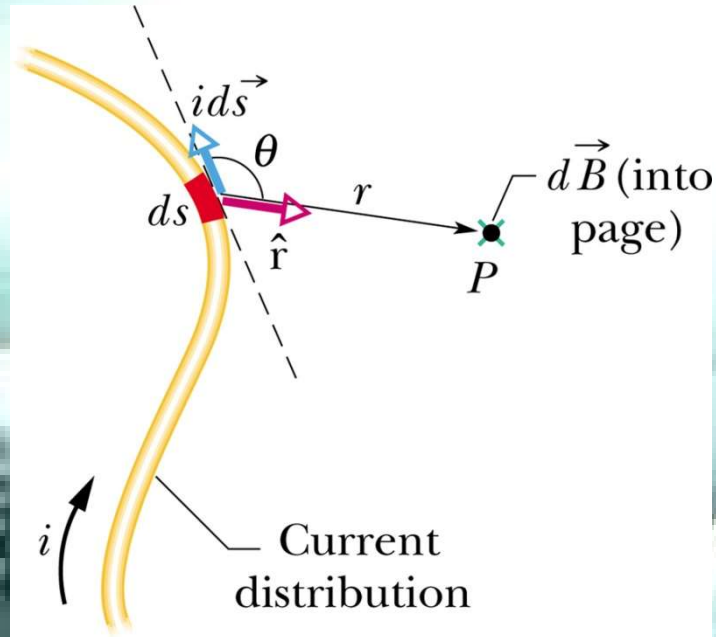
- A lei de **Biot e Savart** relaciona o campo magnético com a corrente que o produz.

$$d\vec{B} = \frac{\mu_o}{4\pi} \frac{id\vec{s} \times \vec{r}}{r^2}$$

- Constante de permeabilidade

$$\mu_o = 4\pi \times 10^{-7} T \cdot m / A$$

A lei de Biot e Savart



- A lei de Biot e Savart será aplicada em problemas de magnetostática: correntes em regime produzindo campos constantes.

- A lei de Biot e Savart é uma lei experimental e pode ser considerada uma variação algébrica da lei de Ampère.

A lei de Biot e Savart

$$d\vec{B} = \frac{\mu_o}{4\pi} \frac{id\vec{l} \times \vec{r}}{r^2}$$

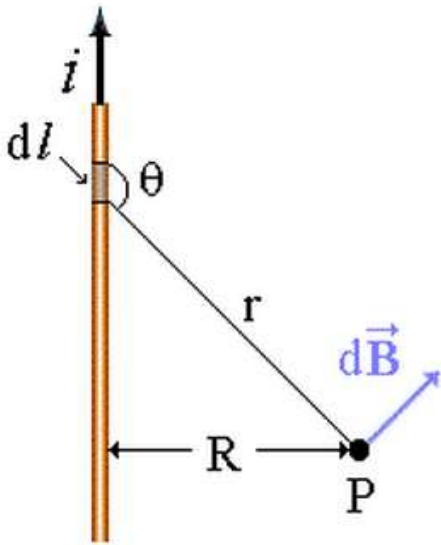
$$\vec{B} = \mu_o \vec{H}$$

$$d\vec{H} = \frac{1}{4\pi} \frac{id\vec{l} \times \vec{r}}{r^2}$$

Densidade de fluxo ou
indução magnética

Intensidade de
campo magnético

Indução magnética a uma distância de um fio retilíneo



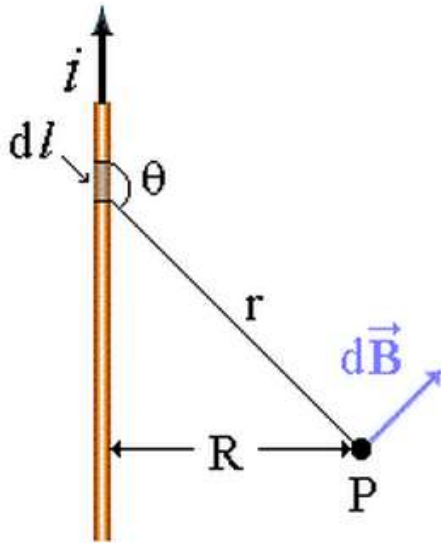
$$\text{sen } \theta = \text{sen}(\pi - \theta)$$

$$d\vec{B} = \frac{\mu_o}{4\pi} \frac{id\vec{l} \times \vec{r}}{r^2}$$

$$d\vec{B} = \frac{\mu_o}{4\pi} \frac{idl}{r^2} \text{sen } \theta$$

$$d\vec{B} = \frac{\mu_o}{4\pi} \frac{idl}{r^2} \frac{R}{(l^2 + R^2)^{1/2}}$$

Indução magnética a uma distância de um fio retilíneo



$$d\vec{B} = \frac{\mu_o i}{4\pi} \frac{R dl}{(l^2 + R^2)^{3/2}}$$

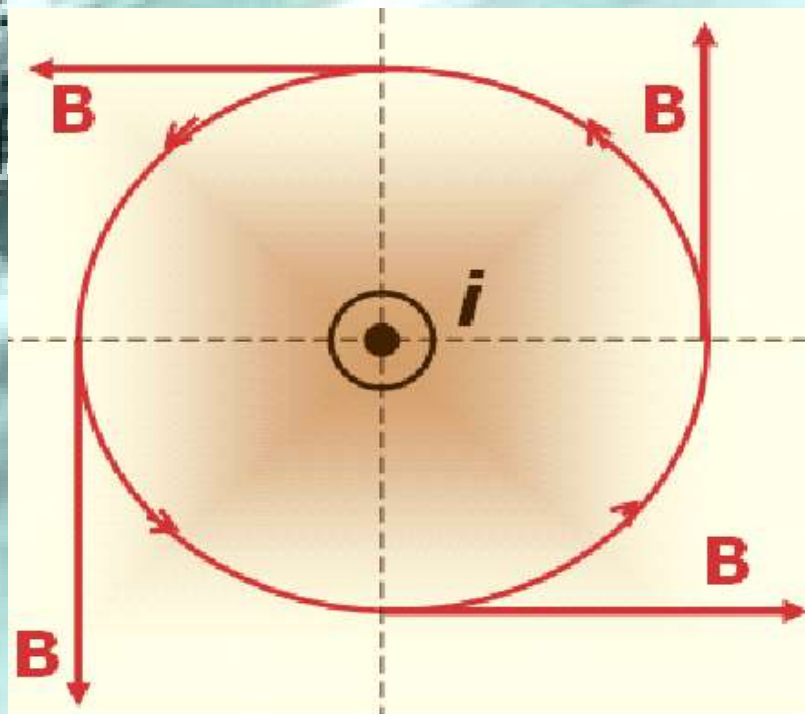
$$\vec{B} = \frac{\mu_o i}{2\pi} \int_0^{\infty} \frac{R}{(l^2 + R^2)^{3/2}} dl$$

$$\vec{B} = \frac{\mu_o i}{2\pi R} \left(\frac{l}{(l^2 + R^2)^{1/2}} \right)_0^{\infty}$$

$$\vec{B} = \frac{\mu_o i}{2\pi R}$$

Módulo do Vetor B

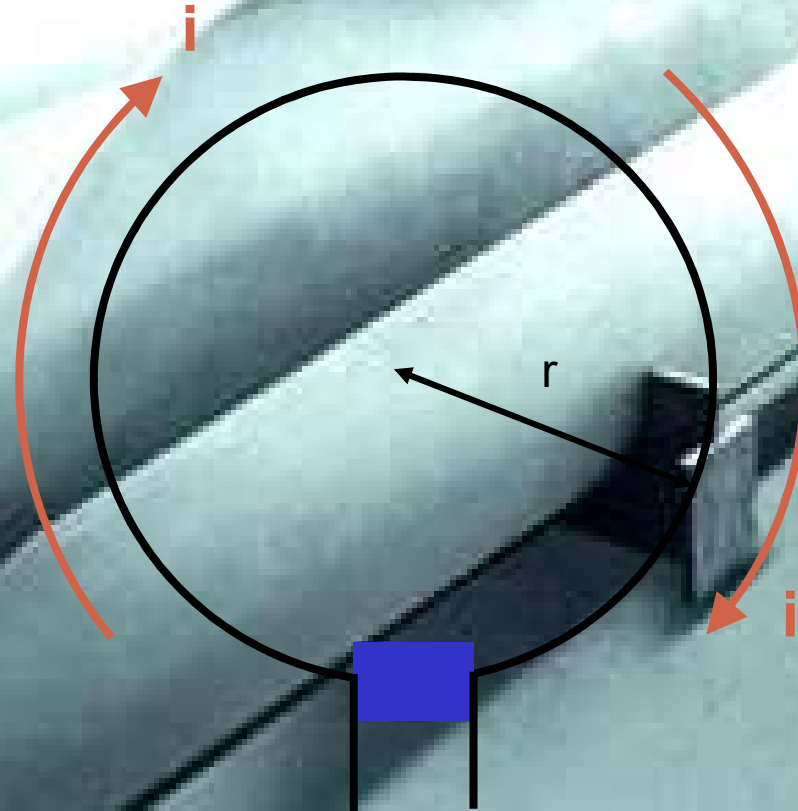
$$B = \frac{\mu \cdot i}{2 \cdot \pi \cdot d}$$



- $[B]=T$ (tesla)
- μ é a constante de permeabilidade magnética e no vácuo é $\mu_0=4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T.m/A}$
- i é a intensidade da corrente
- d é a distância do fio ao vetor B

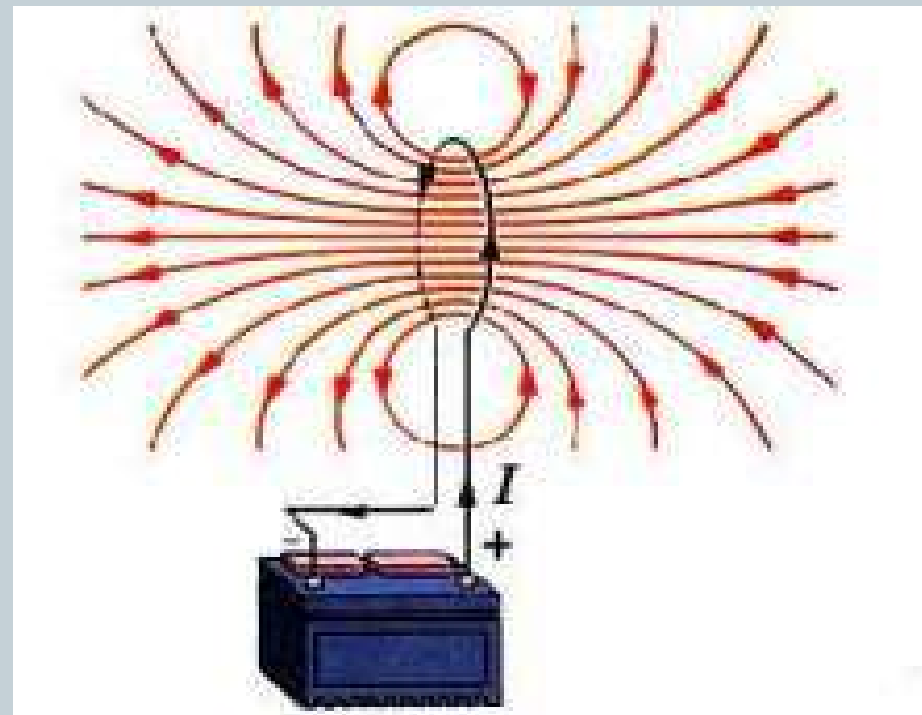
Espira Circular

Espira circular é um fio condutor dobrado no formato de uma circunferência.



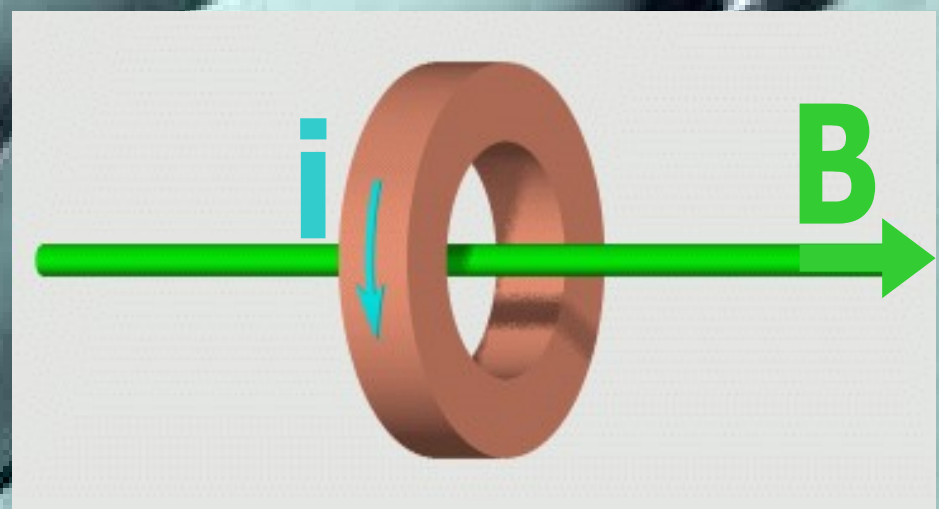
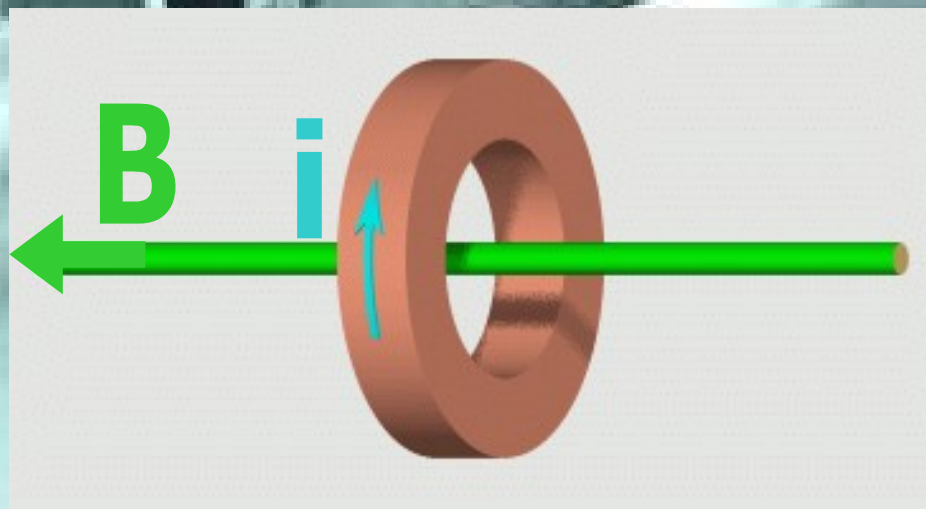
Campo Magnético no centro de uma Espira Circular

NO CENTRO DE UMA ESPIRA CIRCULAR PERCORRIDA POR UMA CORRENTE ELÉTRICA EXISTE UM CAMPO MAGNÉTICO PERPENDICULAR AO PLANO QUE CONTÉM A ESPIRA.

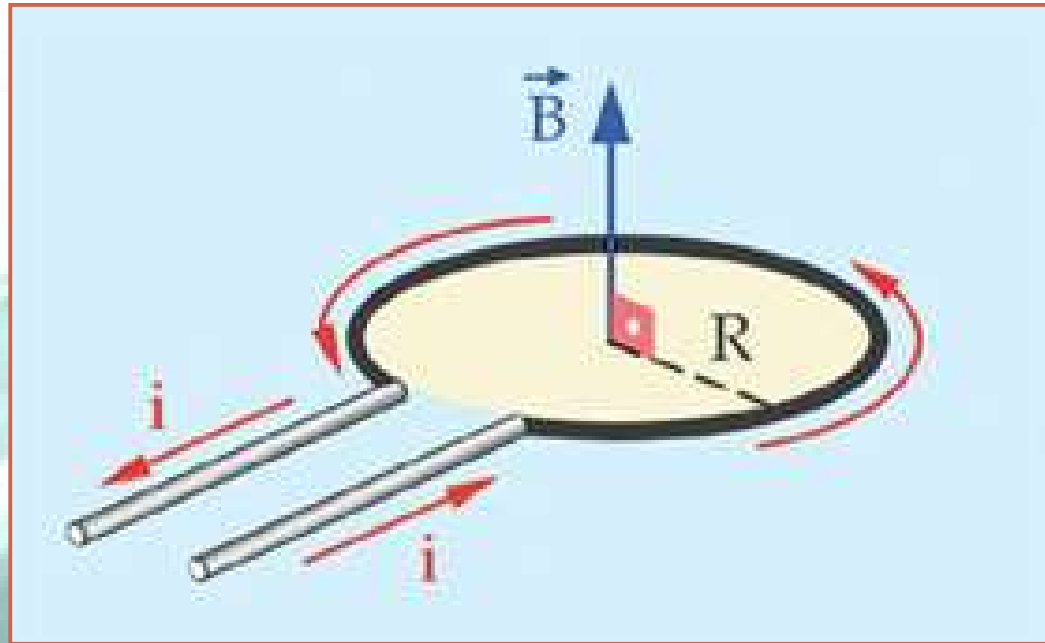


Direção e Sentido do Vetor B

O vetor indução magnética é perpendicular ao plano que contém a espira e envolvendo-se a **mão direita** no fio condutor, o polegar indicará o sentido da corrente e o restante dos dedos indicarão o sentido do campo magnético.



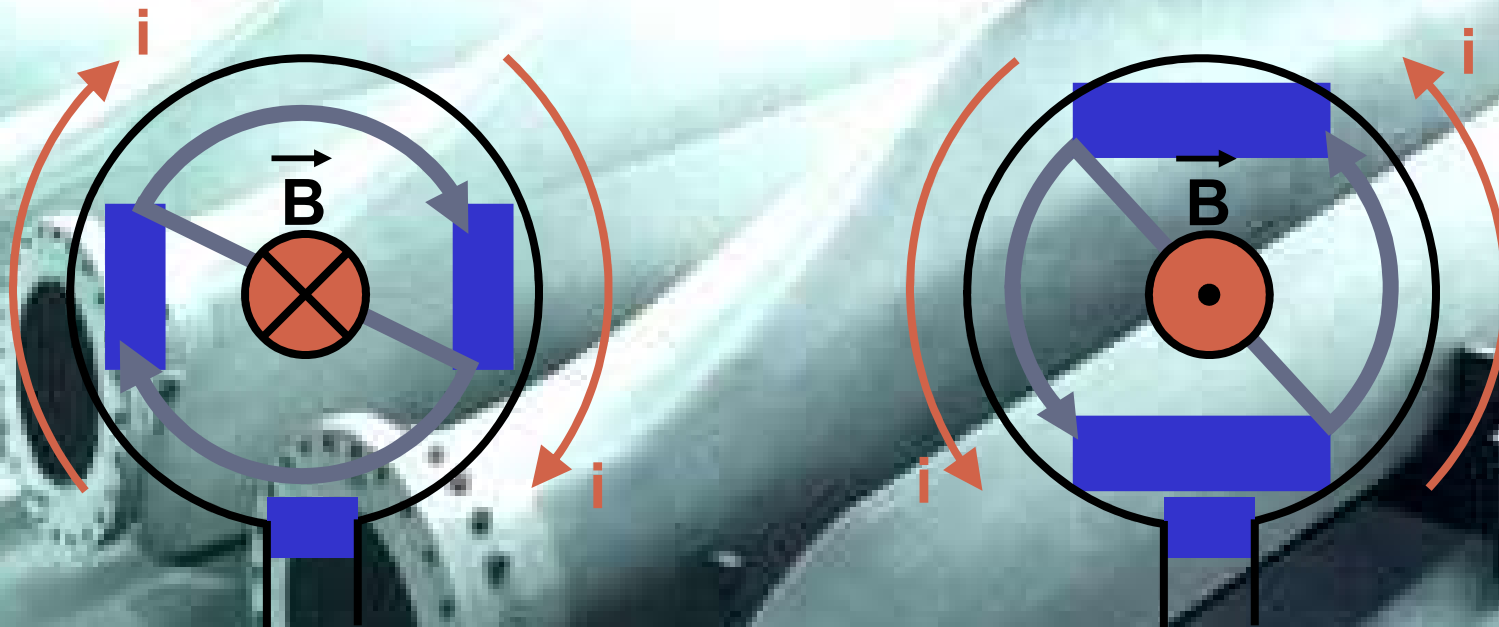
Módulo do Vetor B



$$B = \frac{\mu \cdot i}{2 \cdot r}$$

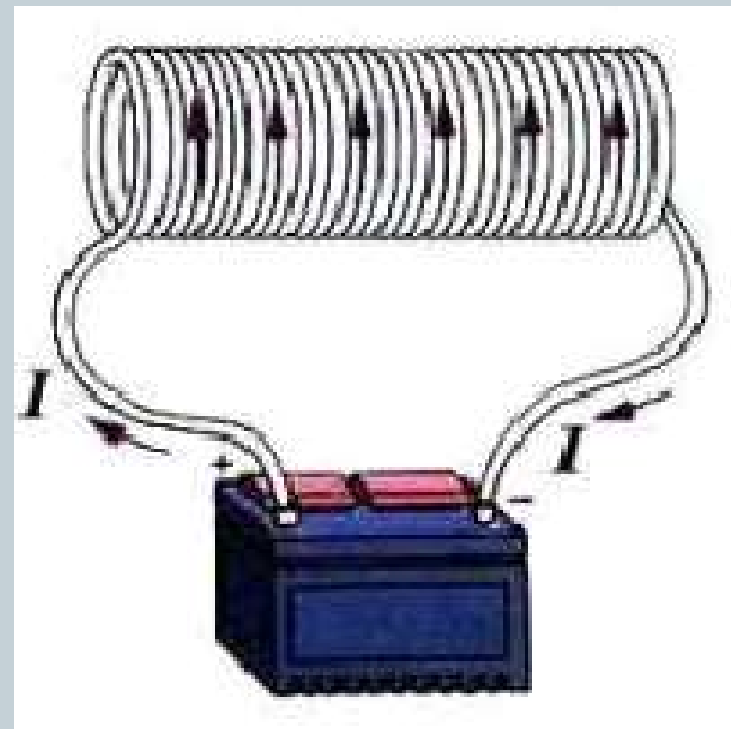
- $[B] = T$ (tesla)
- μ é a constante de permeabilidade magnética e no vácuo é $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T.m/A}$

Pólos de uma Espira

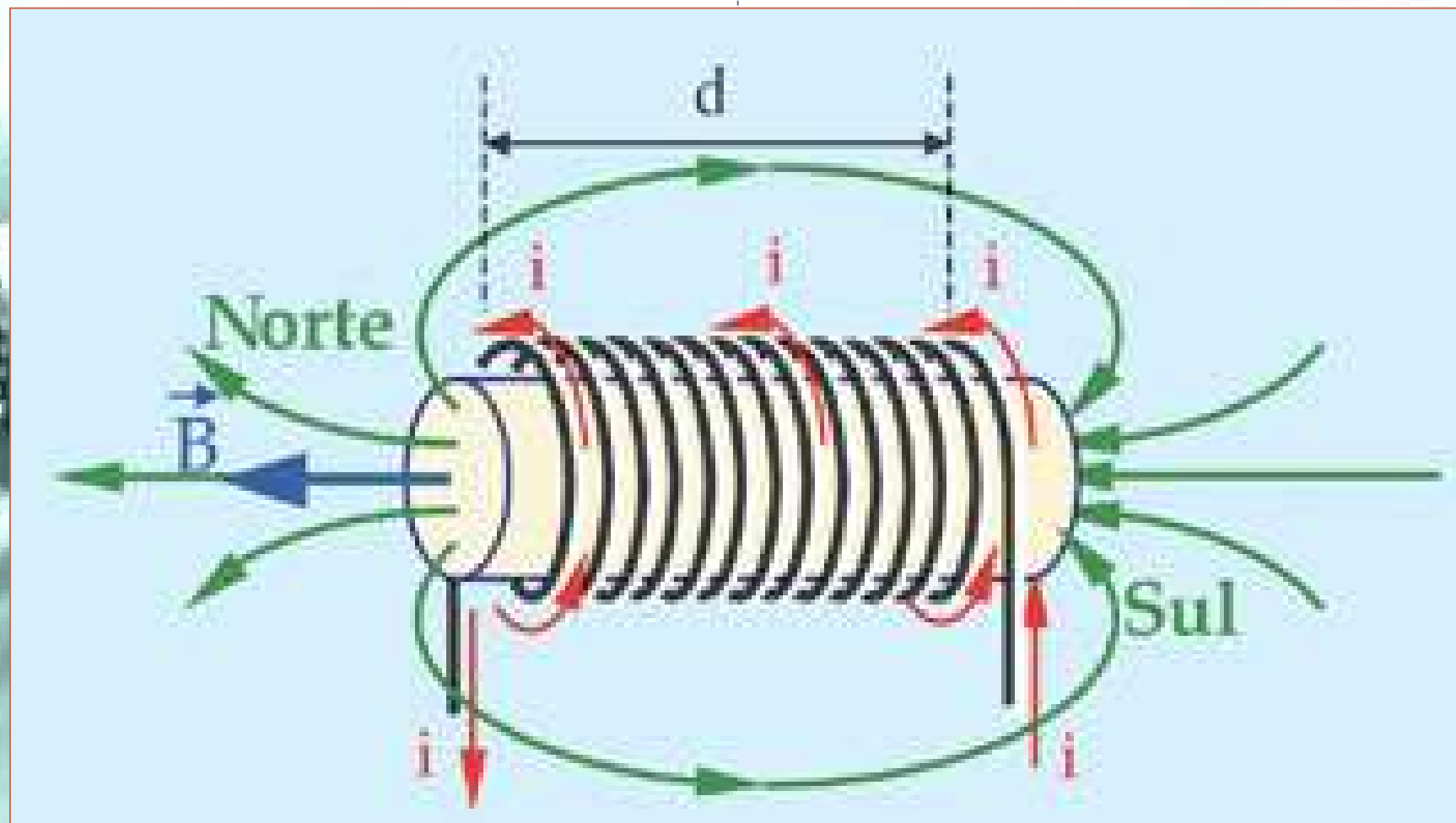


Campo Magnético no interior de um solenóide retilíneo

NO INTERIOR DE UM SOLENÓIDE RETILÍNEO PERCORRIDO POR UMA CORRENTE ELÉTRICA EXISTE UM CAMPO MAGNÉTICO UNIFORME.

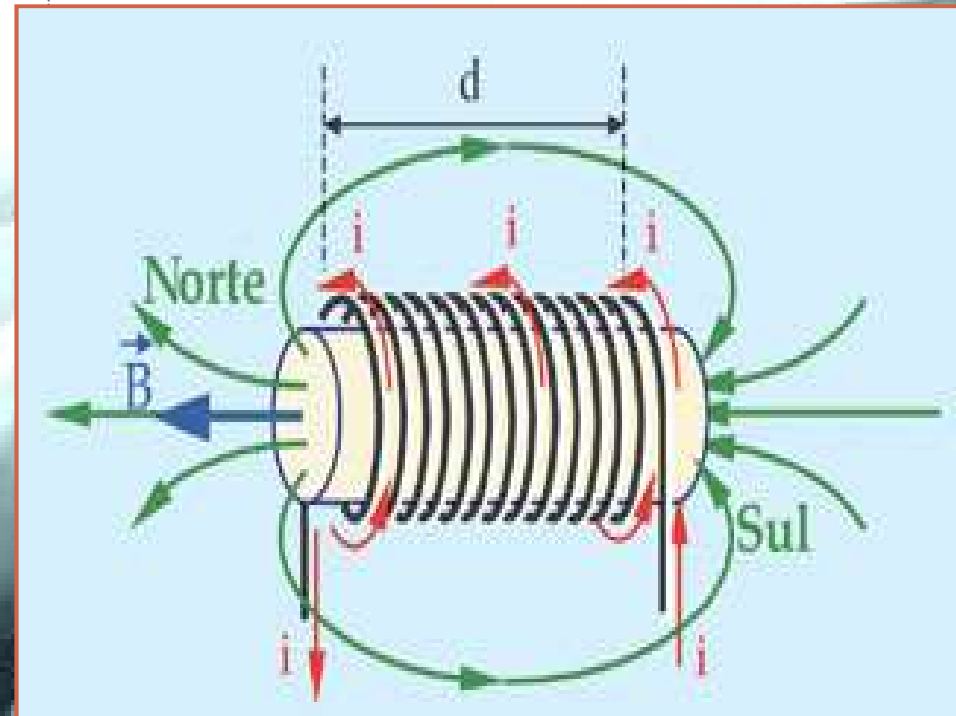


Linhas de Força



Direção e Sentido do Vetor B

O vetor B tem a mesma direção do eixo do solenóide e colocando a **mão direita** espalmada no solenóide, o polegar indicará o sentido do campo e o restante dos dedos indicará o sentido da corrente.



Módulo do Vetor B

$$B = \frac{\mu \cdot n \cdot i}{\ell}$$

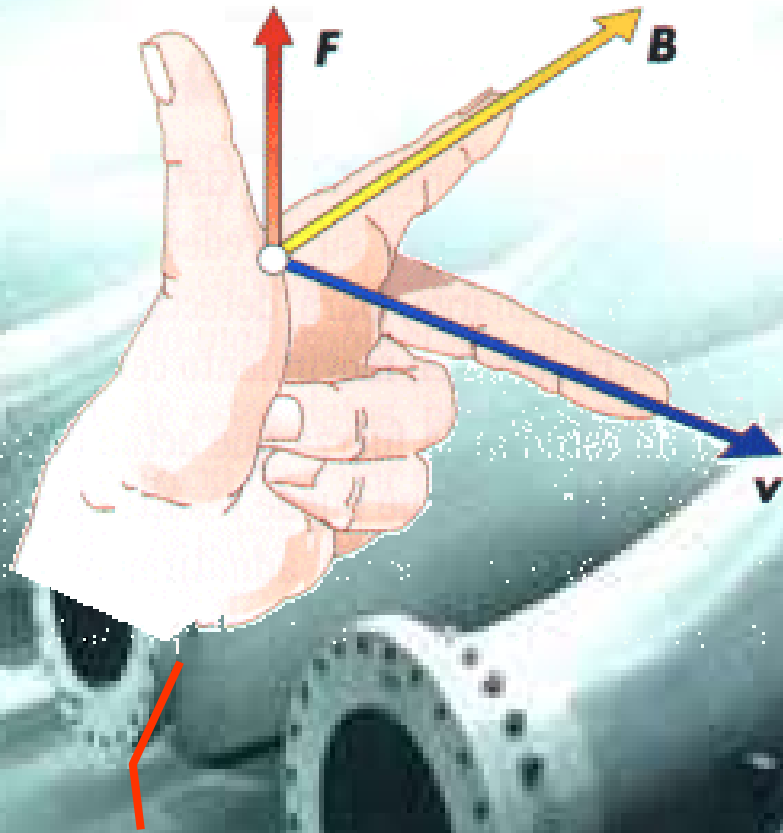
- μ é a constante de permeabilidade magnética
- i é a intensidade da corrente elétrica
- n é o número de espiras
- ℓ é o comprimento do solenóide

Força Magnética sobre cargas elétricas



SOBRE UMA CARGA ELÉTRICA EM MOVIMENTO NO INTERIOR DE UM CAMPO MAGNÉTICO, EXISTE UMA FORÇA MAGNÉTICA PERPENDICULAR AO PLANO QUE CONTÉM O VETOR VELOCIDADE (v) E O VETOR INDUÇÃO MAGNÉTICA (B).

Força Magnética



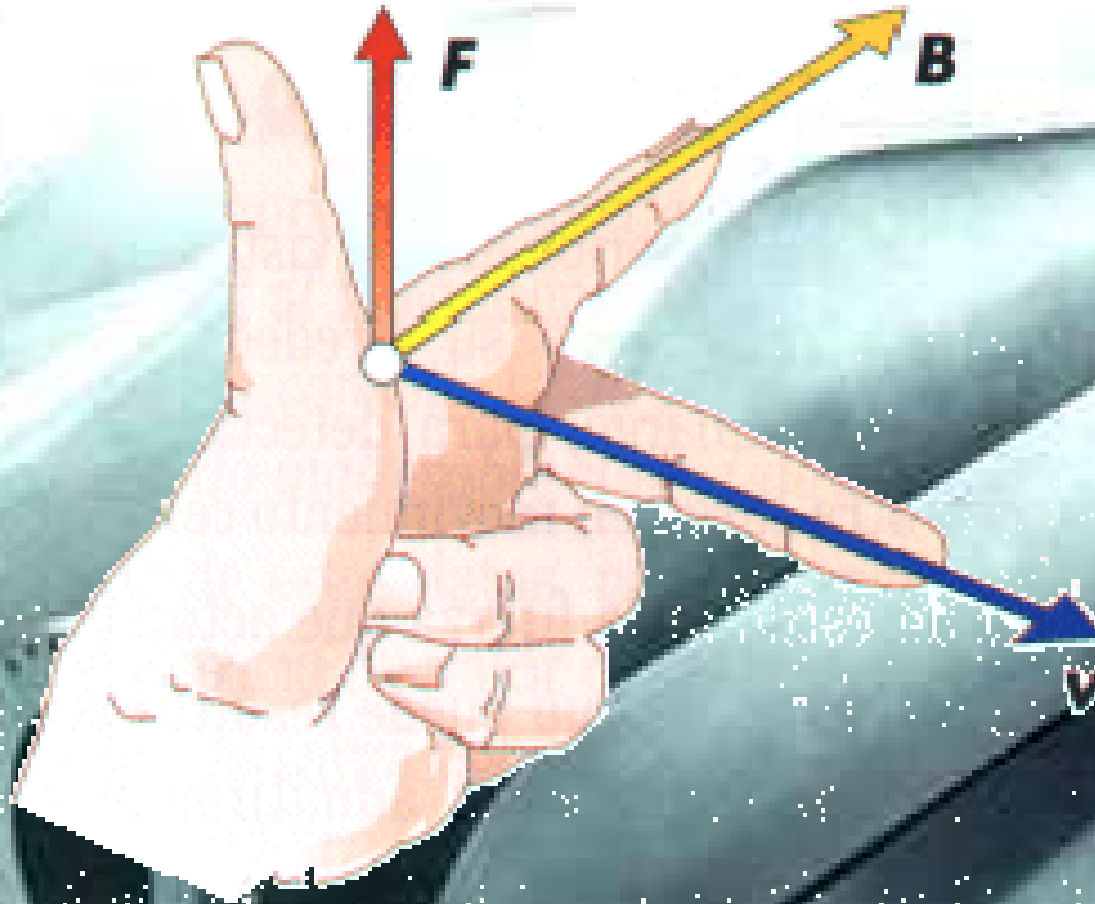
- A força magnética que atua sobre uma partícula é diretamente proporcional à carga e à velocidade da partícula.

$$\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B}$$

Regra da mão
esquerda

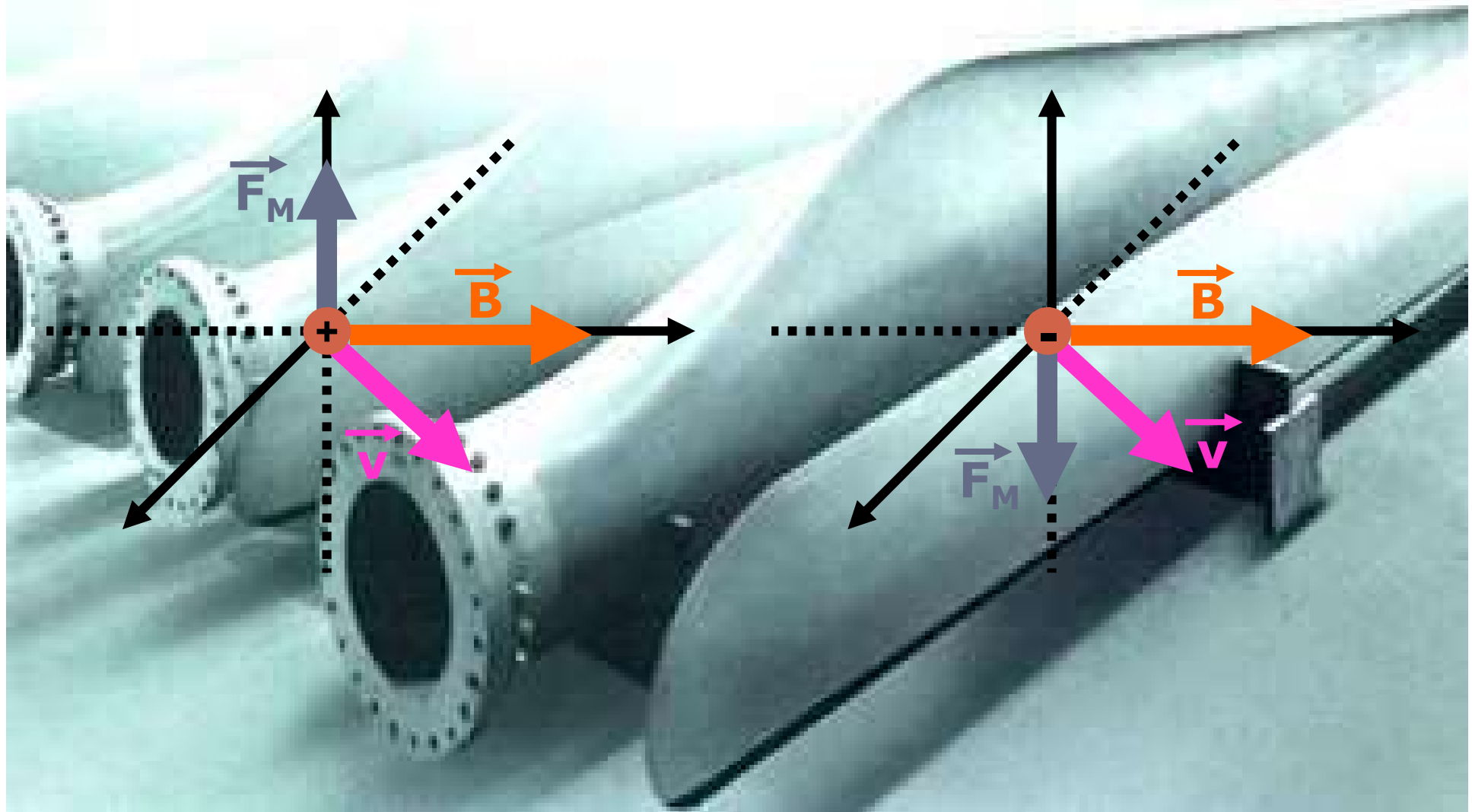
$$F_M = |q|.v.B.\text{sen } \theta$$

Regra da Mão Esquerda

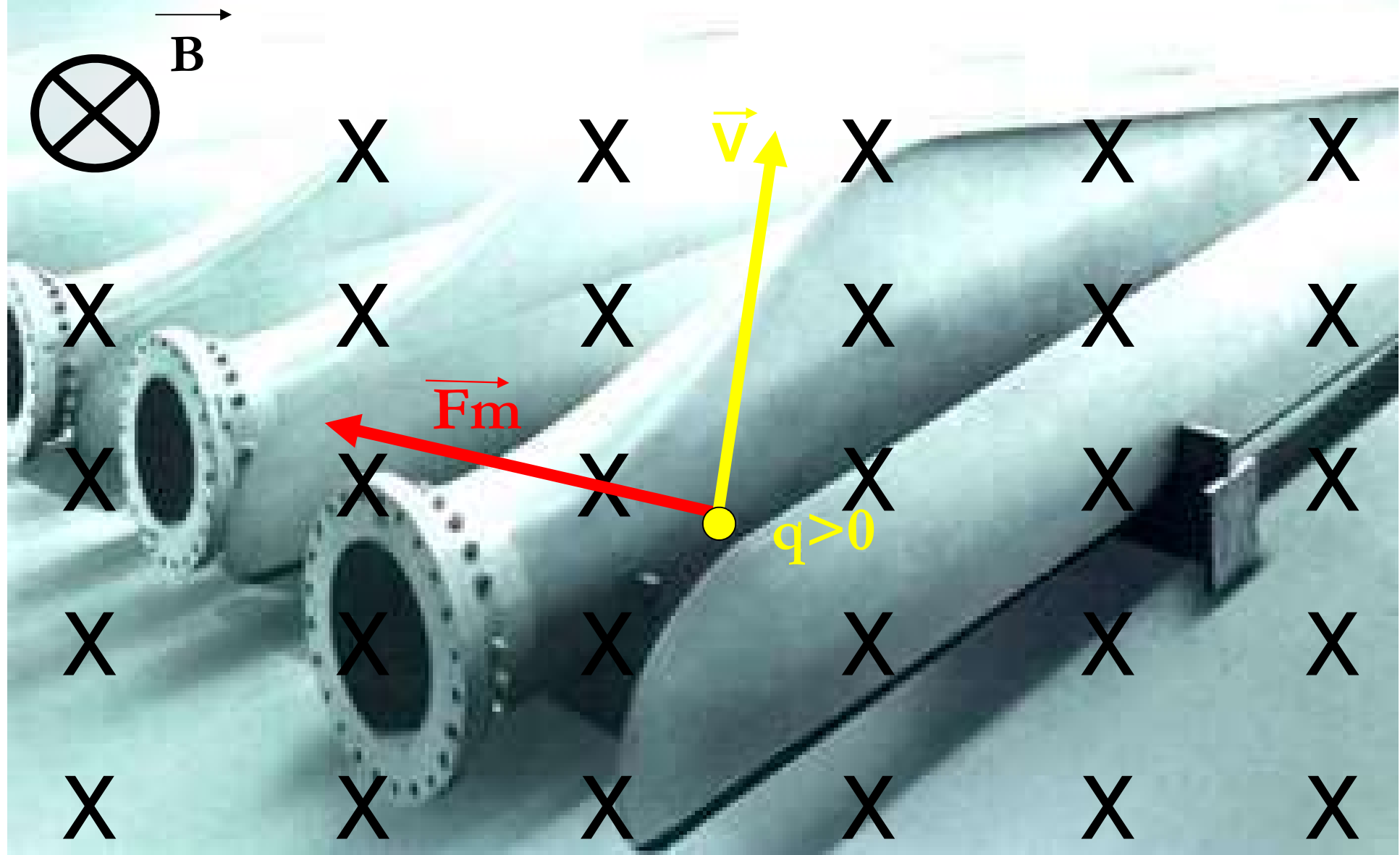


Obs: Quando $q < 0$, inverte-se o sentido da força magnética.

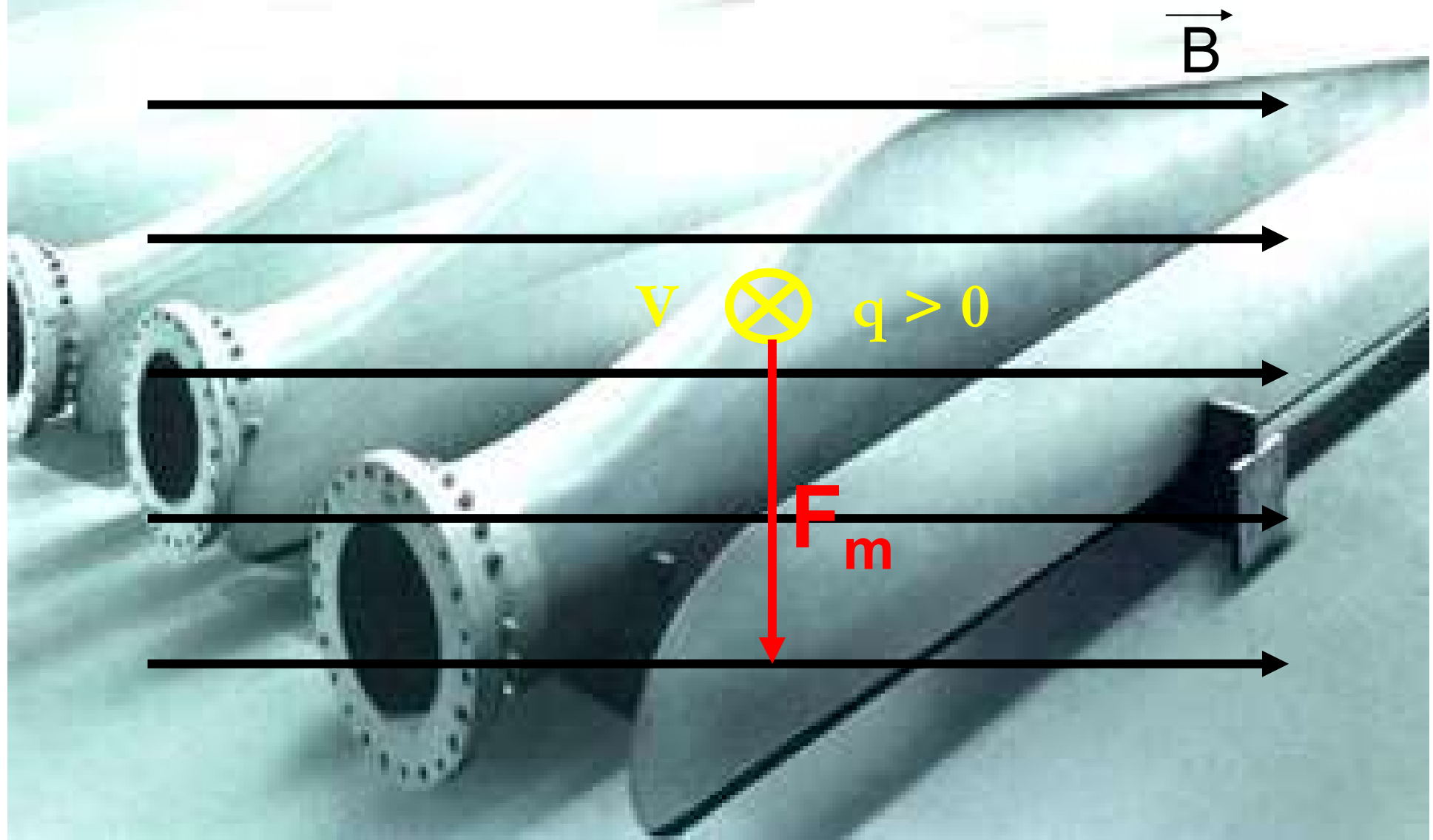
Representação Vetorial



Exemplo



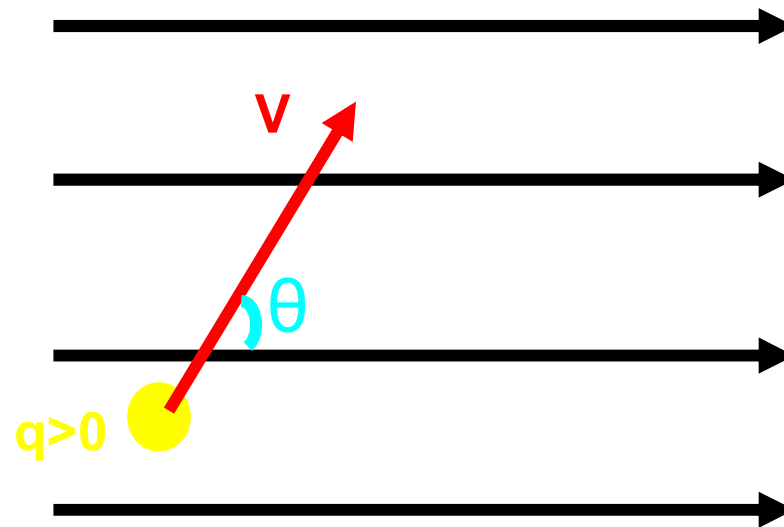
Exemplo



Movimento de cargas elétricas no campo magnético:

Lembrar que :

$$F_m = |q| \cdot V \cdot B \cdot \text{Sen } \theta$$



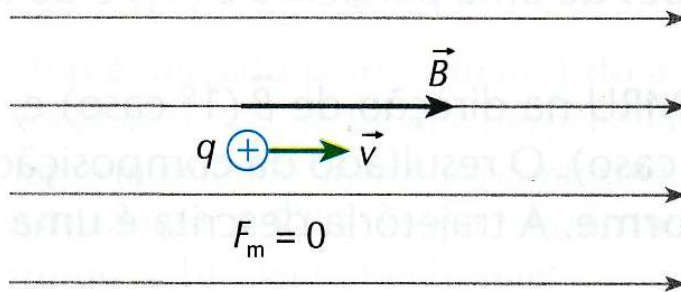
ANÁLISE DO MOVIMENTO

- $\theta = 0^\circ$ ou $\theta = 180^\circ$ (V e B com mesma direção):

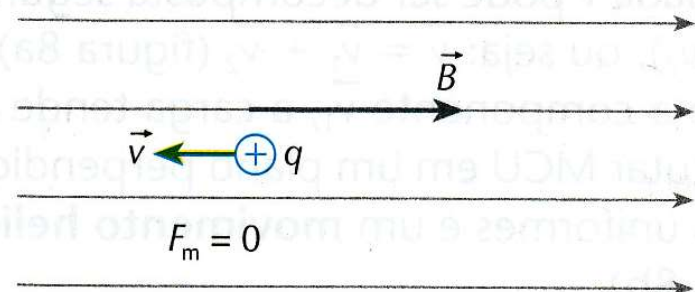
Como $\sin 0^\circ = \sin 180^\circ = 0 \rightarrow \boxed{F_m = 0}$

Se $\boxed{F_m = 0 \rightarrow R = 0 \rightarrow a = 0 \rightarrow V = \text{Cte}}$

M.R.U.



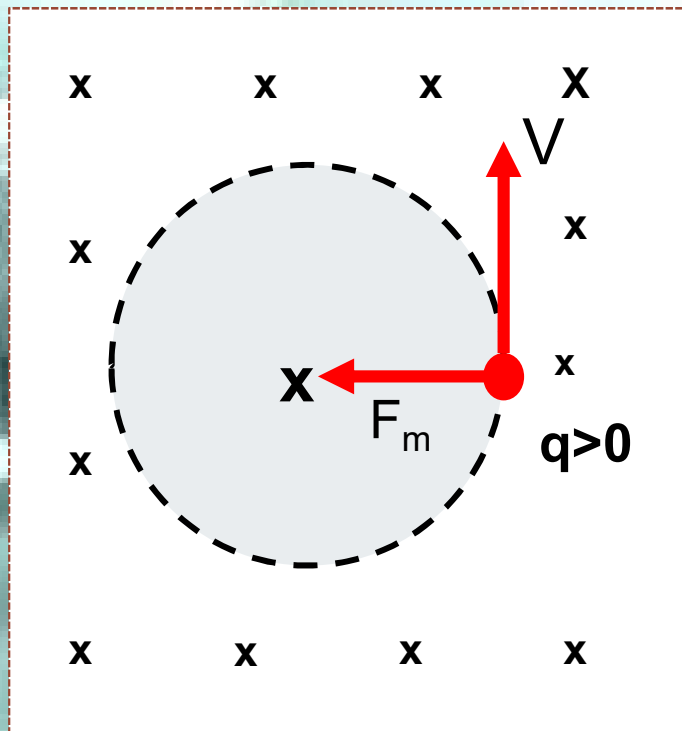
(a) $\theta = 0^\circ$



(b) $\theta = 180^\circ$

- $\theta = 90^\circ$ (V perpendicular a B)

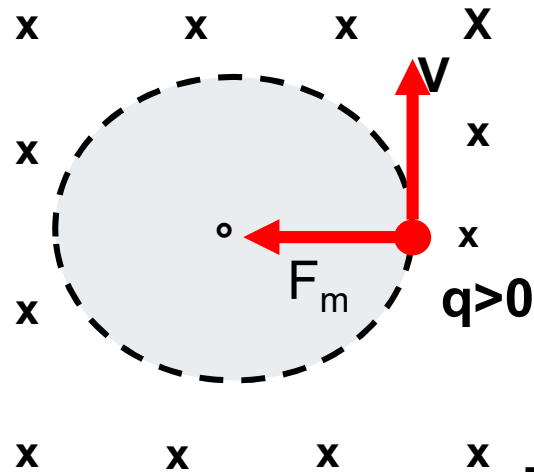
Como $\text{Sen } 90^\circ = 1 \rightarrow F_m = q \cdot V \cdot B$ e seu sentido é perpendicular a V : **Movimento Circular Uniforme**



Como o movimento é um M.C.U. então

$$\vec{F}_m = \vec{R}_{cp}$$

- $\theta = 90^\circ$ (V perpendicular a B)



$$F_m = R_{cp}$$

$$q \cdot \mathbf{v} \cdot \mathbf{B} = m \cdot \frac{v^2}{R}$$

ou

$$F_m = R_{cp}$$

$$q \cdot v \cdot B = m \cdot \omega^2 \cdot R$$

$$q \cdot \omega \cdot R \cdot B = m \cdot \omega^2 \cdot R$$

$$q \cdot B = m \cdot \omega$$

$$q \cdot B = m \cdot \frac{2\pi}{T}$$

$$R = \frac{m \cdot v}{q \cdot B}$$

Raio do movimento

$$T = \frac{2\pi \cdot m}{q \cdot B}$$

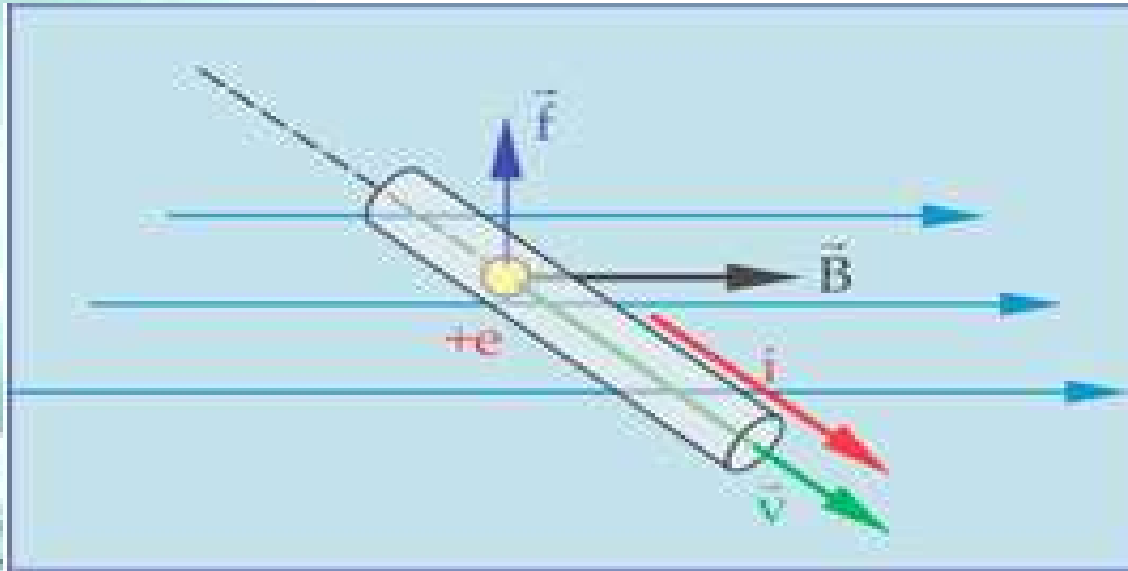
Período do movimento

Força Magnética sobre fio condutores



SOBRE UM FIO CONDUTOR PERCORRIDO POR CORRENTE NO INTERIOR DE UM CAMPO MAGNÉTICO, EXISTE UMA FORÇA MAGNÉTICA PERPENDICULAR AO PLANO QUE CONTÉM O FIO E O VETOR INDUÇÃO MAGNÉTICA (B).

Origem da força

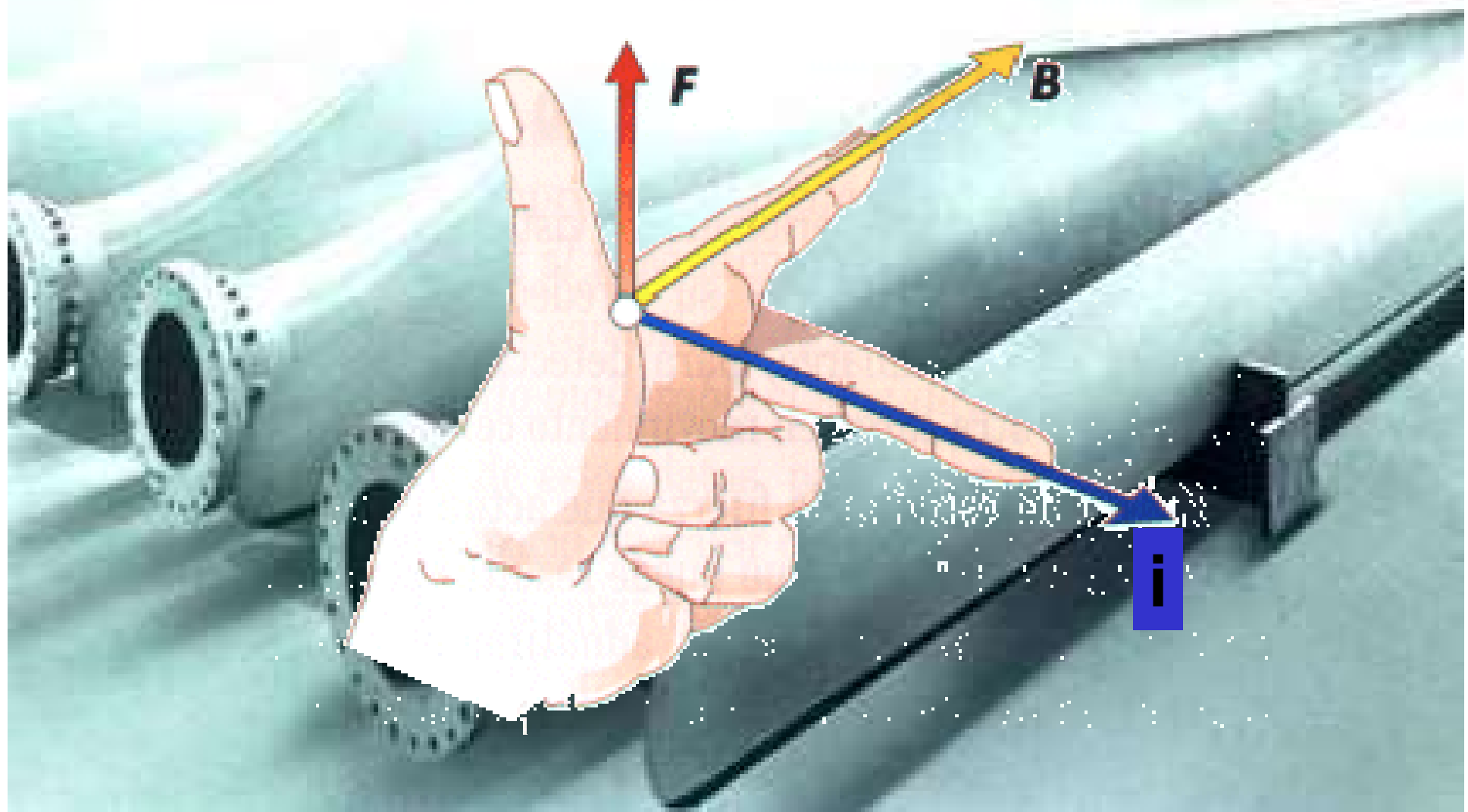


$$\vec{F}_B = i\vec{L} \times \vec{B}$$

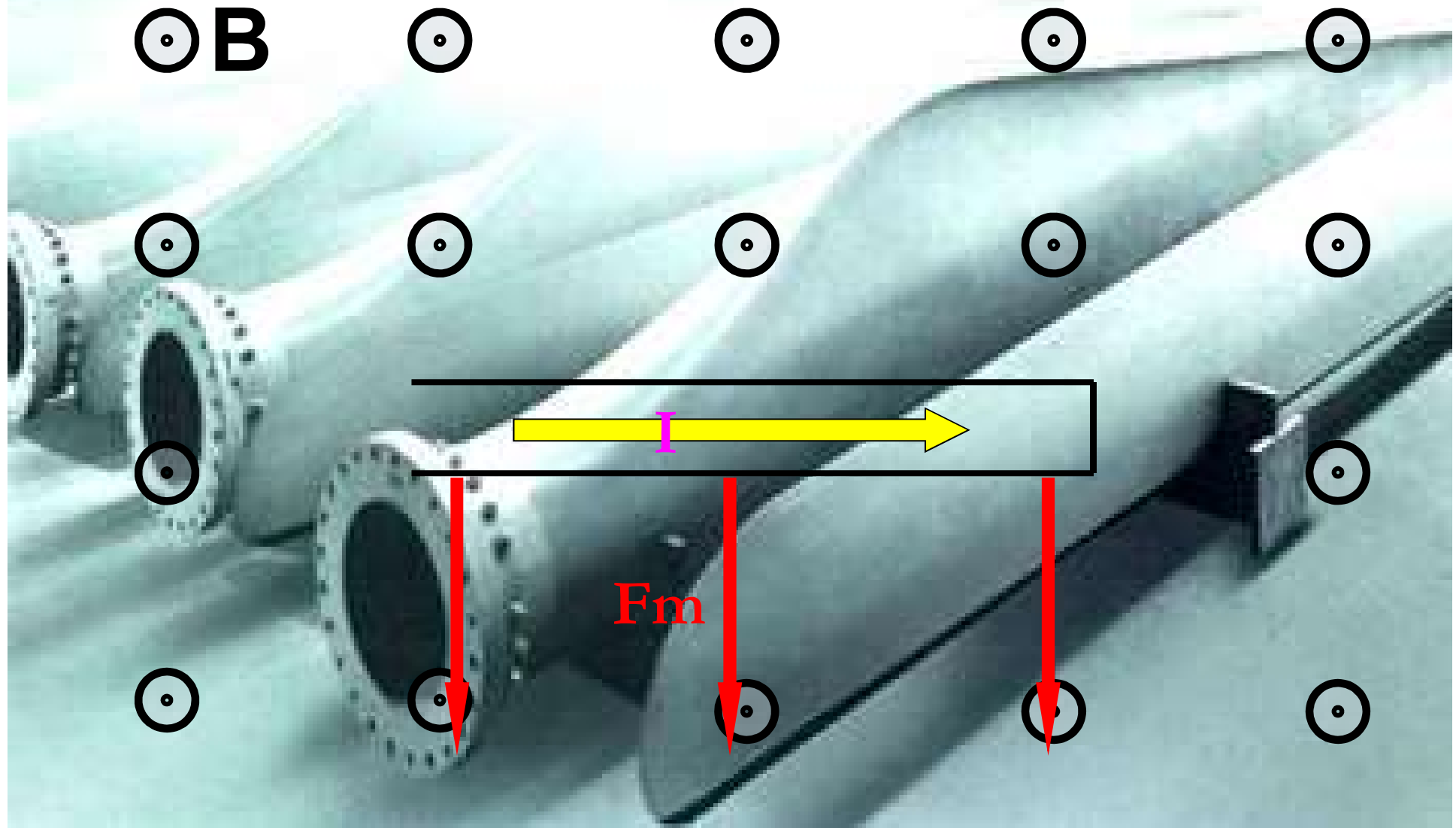
$$F_M = B.i.l.\sin\theta$$

Sobre cada elétron em movimento no fio haverá uma força magnética perpendicular ao fio cujo sentido é definido pela regra da mão esquerda.

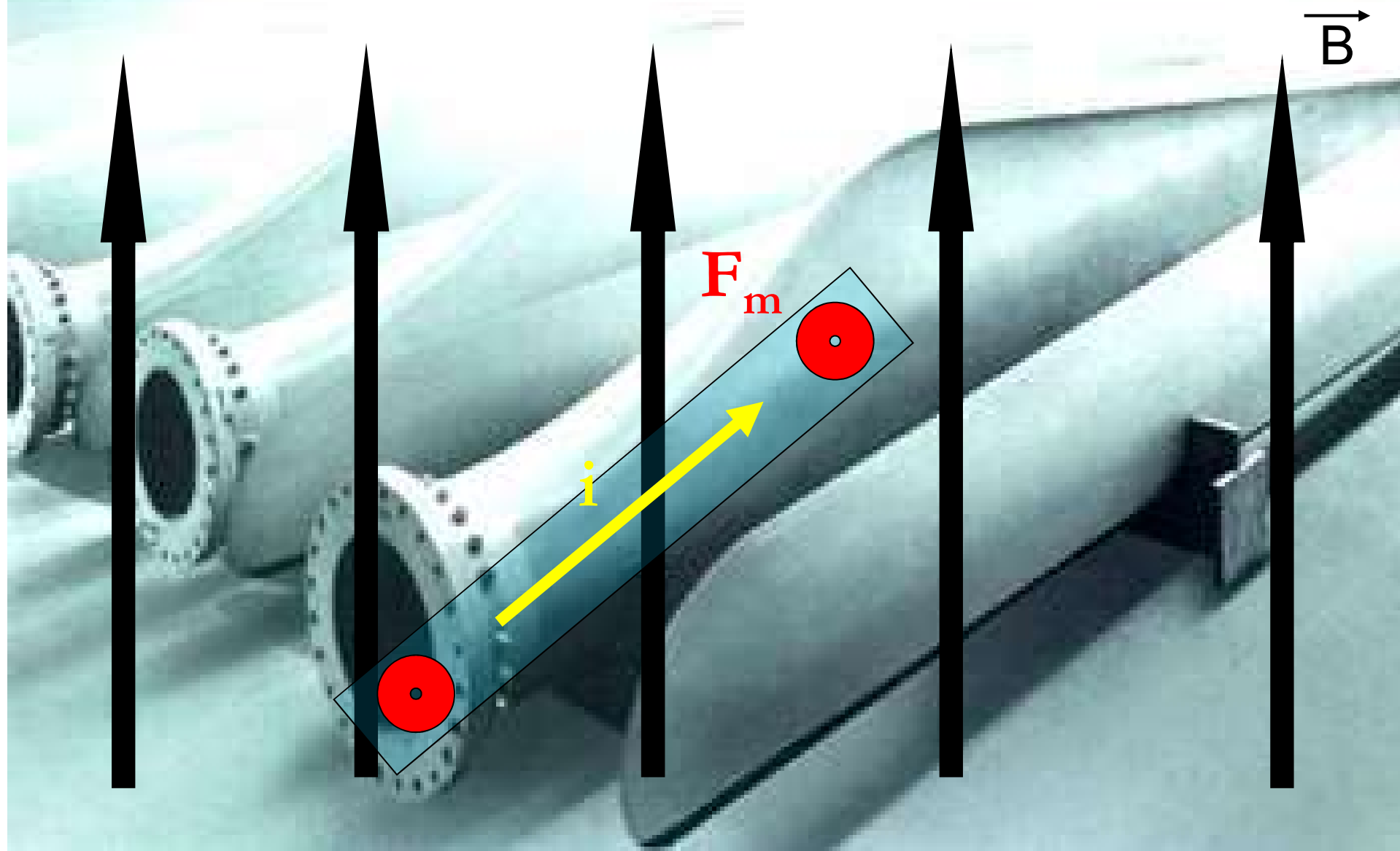
Regra da Mão Esquerda



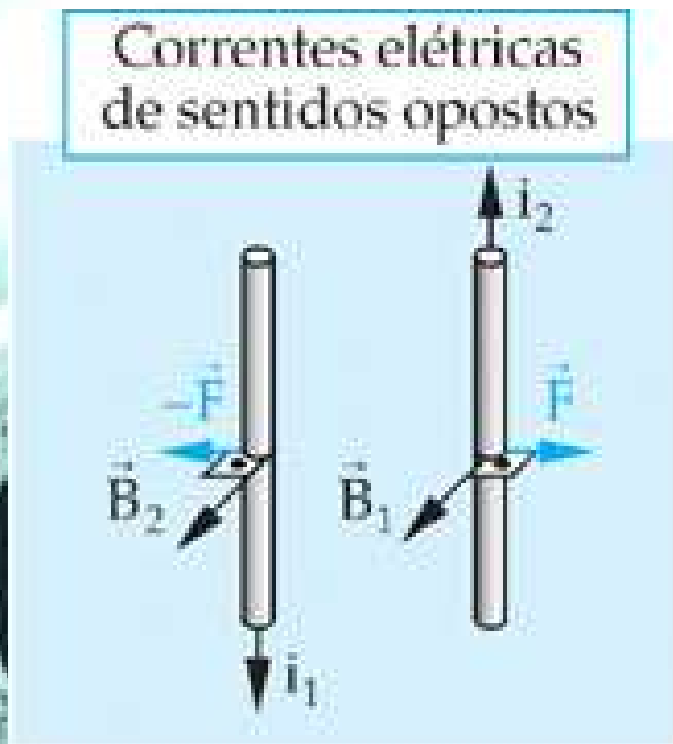
Exemplo



Exemplo



Força magnética entre fios



- Direção: Perpendicular aos fios
- Sentido: Atração (correntes de mesmo sentido)
Repulsão (correntes de sentidos opostos)

Força magnética entre fios

$$F_{1,2} = B_1 \cdot i_2 \cdot l$$

$$F_{1,2} = \frac{\mu \cdot i_1}{2 \cdot \pi \cdot d} \cdot i_2 \cdot l$$

$$F_{1,2} = \frac{\mu \cdot i_1 \cdot i_2 \cdot l}{2 \cdot \pi \cdot d}$$

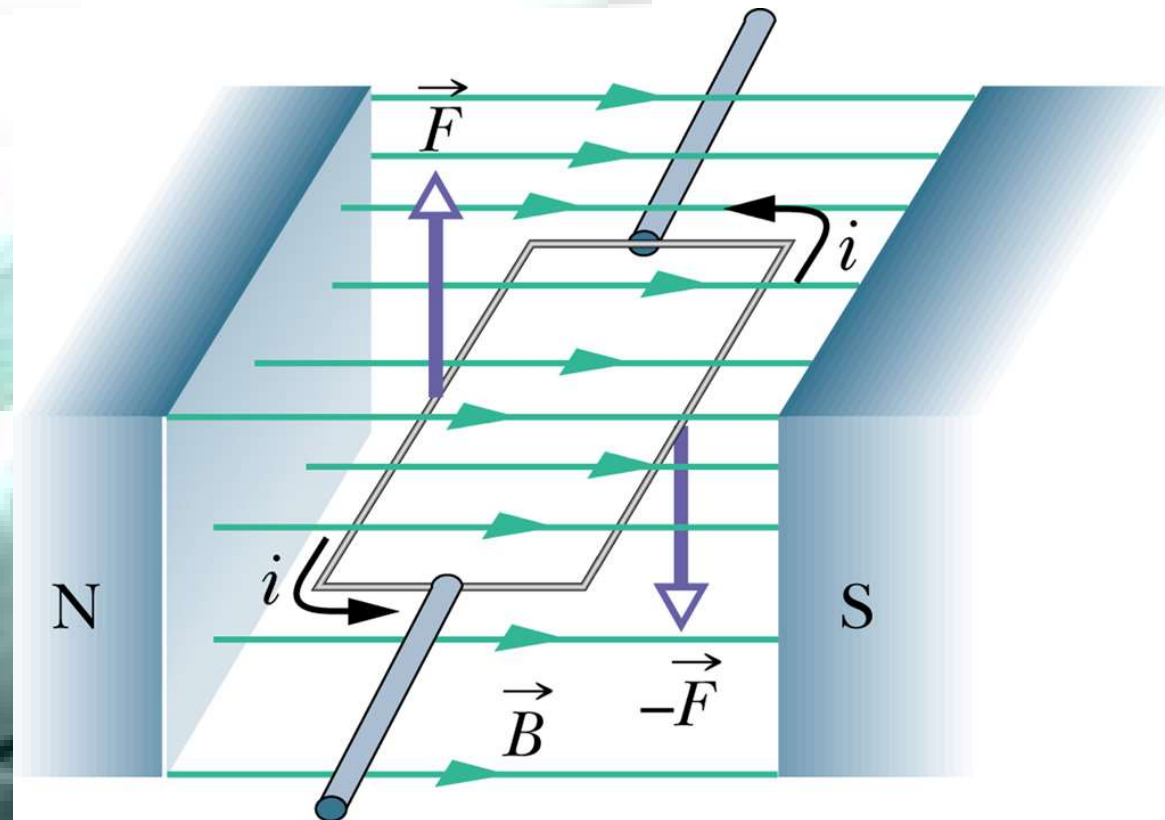
$$F_{2,1} = B_2 \cdot i_1 \cdot l$$

$$F_{2,1} = \frac{\mu \cdot i_2}{2 \cdot \pi \cdot d} \cdot i_1 \cdot l$$

$$F_{2,1} = \frac{\mu \cdot i_2 \cdot i_1 \cdot l}{2 \cdot \pi \cdot d}$$

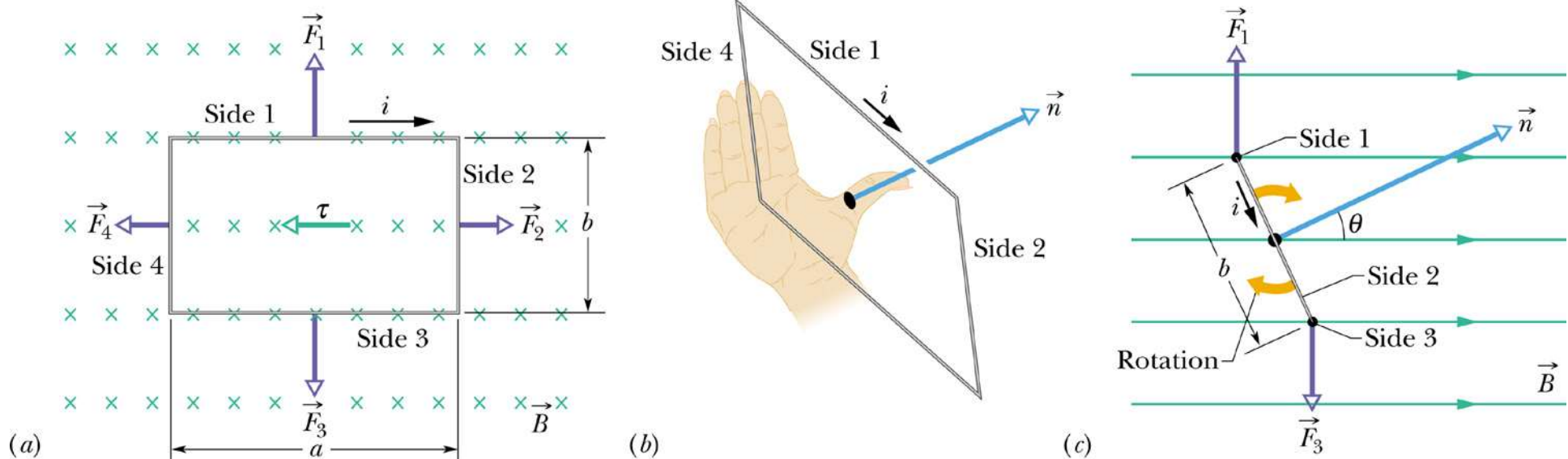
$$F_M = \frac{\mu \cdot i_1 \cdot i_2 \cdot l}{d}$$

Torque sobre uma espira percorrida por uma corrente



- As forças magnéticas produzem um torque sobre a espira, que tende a girar.

Torque sobre uma espira percorrida por uma corrente



$$\vec{F}_B = i\vec{L} \times \vec{B}$$



$$F = iaB$$

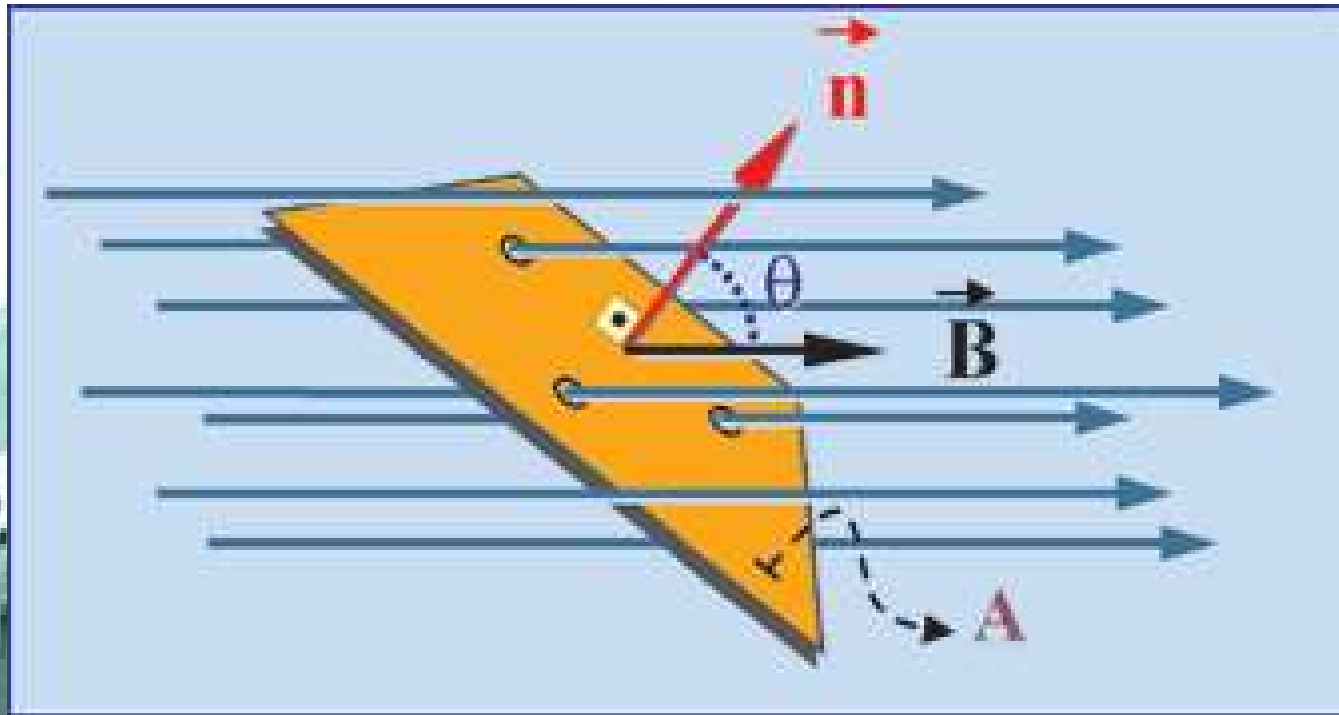
$$\tau = \left(iaB \frac{b}{2} \sin \theta \right) + \left(iaB \frac{b}{2} \sin \theta \right) = (iabB \sin \theta)$$

Indução Eletromagnética



- FLUXO MAGNÉTICO ATRAVÉS DE UMA ESPIRA
- INDUÇÃO MAGNÉTICA EM CIRCUITOS FECHADOS
- LEI DE LENZ

Fluxo Magnético Através de uma Espira



$$\Phi = \oint \vec{B} \cdot \hat{n} \cdot dA \text{ (weber)}$$

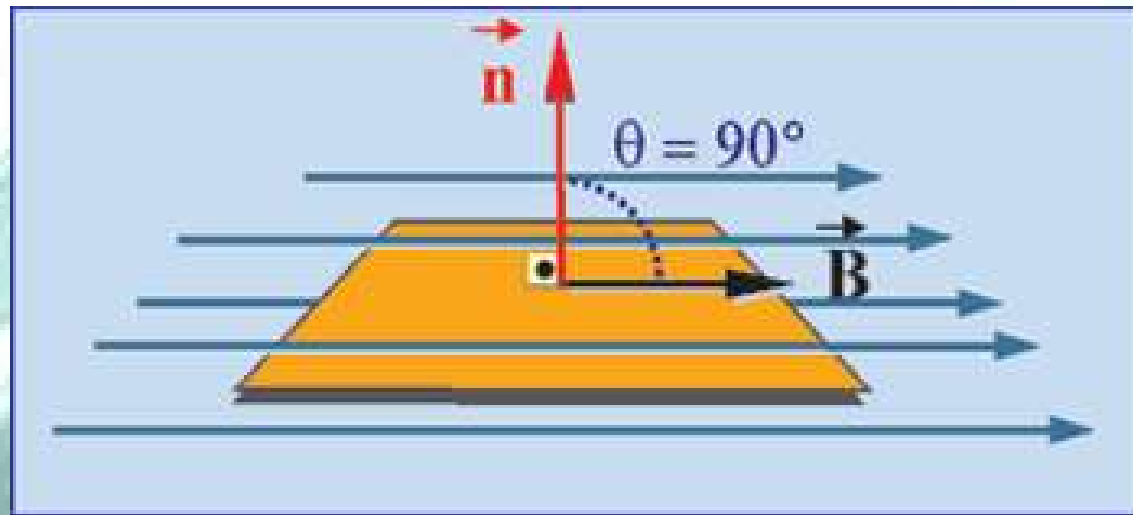
Fluxo Magnético Através de uma Espira

$$\Phi = B.A.\cos\theta$$

- Φ é o fluxo magnético através da espira
- B é o módulo do vetor campo magnético
- A é a área da espira
- θ é o ângulo entre o vetor campo magnético (B) e o vetor normal á espira (n)

Fluxo Magnético

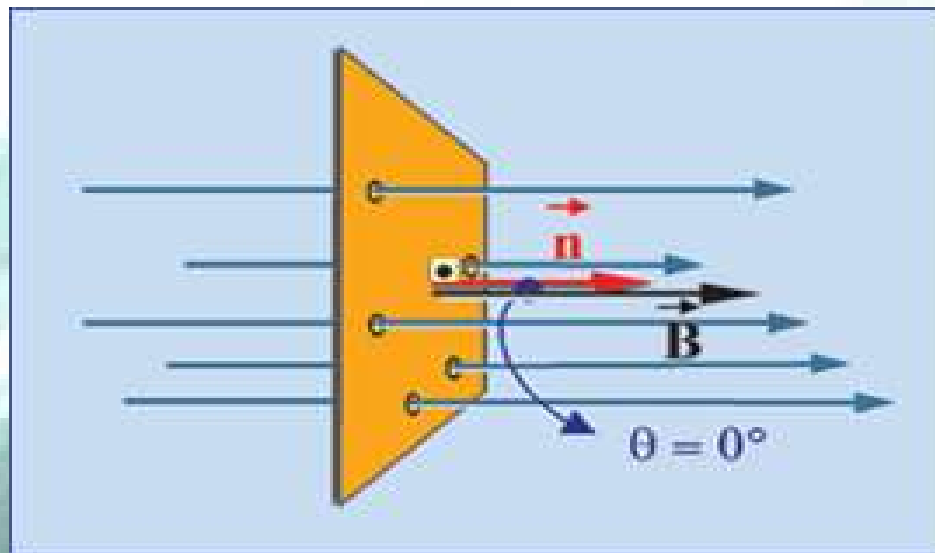
Caso Particular ($\theta=90^\circ$)



$$\Phi = nulo$$

Fluxo Magnético

Caso Particular ($\theta=0^\circ$)



$$\Phi = B.A$$

Fluxo Magnético

Unidades de Medida

$$[B] = \text{T (tesla)}$$

$$[A] = \text{m}^2$$

$$[\Phi] = \text{T} \cdot \text{m}^2 = \text{Wb (weber)}$$

Indução Eletromagnética em Circuitos Fechados

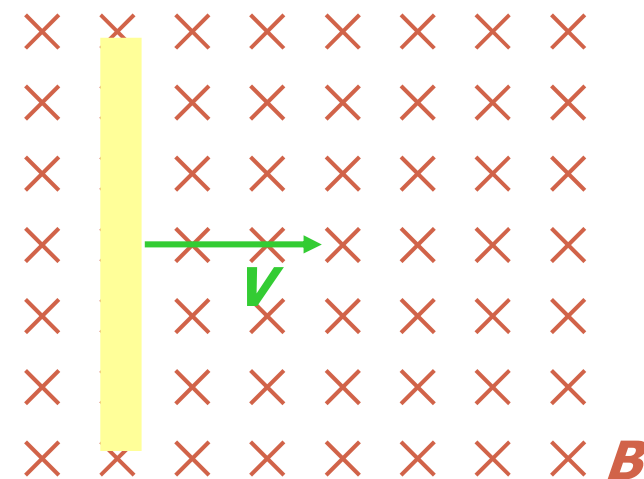
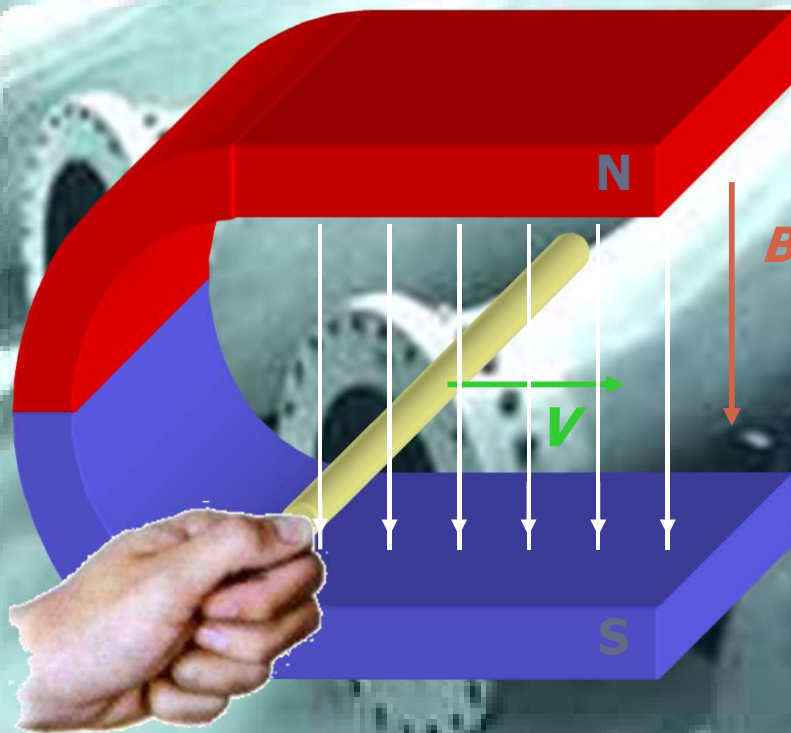
Se um circuito fechado é submetido a uma variação de fluxo magnético, haverá nele uma **corrente elétrica induzida**, cujo sentido e intensidade depende dessa variação do fluxo magnético.

Portanto:



Condutor em movimento dentro de um campo magnético

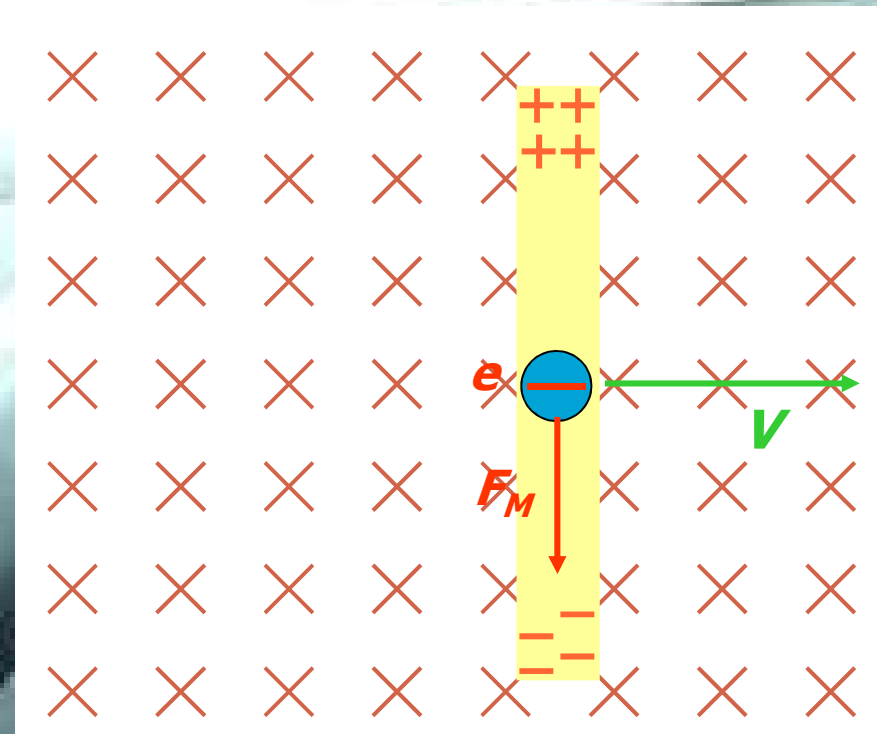
- Consideremos um condutor metálico, movimentando-se com velocidade V , perpendicularmente às linhas de indução de um campo magnético B .



Vista de Cima

Condutor em movimento dentro de um campo magnético

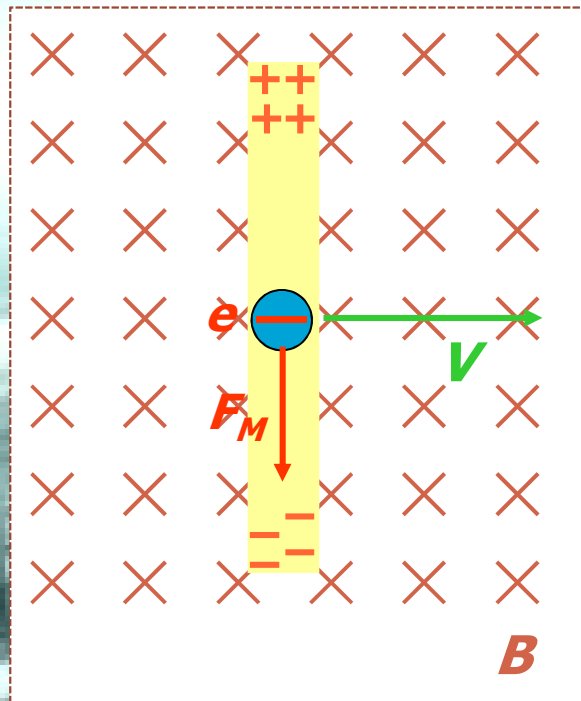
- Pelo mesmo
- Podemos então dizer que existe uma diferença de potencial entre as extremidades do condutor. A essa ddp damos o nome de força eletromotriz induzida (**e** ou **fem**).



B

Vista de Cima

Podemos fazer uma comparação



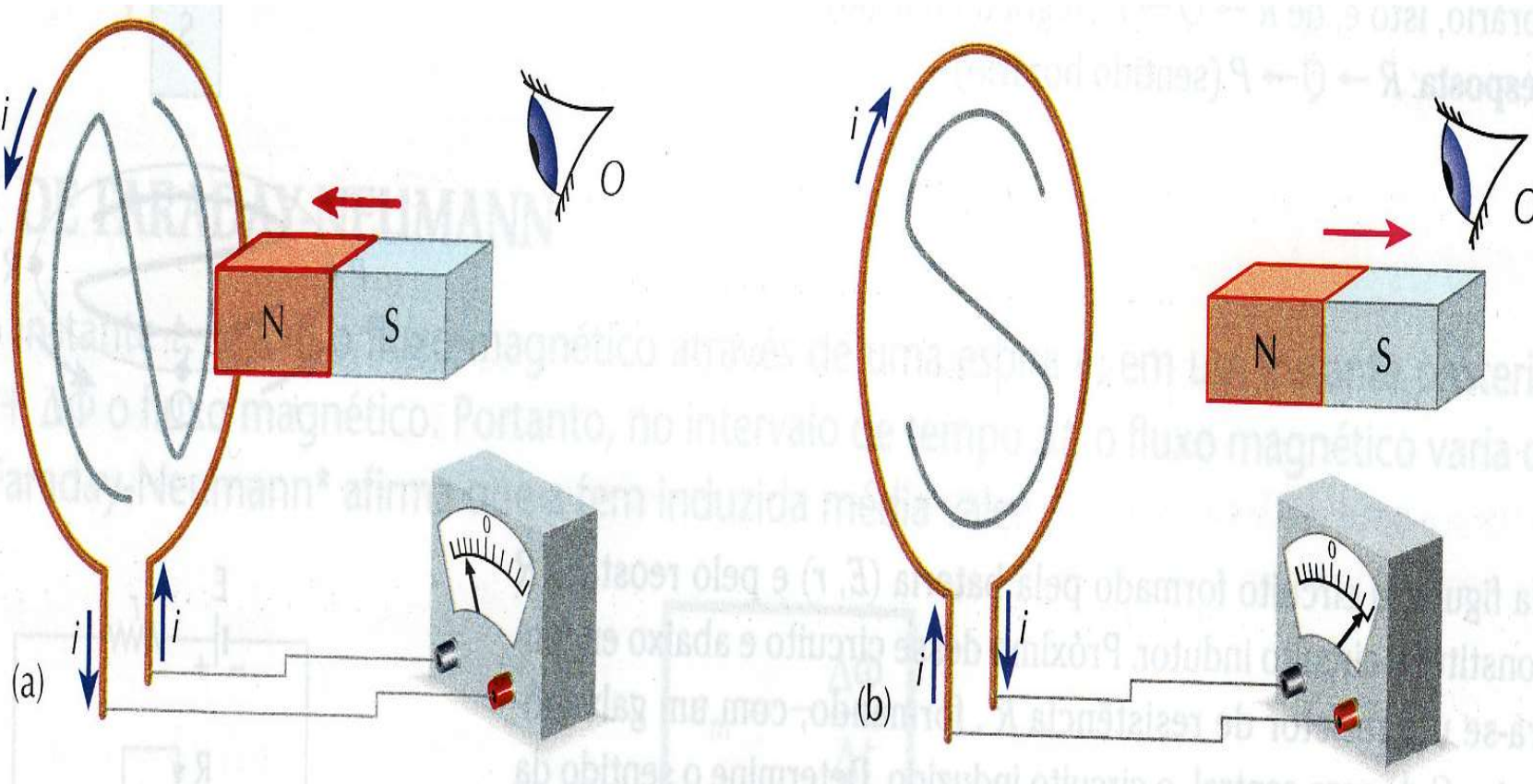
- Uma barra metálica sendo deslocada em um campo magnético é equivalente a uma pilha ou bateria.

Lei de Lenz

“Os efeitos da força eletromotriz induzida tendem a se opor às causas que lhe deram origem (princípio da ação e reação).”

“O sentido da corrente elétrica induzida é tal que se opõe à variação de fluxo que a produziu”

Lei de Lenz



Portanto: se aproximarmos ou afastarmos a espira, o movimento será sempre freado pela ação da corrente induzida.

Força Eletromotriz Induzida

Lei de Faraday e Lenz

Sempre que houver uma variação no fluxo haverá uma tensão induzida (ε_{ind}).

$$\varepsilon = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

- ε é a força eletromotriz induzida
- $\Delta\Phi$ é a variação fluxo magnético
- Δt é o intervalo de tempo

CONVERSÃO DE ENERGIA



Engenharia Elétrica



www.electroenge.com.br

Prof. Dr. Giuliano Pierre Estevam

TEORIA DE WEBER:

TODA SUBSTÂNCIA MAGNÉTICA É COMPOSTA POR IMÃS ELEMENTARES.

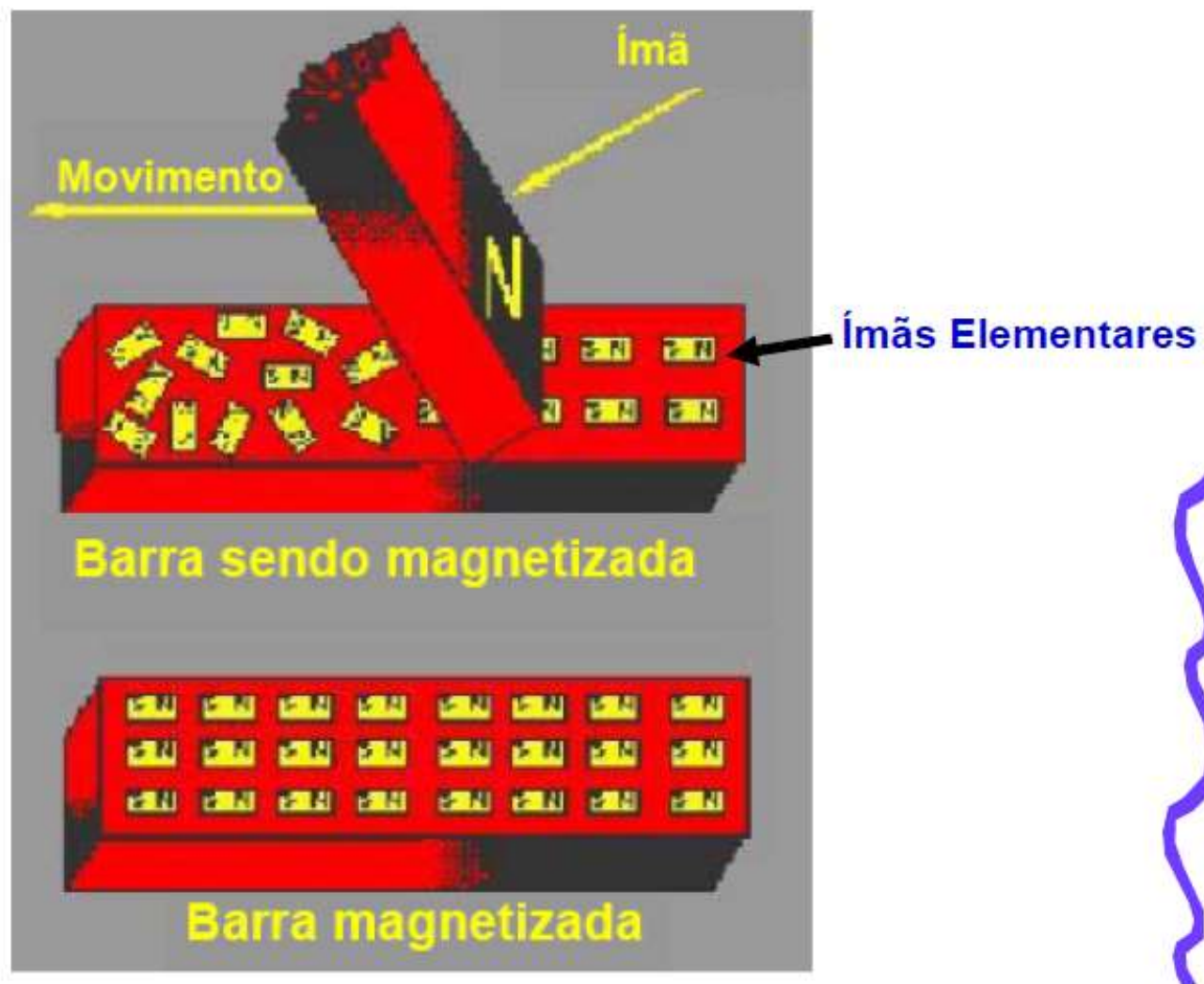
Um material apresenta propriedades magnéticas, quando há uma **predominância** de **imãs elementares orientados** sobre os **não orientados**. Assim, genericamente, pode-se dizer que:

- **Materiais Magnéticos:** são aqueles que **permitem** a **orientação** dos seus imãs elementares.

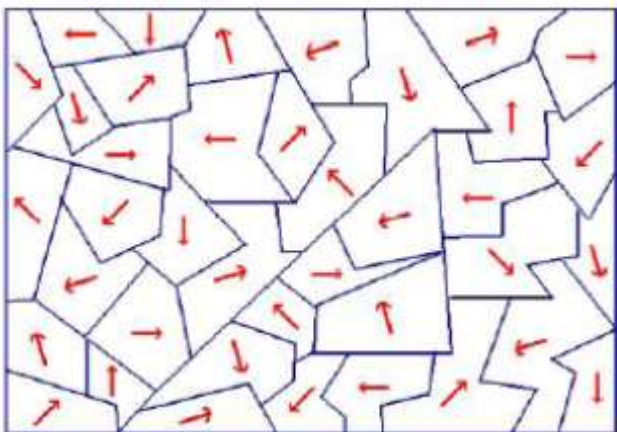
Exemplos: **ferro**, níquel e algumas ligas metálicas, como o aço.

- **Materiais Não-Magnéticos:** são aqueles que **não permitem** a orientação dos seus imãs elementares.

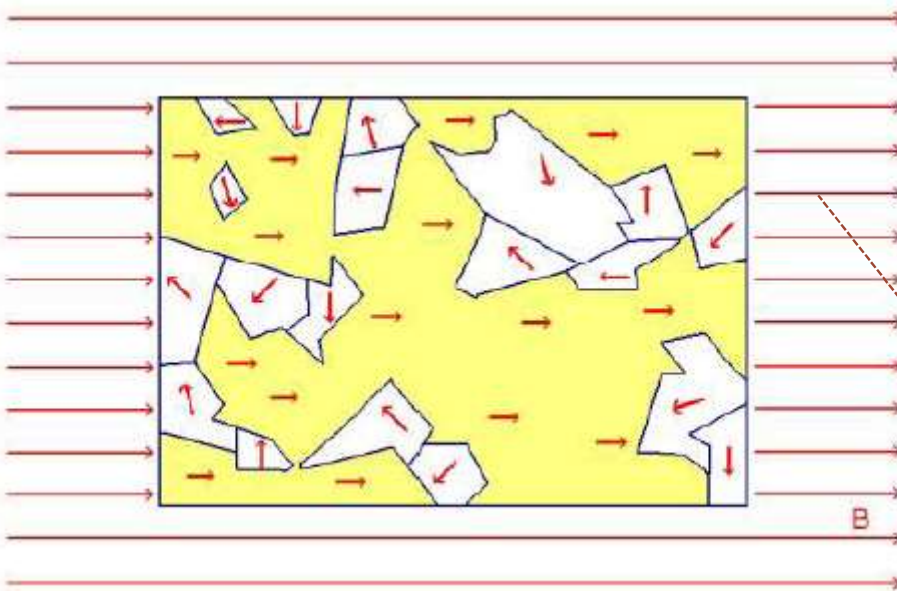
Exemplos: **alumínio**, madeira, plástico, entre outros.



TEORIA DOS DOMÍNIOS MAGNÉTICOS



DOMÍNIOS MAGNÉTICOS
DESALINHADOS



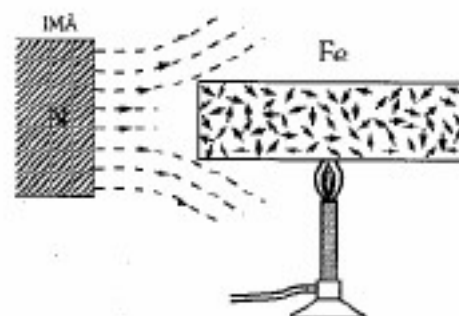
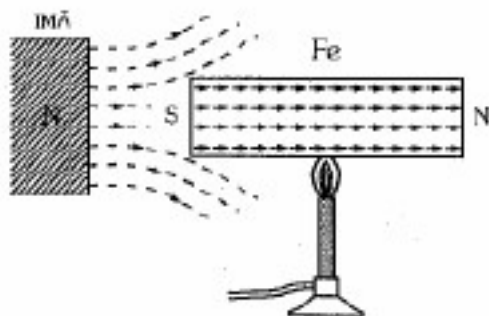
DOMÍNIOS MAGNÉTICOS
ALINHADOS DEVIDO A
AÇÃO DE UM CAMPO
MAGNÉTICO

Materiais Magneticamente Moles: ao afastar o ímã, os domínios magnéticos do ferro voltam a se **desorientar**. Exemplo: Ferro Puro (ferro doce ou *soft iron*).

Materiais Magneticamente Duros (ímãs permanentes): ao afastar o ímã, os domínios magnéticos do ferro permanecem **orientados**. Exemplo: Aço e Ferrite.

Um material pode **perder** suas propriedades magnéticas quando submetido a **choques mecânicos**.

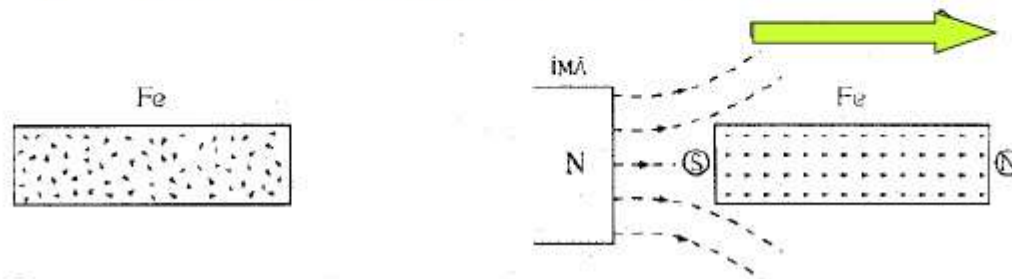
Ponto de Curie: **temperatura** na qual um ímã **perde** suas propriedades magnéticas. Ao abaixar a temperatura o mesmo pode voltar a ser um ímã.



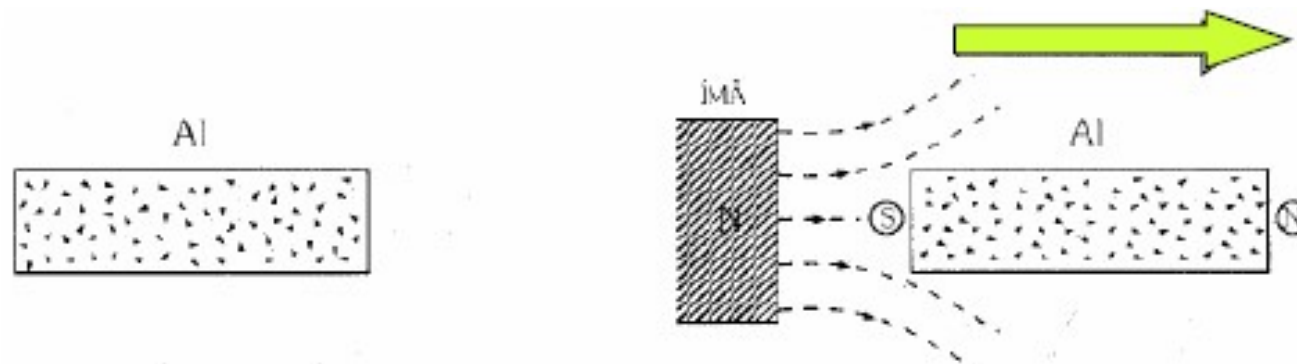
Ferro – 770°C
Cobalto – 1131°C
Níquel – 358°C

CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS

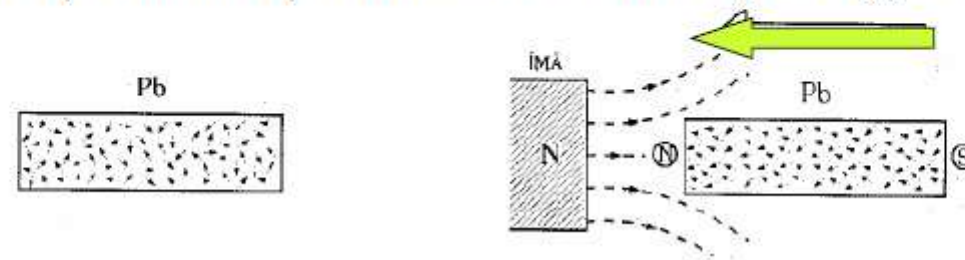
FERROMAGNÉTICO: Seus ímãs elementares sofrem **grande** influência do campo magnético indutor. São **fortemente atraídos** pelos ímãs. Exemplo: **ferro**, aços especiais, cobalto, níquel, e algumas ligas (alloys) como **Alnico** e Permalloy.



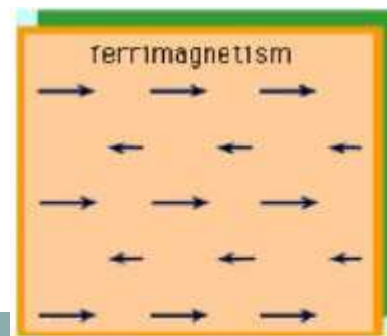
PARAMAGNÉTICO: Seus ímãs elementares sofrem **pequena** influência do campo magnético indutor. São **fracamente atraídos** pelos ímãs. Exemplo: **alumínio**, sódio, manganês, estanho, cromo, platina, paládio, oxigênio líquido, sódio, etc.



DIAMAGNÉTICO: Seus ímãs elementares sofrem **pequena** influência do campo magnético indutor. São **fracamente repelidos** pelos ímãs. Exemplo: **cobre**, água, mercúrio, **ouro**, prata, bismuto, antimônio, zinco, chumbo, Cloreto de Sódio (NaCl), etc.

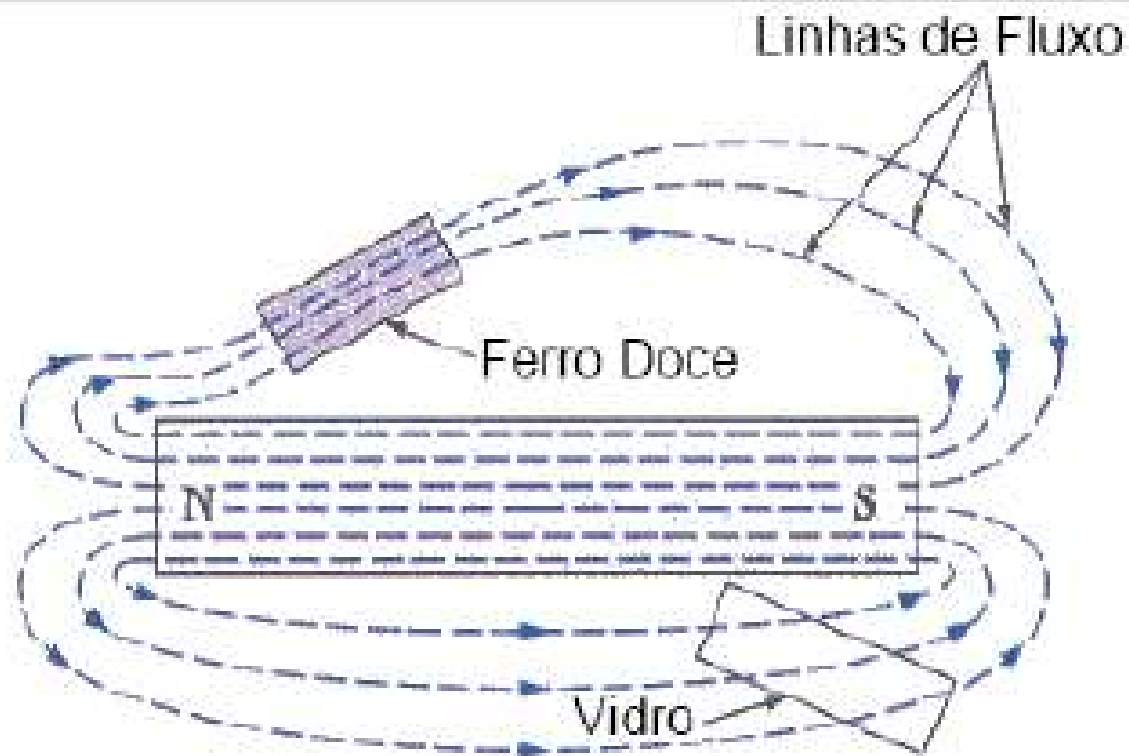


FERRIMAGNÉTICO: São semelhantes aos **ferromagnéticos**. Possuem alinhamento em anti-paralelo, porém a magnetização resultante não é nula. A força resultante é **menor** do que nos materiais ferromagnéticos. Exemplo: Óxidos magnéticos como a **Ferrite**.



PERMEABILIDADE MAGNÉTICA

A Permeabilidade Magnética de um material é uma medida da **facilidade** com que as **linhas** de **campo** podem **atravessar** um dado **material**. É um conceito **similar** a **Resistividade Elétrica**.



A **permeabilidade magnética no vácuo**, μ_o , vale:

$$\mu_o = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{Wb}{A \cdot m}$$

A unidade de permeabilidade também pode ser expressa por **Tesla-metro por Ampère, Tm/A** ou ainda, **Henry por metro, H/m**.

A propriedade de um material pela qual ele **muda** a **indução** de um **campo magnético**, em **relação** ao seu valor no **vácuo**, é chamada Permeabilidade Magnética **Relativa** (μ_R):

$$\mu_r = \frac{\mu_m}{\mu_o}$$

onde:

μ_r - permeabilidade relativa de um material (adimensional)

μ_m - permeabilidade de um dado material

μ_o - permeabilidade do vácuo

Tabela 6.1 - Materiais quanto à Permeabilidade Relativa

Permeabilidade Relativa, μ_R	Tipo de Material
$\gg 1$	Ferromagnéticos
$\cong 1$	Paramagnéticos
< 1	Diamagnéticos

Tabela 6.2 - Permeabilidade Relativa de Materiais Ferromagnéticos

Tipo de Material	Permeabilidade Relativa, μ_R
Ferro Comercial	9.000
Ferro Purificado	200.000
Ferro Silício	55.000
Permalloy	1×10^6
Supermalloy	1×10^7
Permendur	5.000
Ferrite	2.000

RELUTÂNCIA MAGNÉTICA

A **relutância magnética** é uma **medida** da **oposição** que um **meio** oferece ao **estabelecimento** e **concentração** das **linhas** de campo magnético. É análoga a **resistência elétrica**.

$$\mathfrak{R} = \frac{\ell}{\mu \cdot A}$$

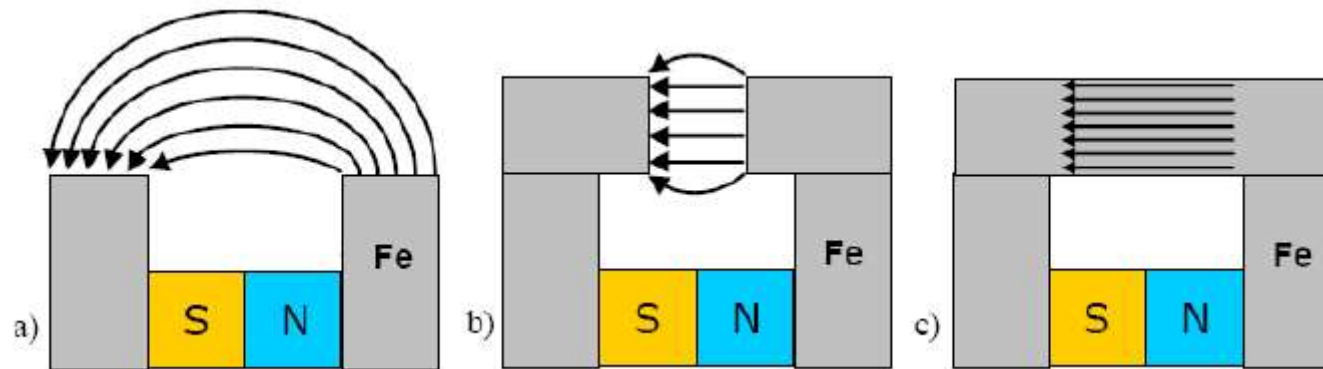
$\mathfrak{R}$ - relutância magnética, *re/s* ou Ae/Wb (Ampéres-espiras⁵ por Weber);

ℓ - comprimento médio do caminho magnético das linhas de campo no meio, m;

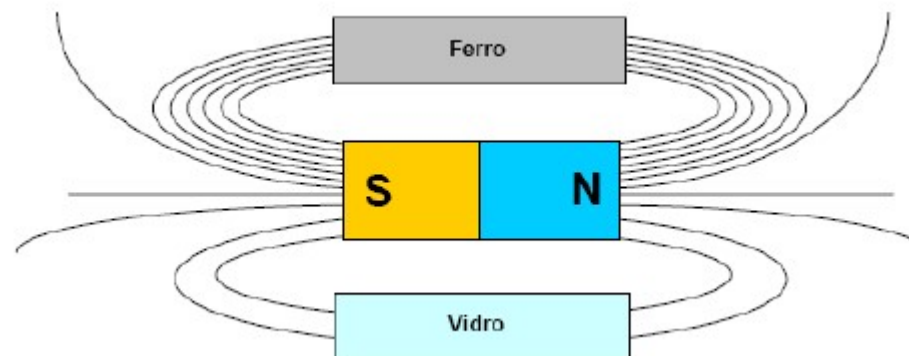
μ - permeabilidade magnética do meio, Wb/Am;

A - área da seção transversal, m².

Qual apresenta relutância: ALTA, BAIXA e MENOR?



Qual apresenta caminho magnético de ALTA e BAIXA relutância?



RELAÇÕES ELETROMECÂNICAS BÁSICAS

Lei de Ampère: relação básica entre corrente elétrica e campo magnético.

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_{\text{Superfície}} \vec{J} \cdot \vec{n} \cdot dS$$

lado esquerdo: integral de linha da intensidade de campo magnético H ao longo do contorno fechado, na mesma direção de $\vec{H}$, num campo magnético.

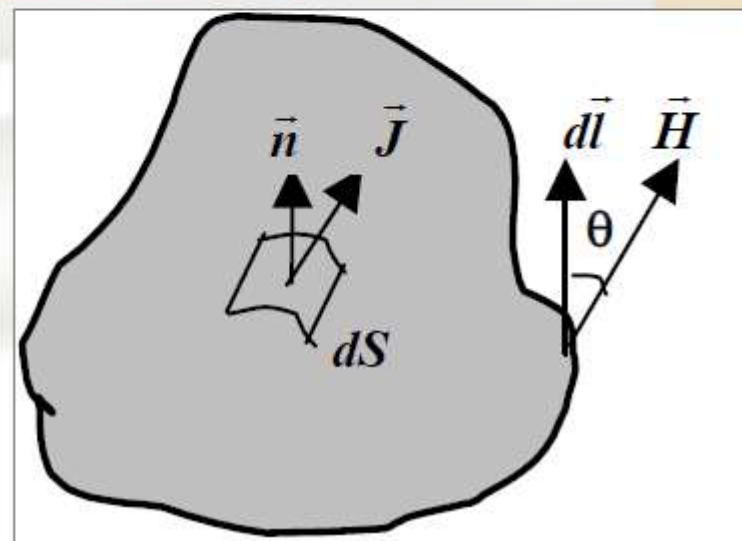
lado direito: integral de superfície da densidade de corrente J , sobre a área da seção transversal S .

$\vec{J}$ ampére por metro quadrado [A/m²];

$\vec{H}$ ampére-espira por metro [A-esp/m];
[direção dada pela regra da mão direita](#)

$\vec{l}$ o comprimento do caminho em [m];

$\vec{S}$ a área em [m²];



RELAÇÕES ELETROMECÂNICAS BÁSICAS

Intensidade de campo magnético $\vec{H}$ produz uma indução magnética (ou densidade de fluxo) $\vec{B}$ (na região de existência).

$$\vec{B} = \mu \vec{H}$$

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu \int_S \vec{J} \cdot \vec{n} \cdot dS$$

- A unidade de B é o tesla [T ou Wb/m²].
- μ é a permeabilidade do material (permeabilidade absoluta)

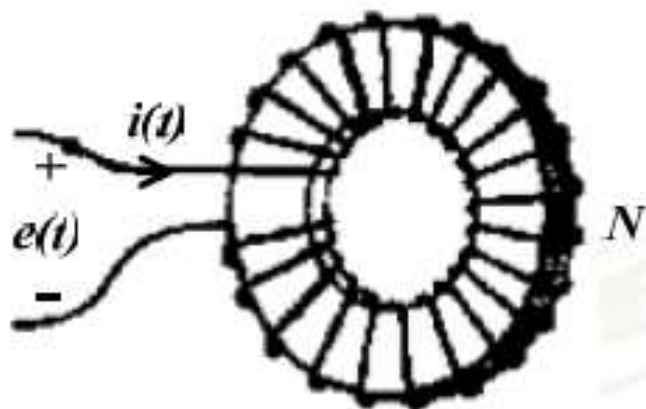
$$\mu = \mu_r \mu_0$$

Onde: μ_r é a permeabilidade relativa ao valor do vácuo.

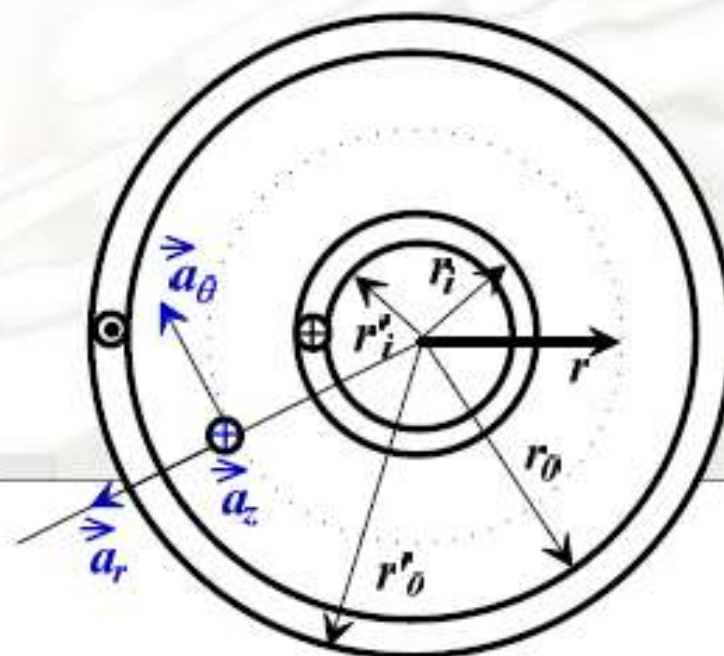
μ_0 (permeabilidade no vácuo) = $4\pi \times 10^{-7}$ [Wb/Am ou H/m]

RELAÇÕES ELETROMECAÂNICAS BÁSICAS

Lei de Ampère: um **toróide** imerso no ar em uma configuração simétrica.



(a) circuito magnético simples



(b) corte transversal do núcleo

Coordenadas Cilíndricas: r e θ

Direção da corrente

($\times$): entrando para $r < r_i$

($\bullet$): saindo para $r > r_o$.

Densidade uniforme de corrente

-muitas espiras, fios finos próximos;

Intensidade de campo magnético (H) na direção de θ , $r_i < r < r_o$ (Lei Ampère)

RELAÇÕES ELETROMECÂNICAS BÁSICAS

Lei de Ampère: um **toróide** imerso no ar em uma configuração simétrica.

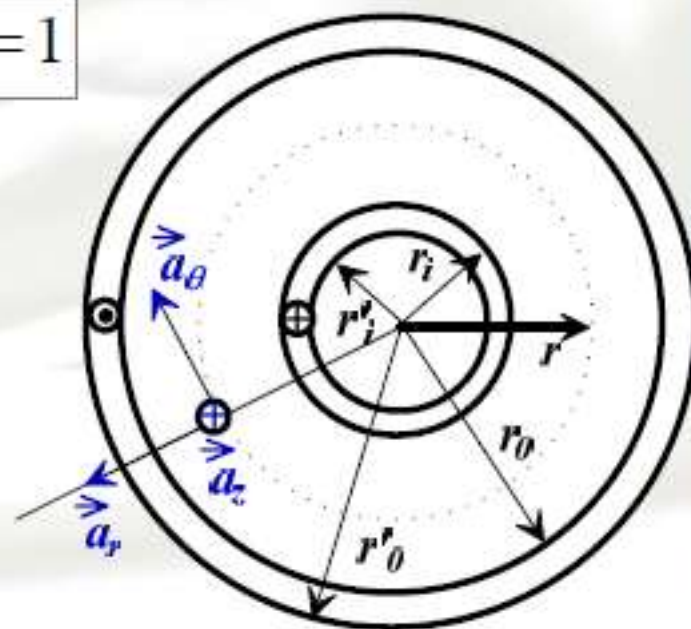
$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \oint (H_r \vec{a}_r + H_\theta \vec{a}_\theta + H_z \vec{a}_z) \cdot (r d\theta \vec{a}_\theta) = \int_0^{2\pi} H_\theta r d\theta = 2\pi r H_\theta$$

$$\vec{a}_r \cdot \vec{a}_\theta = \vec{a}_z \cdot \vec{a}_\theta = 0 \quad \text{e} \quad \vec{a}_\theta \cdot \vec{a}_\theta = 1$$

$$\int_S \vec{J} \cdot \vec{n} \cdot dS = Ni$$

Intensidade de campo magnético (H) na direção de θ dentro do núcleo:

$$H = \frac{Ni}{2\pi r}$$



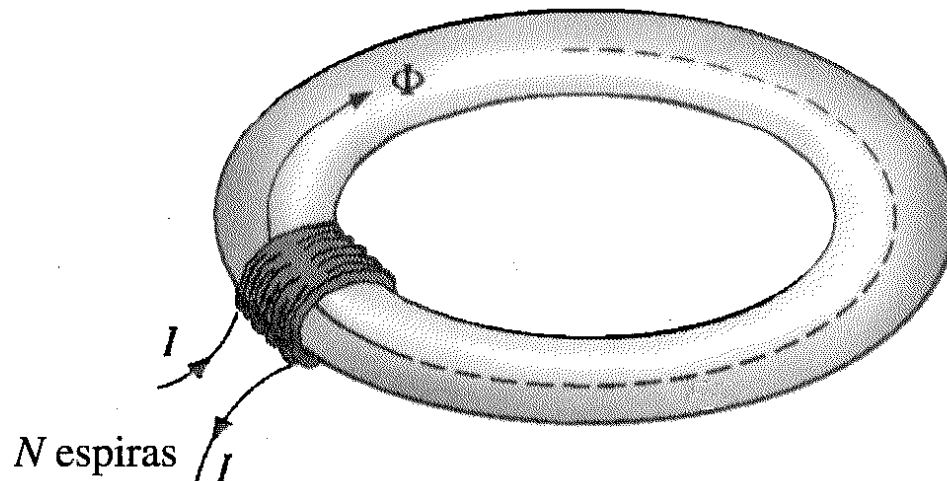
(b) corte transversal do núcleo

FORÇA MAGNETOMOTRIZ

Força necessária para estabelecer o fluxo magnético no interior do material.

$$\mathcal{F} = N \cdot i$$

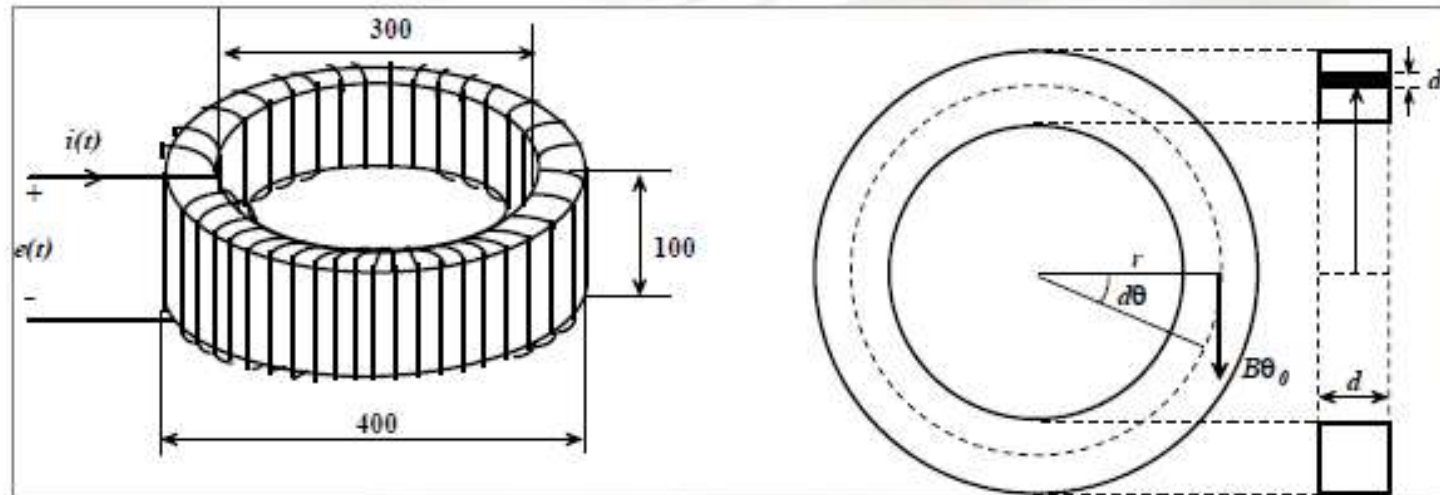
$$\mathcal{F} = H \cdot l$$



Na prática, podemos entender que uma bobina de N espiras, onde circula uma corrente I , é na verdade um "gerador" de fluxo magnético, através da sua força magnetomotriz.

EXEMPLO

Uma bobina enrolada, em forma toroidal, num anel de seção retangular. A bobina tem 200 espiras de fio de cobre cujo diâmetro é 3 mm.



- a) Para uma corrente de bobina de 50A, encontrar o a densidade de fluxo magnético (B) no diâmetro médio da bobina.

$$B = \frac{\mu_0 NI}{2\pi r} = \frac{200 \times 50 \times 4\pi 10^{-7}}{2\pi(0,35/2)} = 11,43 \times 10^{-3} \text{ Wb/m}^2$$

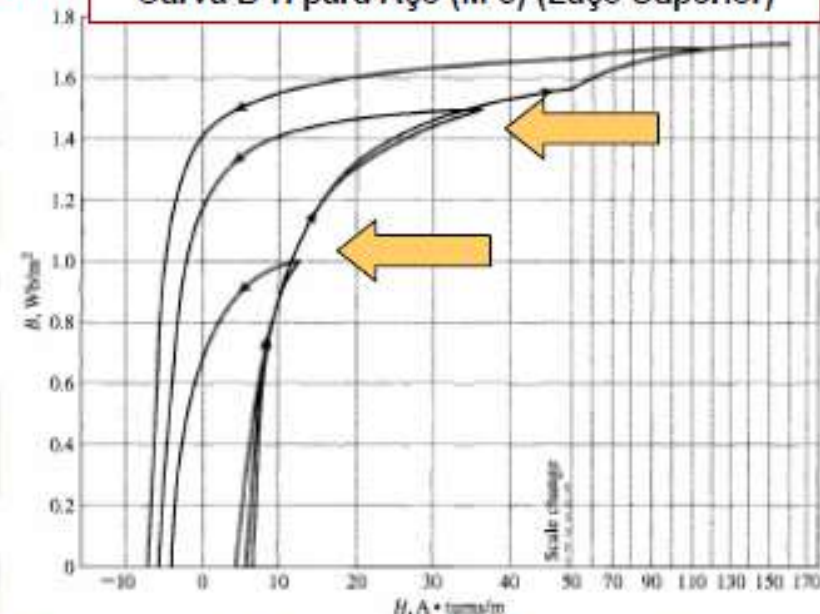
$$H = \frac{B}{\mu} \therefore H = 9095 \text{ A/m}$$

- a densidade de **fluxo magnético B** [Wb/m² ou T] está relacionada com a **intensidade de campo magnético H**.

$$\vec{B} = \mu \vec{H}$$

Linear (Proporcional) ?

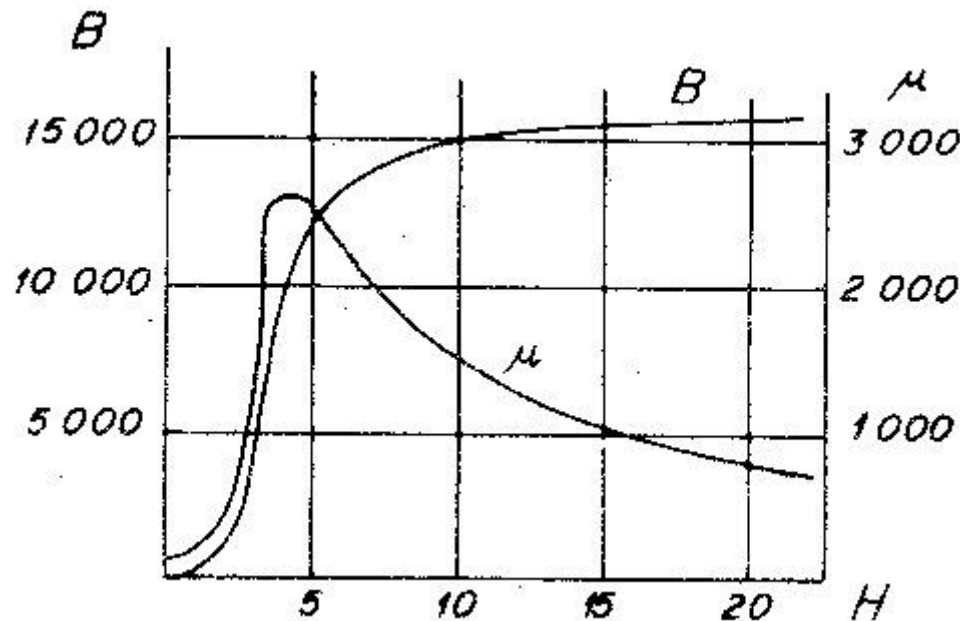
Curva B-H para Aço (M-5) (Laço Superior)



- material do núcleo:** ferromagnético
 - a densidade de fluxo magnético é desprezível na região fora do núcleo pois μ é da ordem de 10^3 a 10^5 .
 - características não lineares**, pois o valor de μ_r depende do **valor de H** e de **seu comportamento anterior**;
 - um valor relativamente alto de $\mu_r \rightarrow$ **comportamento linear**.

RELAÇÃO ENTRE B E H

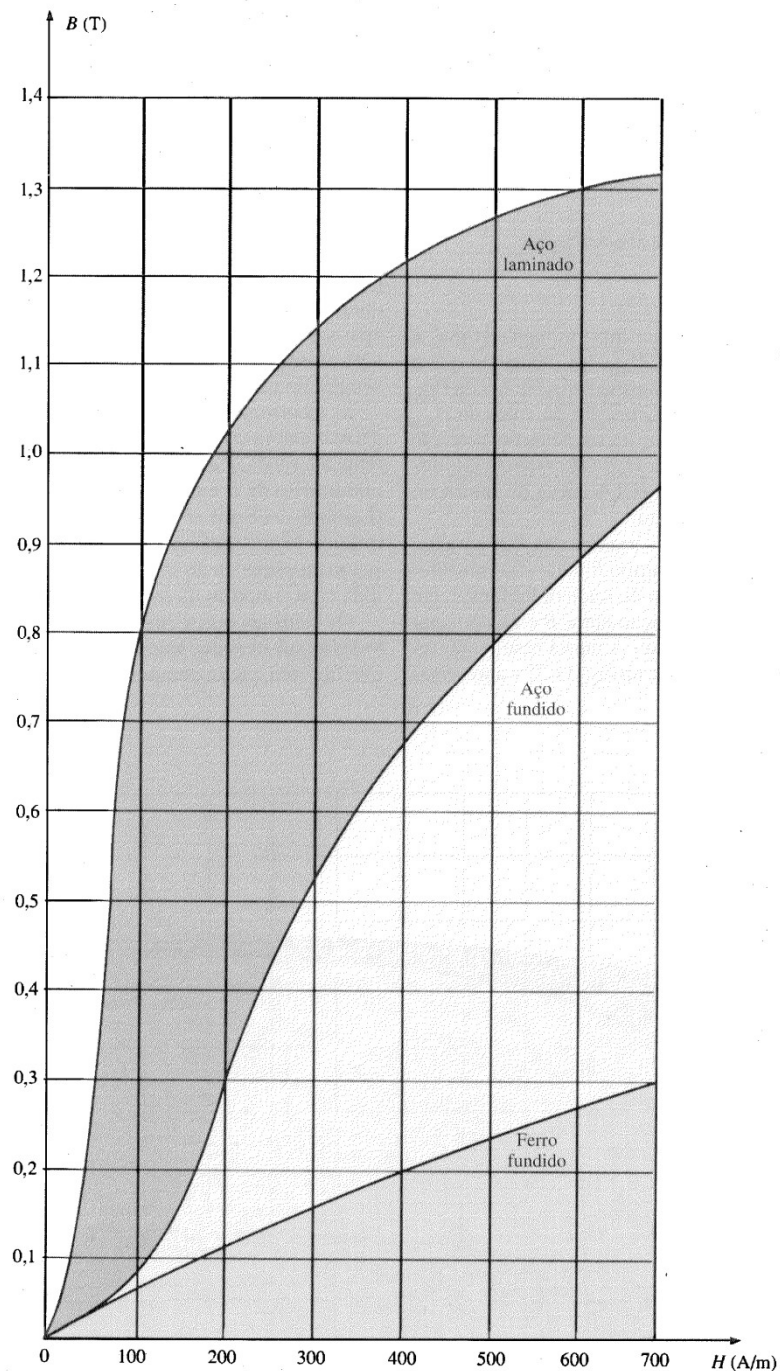
Esta relação indica que, para um dado valor específico da força magnetizante, quanto maior o μ , maior será a densidade **B** induzida. Em outras palavras, materiais com alta permeabilidade podem conduzir mais linhas de campo dentro do material, sem fazer muita "força" (intensidade de campo) externa.



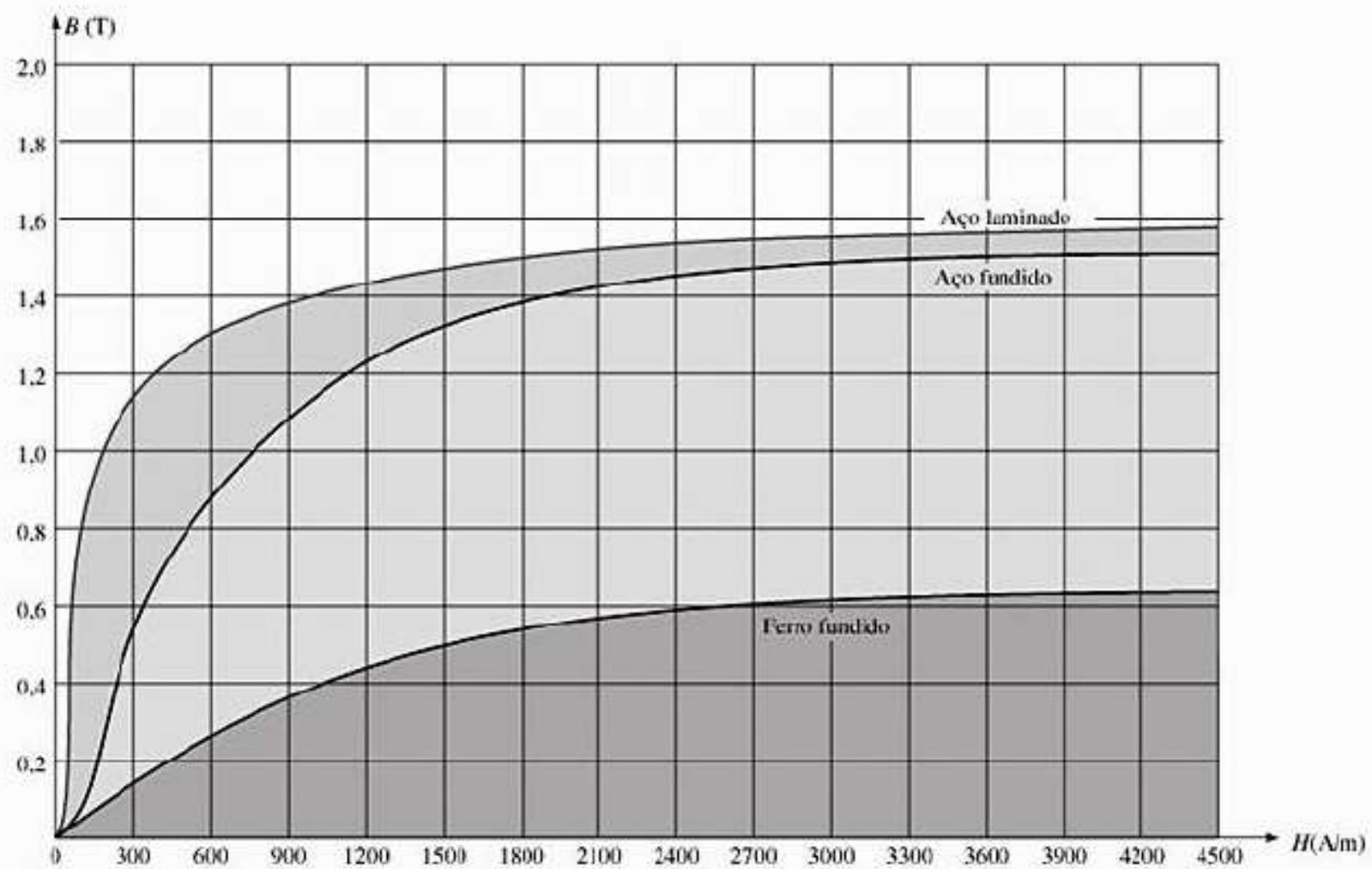
$$B = \mu H$$

OBS.: O único μ que não varia com a variação de H é o μ_0 , pois já é um valor fixo.

CURVA DE MAGNETIZAÇÃO

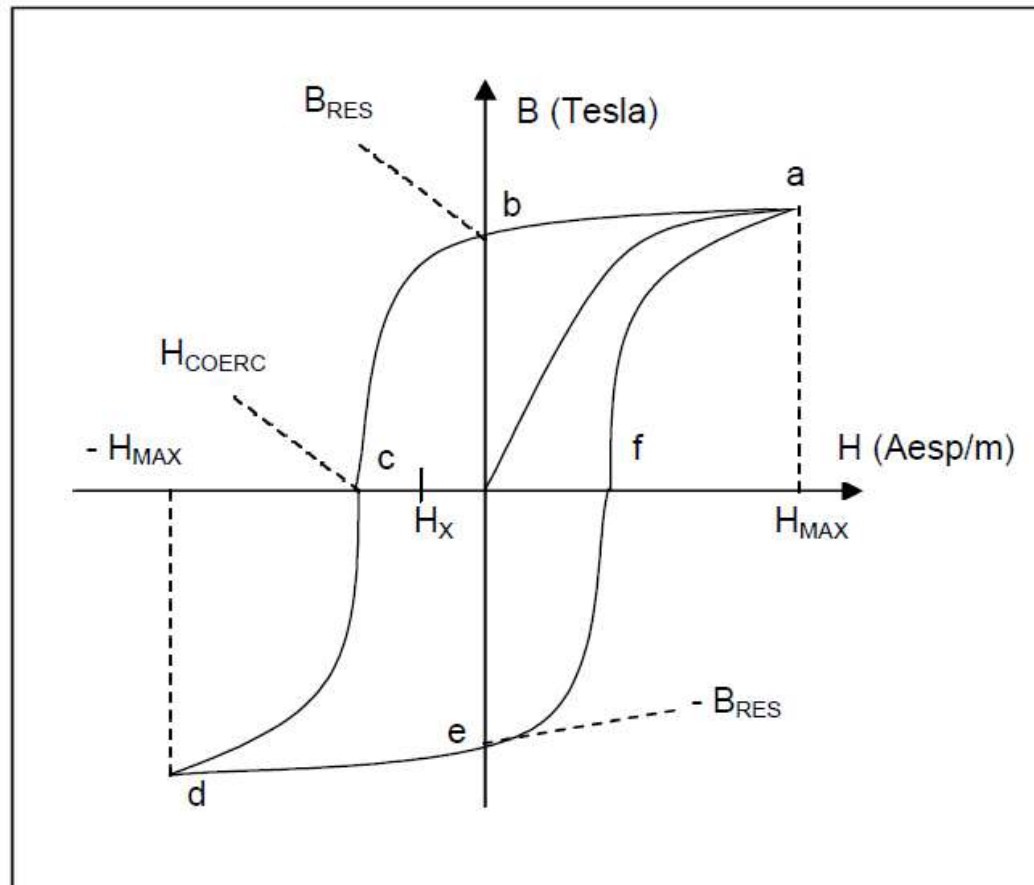


A relação entre B e H é representada para um determinado material a partir de um gráfico denominado curva de magnetização.



HISTERESE

O efeito de histerese acontece sobre materiais ferromagnéticos quando submetidos a um fluxo alternado ao longo do tempo. Isto é possível aplicando em sua bobina uma corrente alternada.



CIRCUITOS MAGNÉTICOS LINEARES

Circuito magnético equivalente análogo a um circuito elétrico

A aplicação da Lei de Ampère ao exemplo do toróide:

$$\vec{B} = \mu \vec{H}$$

$$B = \mu_0 \frac{NI}{2\pi r} \text{ ou } B = \mu_0 \frac{NI}{l}$$

$$H = \frac{NI}{l} \text{ ou } Hl = NI = \mathfrak{F}$$

- A unidade de **H** é a de **Ampere-espira/comprimento** [Aesp/m].
- H é o gradiente de potencial magnético.
- Onde **l** é o **comprimento da trajetória do fluxo**.
- $r > \text{diâmetro externo}$ e $r < \text{diâmetro interno}$ conduzem a $Hl = NI = 0$.

O **fluxo magnético** ϕ através de uma **área S**

$$\phi = \oint \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

CIRCUITOS MAGNÉTICOS LINEARES

- Considerando que todo o fluxo está confinado no toróide, e a *densidade de fluxo constante e uniforme* através da área S da seção transversal.
- O fluxo magnético $\phi = B \cdot S$

$$\frac{\phi}{S} = \frac{\mu_0 NI}{l} \quad \text{ou} \quad NI = \frac{\phi l}{S \mu_0} \quad \text{ou} \quad \phi = \frac{NI}{l/S \mu_0}$$

- a corrente de excitação I produz um *fluxo* ϕ no núcleo (causa-efeito)
- a quantidade NI é chamada *força magnetomotriz* ou *f.m.m.* ($\mathfrak{F}$)

$$\mathfrak{F} = NI \quad [\text{A} \cdot \text{esp}]$$

- e a expressão $l/\mu_0 S$ é chamada de *relutância* ($\mathfrak{R}$) da estrutura magnética (definida como a f.m.m por unidade de fluxo magnético);
- P a *permeância* que é o inverso da relutância.

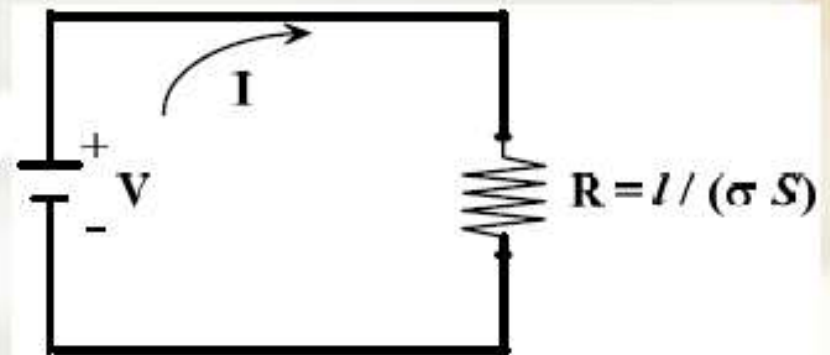
$$\mathfrak{R} = \frac{\mathfrak{F}}{\phi} = \frac{l}{\mu_0 S} \quad [\text{A} \cdot \text{esp/Wb}] \quad P = \frac{1}{\mathfrak{R}} = \frac{\mu_0 S}{l} \quad [\text{Wb/A} \cdot \text{esp}]$$

CIRCUITOS MAGNÉTICOS LINEARES

- A *f.m.m* estabelece uma *intensidade de campo magnético* H , a qual, por sua vez, produz uma *densidade de fluxo magnético* B no material.
- A integração de B sobre a área S do núcleo dá o ϕ .
- $\mathcal{F}$ é a causa e ϕ é o efeito.
- $\mathcal{R}$ é determinado pelas propriedades magnéticas do material e as dimensões do núcleo.

Analogia com circuito elétrico

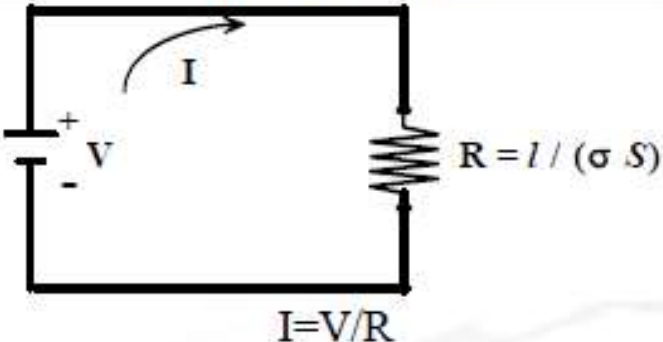
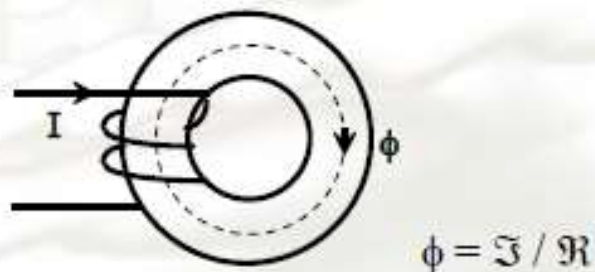
$$I = \frac{\text{fem}}{\text{Resistência}} = \frac{V}{l / \sigma S}$$



- σ é a condutividade do material; l é o comprimento; e S é a área da seção transversal

CIRCUITOS MAGNÉTICOS LINEARES

Analogia entre os circuitos elétrico e magnético.

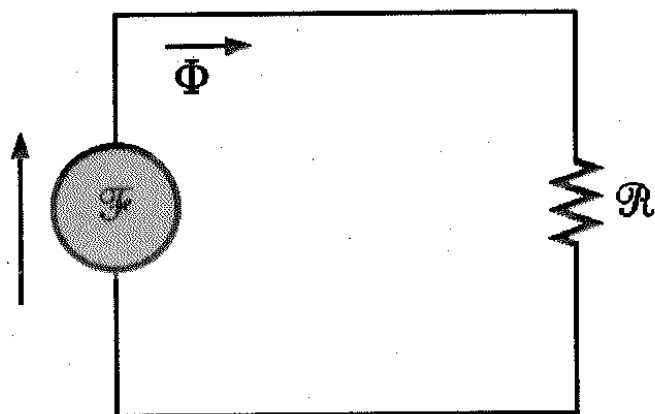
Circuito Elétrico	Circuito Magnético
 $R = l / (\sigma S)$ $I = V/R$	 $\phi = \mathfrak{I} / \mathfrak{R}$
Resistência $R = \frac{l}{\sigma S} \quad [\Omega]$ Corrente $I = \frac{V}{R} \quad [A]$ Tensão $V = RI \quad [V]$ Condutividade $\sigma \quad [S/m]$ Condutância $G = \frac{1}{R} \quad [S]$	Relutância $\mathfrak{R} = \frac{l}{\mu S} \quad [A \text{ esp}/Wb]$ Fluxo $\phi = \frac{\mathfrak{I}}{\mathfrak{R}} \quad [Wb]$ Força magnetomotriz $\mathfrak{I} = NI = \mathfrak{R} \phi \quad [A \text{ esp}]$ Permeabilidade μ_0^* Permeância $P = \frac{l}{\mathfrak{R}} \quad [Wb/A \text{ esp}]$
R – Associado a perda de energia	$\mathfrak{R}$ - Não está associado a perda de energia.

EQUIVALÊNCIA ENTRE CIRCUITOS MAGNÉTICOS E ELÉTRICOS

$$\text{Efeito} = \frac{\text{causa}}{\text{oposição}}$$

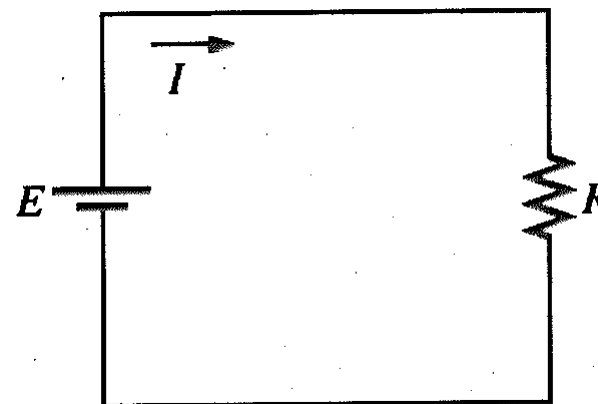
MAGNÉTICO

$$\mathcal{F} = \mathcal{R} \cdot \phi$$



ELÉTRICO

$$\varepsilon = R \cdot I$$



CIRCUITOS MAGNÉTICOS LINEARES

Analogia entre os circuitos elétrico e magnético.

A analogia entre os circuitos elétrico e magnético somente foi possível pelo fato do campo magnético estabelecido pela corrente da bobina estar totalmente confinado ao (núcleo) interior do toróide e também pelo fato do circuito magnético ser linear, isto é, $\mu = \mu_0 = \text{cte}$.

A metodologia de circuito magnético, embora desenvolvido para uma estrutura particular, contendo ar ou vácuo, pode ser ampliado para estruturas magnéticas feitas de materiais ferromagnéticos de alta permeabilidade.

CIRCUITOS MAGNÉTICOS LINEARES

- Não existe analogia em todos os aspectos.

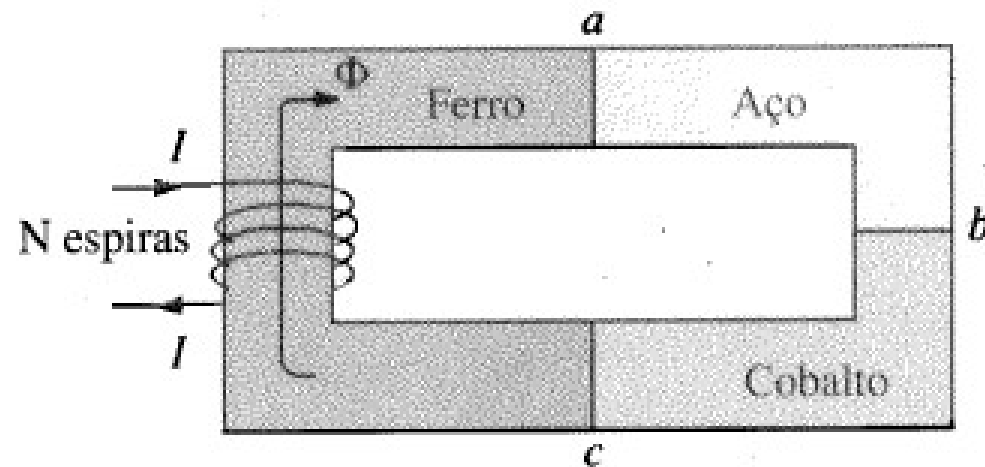
Ex: não existe isolante magnético análogo aos isolantes elétricos que existem para circuitos elétricos.

A relação entre a condutividade de um típico isolador elétrico e de um bom condutor é da ordem de 10^{-16}

Permeabilidade do ar para a permeabilidade de material ferromagnético típico não é superior a 10^{-6} (Permalloy).

Quando a corrente contínua é estabelecida e mantida num circuito elétrico, a energia deve ser suprida continuamente. Uma situação análoga não predomina no caso magnético, onde o fluxo é estabelecido e mantido constante.

LEI DE AMPERE PARA CIRCUITOS MAGNÉTICOS



$$\sum \mathcal{F} = 0$$

$$\sum_{\text{C}} \mathcal{F} = 0$$

$$\underbrace{+NI}_{\text{Subida}} - \underbrace{H_{ab}l_{ab}}_{\text{Queda}} - \underbrace{H_{bc}l_{bc}}_{\text{Queda}} - \underbrace{H_{ca}l_{ca}}_{\text{Queda}} = 0$$

$$\underbrace{NI}_{\text{fmm aplicada}} = \underbrace{H_{ab}l_{ab} + H_{bc}l_{bc} + H_{ca}l_{ca}}_{\text{queda de fmm}}$$

EXEMPLO 11.3

Para o circuito magnético em série visto na Figura 11.29:

- Calcule o valor de I necessário para gerar um fluxo magnético $\Phi = 4 \times 10^{-4} \text{ Wb}$.
- Determine μ e μ_r para o material nessas condições.

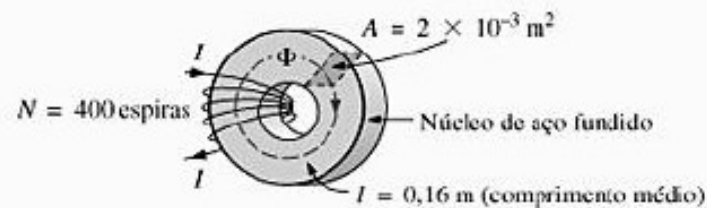
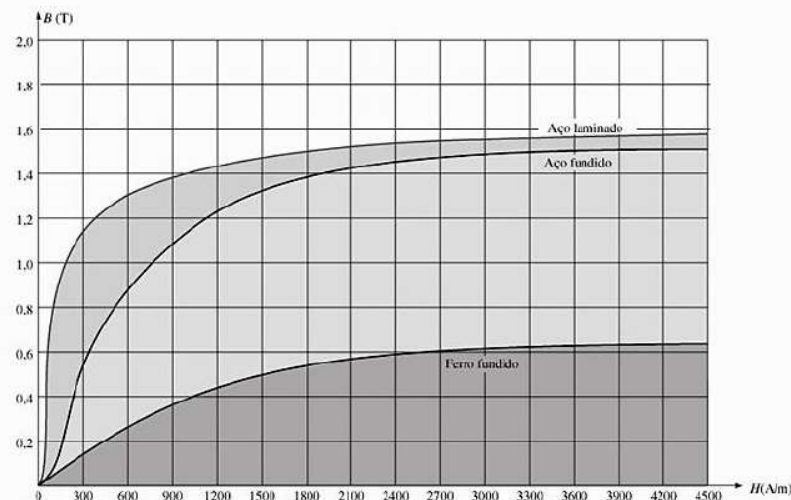


Figura 11.29 Exemplo 11.3.



- A densidade de fluxo B é:

$$B = \frac{\Phi}{A} = \frac{4 \times 10^{-4} \text{ Wb}}{2 \times 10^{-3} \text{ m}^2} = 2 \times 10^{-1} \text{ T} = 0,2 \text{ T}$$

Utilizando o gráfico B - H mostrado na Figura 11.24, podemos determinar a força magnetizante H :

$$H (\text{aço fundido}) = 170 \text{ A/m}$$

Aplicando a lei circuital de Ampère, temos:

$$NI = Hl$$

$$I = \frac{Hl}{N} = \frac{(170 \text{ A/m})(0,16 \text{ m})}{400} = 68 \text{ mA}$$

(Lembre-se de que N representa o número de espiras.)

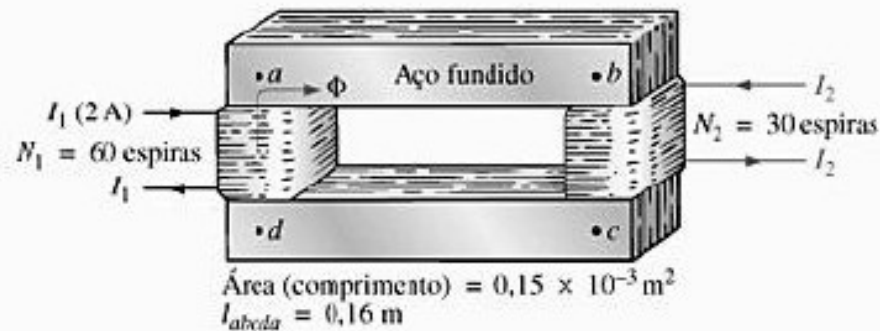
- A permeabilidade do material pode ser determinada usando a Equação (11.8):

$$\mu = \frac{B}{H} = \frac{0,2 \text{ T}}{170 \text{ A/m}} = 1,176 \times 10^{-3} \text{ Wb/A} \cdot \text{m}$$

e a permeabilidade relativa é:

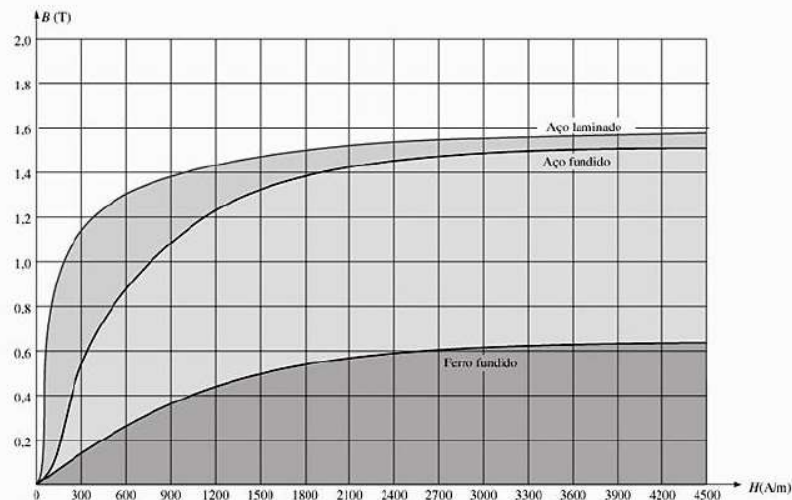
$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_o} = \frac{1,176 \times 10^{-3}}{4\pi \times 10^{-7}} = 935,83$$

Determine a corrente no secundário I_2 do transformador visto na Figura 11.33 se o fluxo resultante no núcleo é $1,5 \times 10^{-5} \text{ Wb}$, no sentido horário.



$$B = \frac{\Phi}{A} = \frac{1,5 \times 10^{-5} \text{ Wb}}{0,15 \times 10^{-3} \text{ m}^2} = 10 \times 10^{-2} \text{ T} = 0,10 \text{ T}$$

$$H \text{ (segundo a Figura 11.24)} \equiv \frac{1}{5}(100 \text{ A/m}) = 20 \text{ A/m}$$



Aplicando a lei circuital de Ampère,

$$N_1 I_1 - N_2 I_2 = H_{abceda} l_{abceda}$$

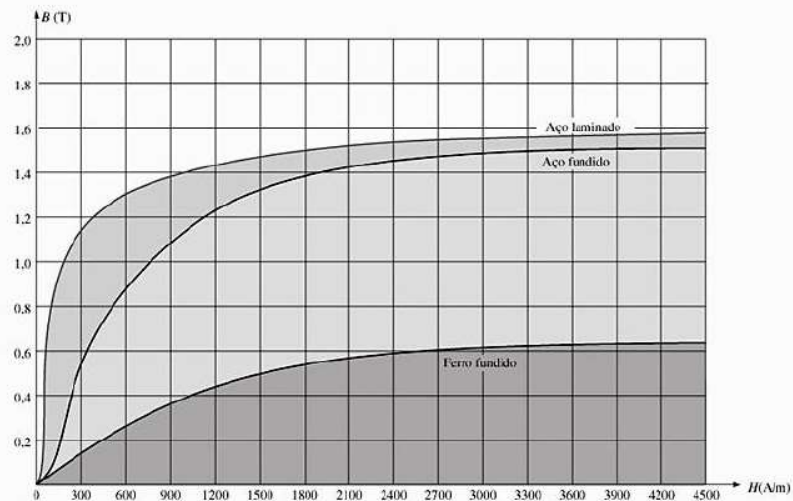
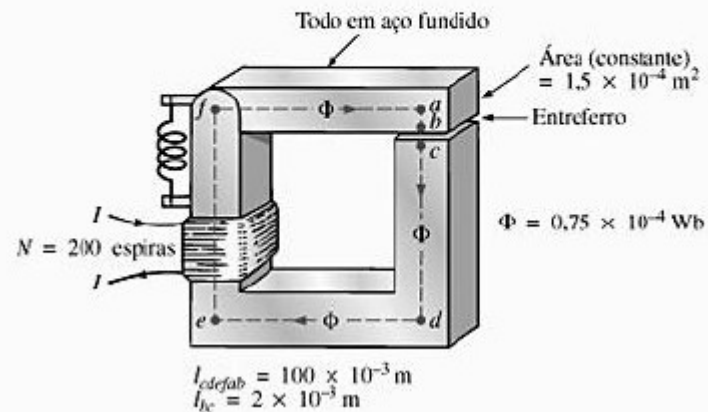
$$(60)(2 \text{ A}) - (30)(I_2) = (20 \text{ A/m})(0,16 \text{ m})$$

$$120 \text{ A} - (30)I_2 = 3,2 \text{ A}$$

$$(30)I_2 = 120 \text{ A} - 3,2 \text{ A}$$

$$I_2 = \frac{116,8 \text{ A}}{30} = 3,89 \text{ A}$$

Calcule o valor de I necessário para estabelecer um fluxo $\Phi = 0,75 \times 10^{-4} \text{ Wb}$ no circuito magnético em série mostrado na Figura 11.36.



O fluxo magnético em cada seção é dado por:

$$B = \frac{\Phi}{A} = \frac{0,75 \times 10^{-4} \text{ Wb}}{1,5 \times 10^{-4} \text{ m}^2} = 0,5 \text{ T}$$

A partir as curvas B - H mostradas na Figura 11.24,

$$H (\text{aço fundido}) \cong 280 \text{ A/m}$$

Aplicando a Equação (11.15):

$$\begin{aligned} H_g &= (7,96 \times 10^5) B_g = (7,96 \times 10^5)(0,5 \text{ T}) \\ &= 3,98 \times 10^5 \text{ A/m} \end{aligned}$$

As quedas de fmm são:

$$H_{\text{núcleo}} l_{\text{núcleo}} = (280 \text{ A/m})(100 \times 10^{-3} \text{ m}) = 28 \text{ A}$$

$$\begin{aligned} H_g l_g &= (3,98 \times 10^5 \text{ A/m})(2 \times 10^{-3} \text{ m}) \\ &= 796 \text{ A} \end{aligned}$$

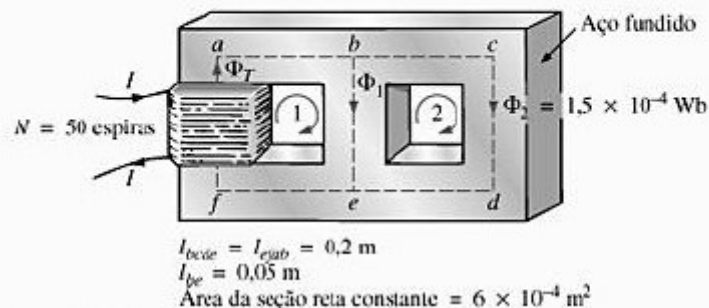
Aplicando a lei circuital de Ampère:

$$\begin{aligned} NI &= H_{\text{núcleo}} l_{\text{núcleo}} + H_g l_g \\ &= 28 \text{ A} + 796 \text{ A} \end{aligned}$$

$$(200)I = 824 \text{ A}$$

$$I = 4,12 \text{ A}$$

Determine a corrente I necessária para estabelecer um fluxo de $1,5 \times 10^{-4} \text{ Wb}$ no trecho do núcleo indicado na Figura 11.38.



$$\Phi_T = \Phi_1 + \Phi_2 = 5,82 \times 10^{-4} \text{ Wb} + 1,5 \times 10^{-4} \text{ Wb} = 7,32 \times 10^{-4} \text{ Wb}$$

$$B = \frac{\Phi_T}{A} = \frac{7,32 \times 10^{-4} \text{ Wb}}{6 \times 10^{-4} \text{ m}^2} = 1,22 \text{ T}$$

A partir da Figura 11.23:

$$H_{efab} \cong 400 \text{ A}$$

Aplicando a lei circuital de Ampère:

$$+NI - H_{efab}l_{efab} - H_{be}l_{be} = 0$$

$$NI = (400 \text{ A/m})(0,2 \text{ m}) + (160 \text{ A/m})(0,05 \text{ m})$$

$$(50)I = 80 \text{ A} + 8 \text{ A}$$

$$I = \frac{88 \text{ A}}{50} = 1,76 \text{ A}$$

O circuito magnético equivalente e o circuito elétrico análogo aparecem na Figura 11.39. Temos:

$$B_2 = \frac{\Phi_2}{A} = \frac{1,5 \times 10^{-4} \text{ Wb}}{6 \times 10^{-4} \text{ m}^2} = 0,25 \text{ T}$$

A partir da Figura 11.24:

$$H_{bcde} \cong 40 \text{ A/m}$$

Aplicando a lei circuital de Ampère à malha 2 vista nas figuras 11.38 e 11.39:

$$\sum_C \mathcal{F} = 0$$

$$H_{be}l_{be} - H_{bcde}l_{bcde} = 0$$

$$H_{be}(0,05 \text{ m}) - (40 \text{ A/m})(0,2 \text{ m}) = 0$$

$$H_{be} = \frac{8 \text{ A}}{0,05 \text{ m}} = 160 \text{ A/m}$$

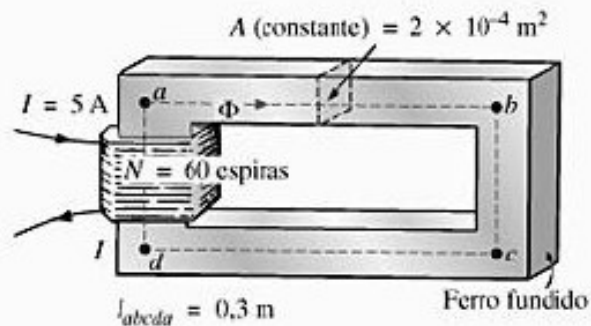
A partir da Figura 11.24:

$$B_1 \cong 0,97 \text{ T}$$

e

$$\Phi_1 = B_1 A = (0,97 \text{ T})(6 \times 10^{-4} \text{ m}^2) = 5,82 \times 10^{-4} \text{ Wb}$$

Calcule o fluxo magnético Φ para o circuito mostrado na Figura 11.40.



Utilizando a lei circuital de Ampère:

$$NI = H_{abca} l_{abca}$$

ou

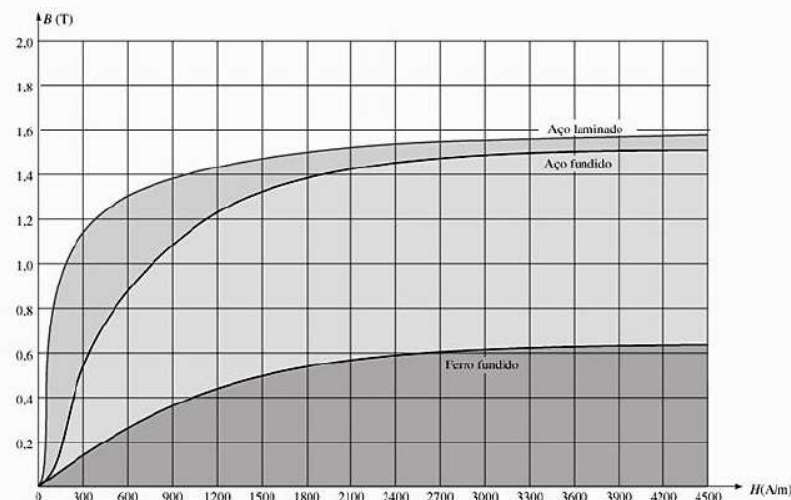
$$H_{abca} = \frac{NI}{l_{abca}} = \frac{(60)(5 \text{ A})}{0,3 \text{ m}} = \frac{300 \text{ A}}{0,3 \text{ m}} = 1.000 \text{ A/m}$$

e

$$B_{abca} \text{ (segundo a Figura 11.23)} \cong 0,39 \text{ T}$$

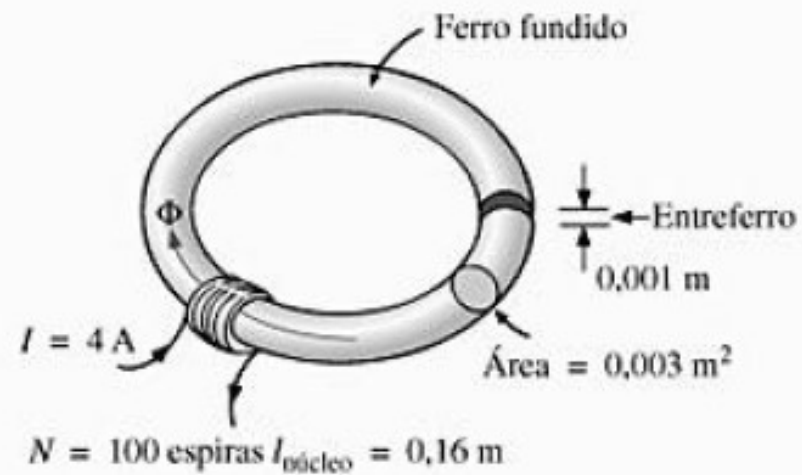
Como $B = \Phi/A$, temos:

$$\begin{aligned} \Phi &= BA = (0,39 \text{ T})(2 \times 10^{-4} \text{ m}^2) \\ &= 0,78 \times 10^{-4} \text{ Wb} \end{aligned}$$

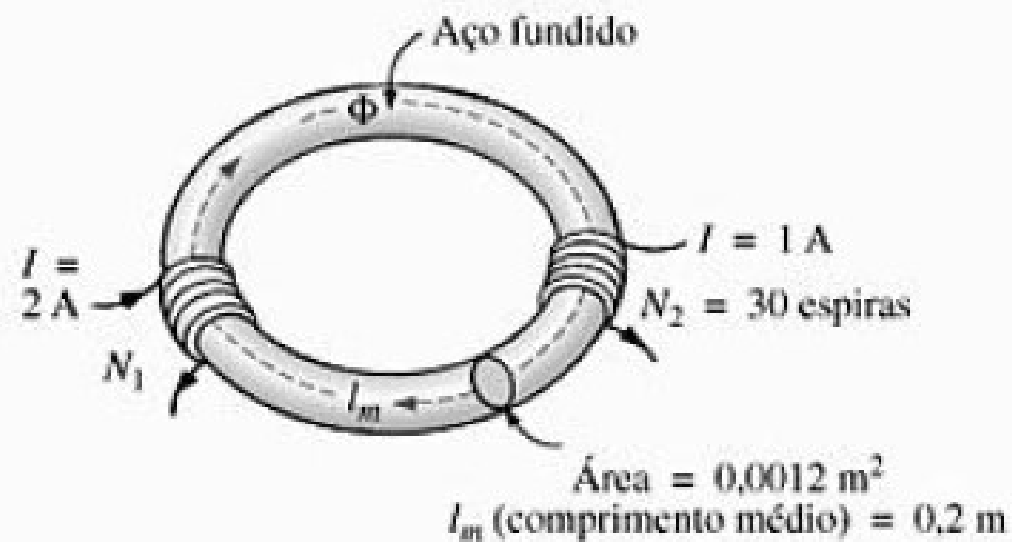


EXERCÍCIOS

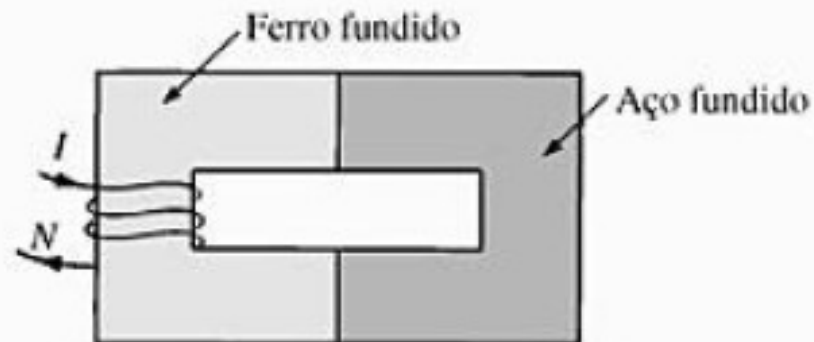
Calcule o fluxo Φ para o circuito magnético em série mostrado na Figura 11.41 com a fmm especificada.



- a. Calcule o número N_1 de espiras necessário para estabelecer um fluxo $\Phi = 12 \times 10^{-4} \text{ Wb}$ no circuito magnético da Figura 11.61.
- b. Calcule a permeabilidade μ do material.

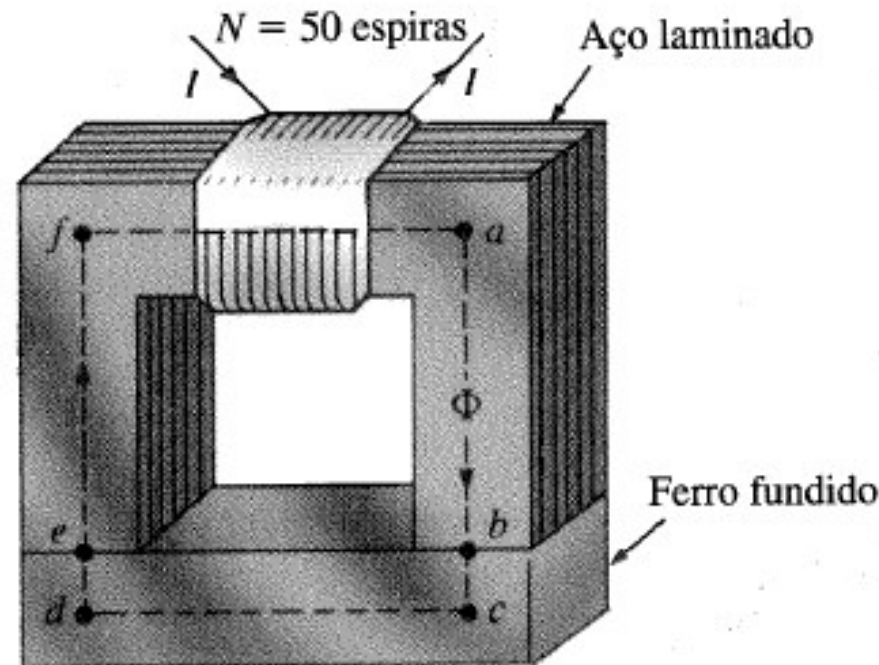


Determine a corrente necessária para estabelecer um fluxo $\Phi = 3 \times 10^{-4}$ Wb no circuito magnético em série mostrado na Figura 11.60.



$$\begin{aligned}l_{\text{núcleo de ferro}} &= l_{\text{núcleo de aço}} = 0,3 \text{ m} \\ \text{Área (comprimento)} &= 5 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \\ N &= 100 \text{ espiras}\end{aligned}$$

EXEMPLO 11.4 O eletroímã da Fig. 11.31 atraiu uma barra de ferro fundido. Determine a corrente I necessária para estabelecer um fluxo no núcleo com o valor indicado na figura.

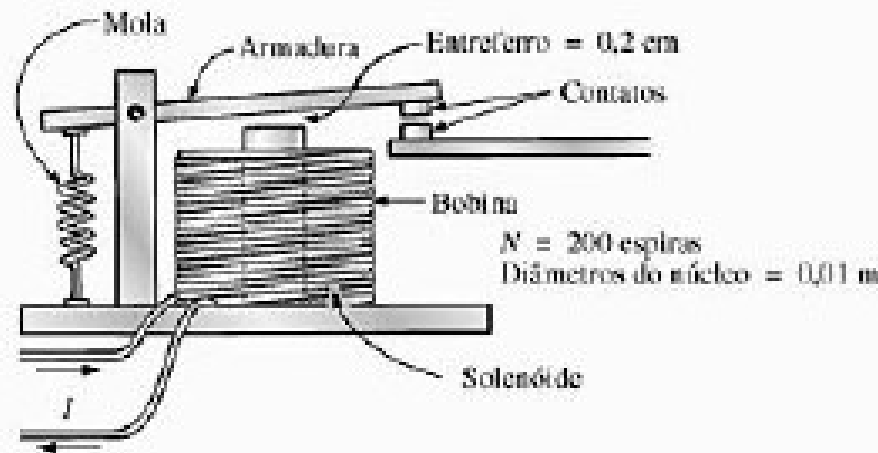


$$\begin{aligned}
 l_{ab} &= l_{cd} = l_{ef} = l_{fa} = 4 \text{ pol.} \\
 l_{bc} &= l_{de} = 0,5 \text{ pol.} \\
 \text{Área (constante)} &= 1 \text{ pol}^2 \\
 \Phi &= 3,5 \times 10^{-4} \text{ Wb}
 \end{aligned}$$

- a. Um fluxo de $0,2 \times 10^{-4} \text{ Wb}$ estabelece uma força de atração suficiente para que o solenóide ilustrado na Figura 11.67 atraia a armadura para vencer a resistência da mola e fechar os contatos. Calcule a corrente necessária para estabelecer este fluxo, considerando que toda a queda de fmm ocorre no entreferro.
- b. A força exercida sobre a armadura é dada pela equação:

$$F \text{ (newtons)} = \frac{1}{2} \cdot \frac{B_g^2 A}{\mu_o}$$

onde B_g é a densidade de fluxo no entreferro e A , a área da seção reta do núcleo do solenóide. Calcule a força em newtons a que é submetida a armadura quando o fluxo Φ tiver o valor especificado no item (a).

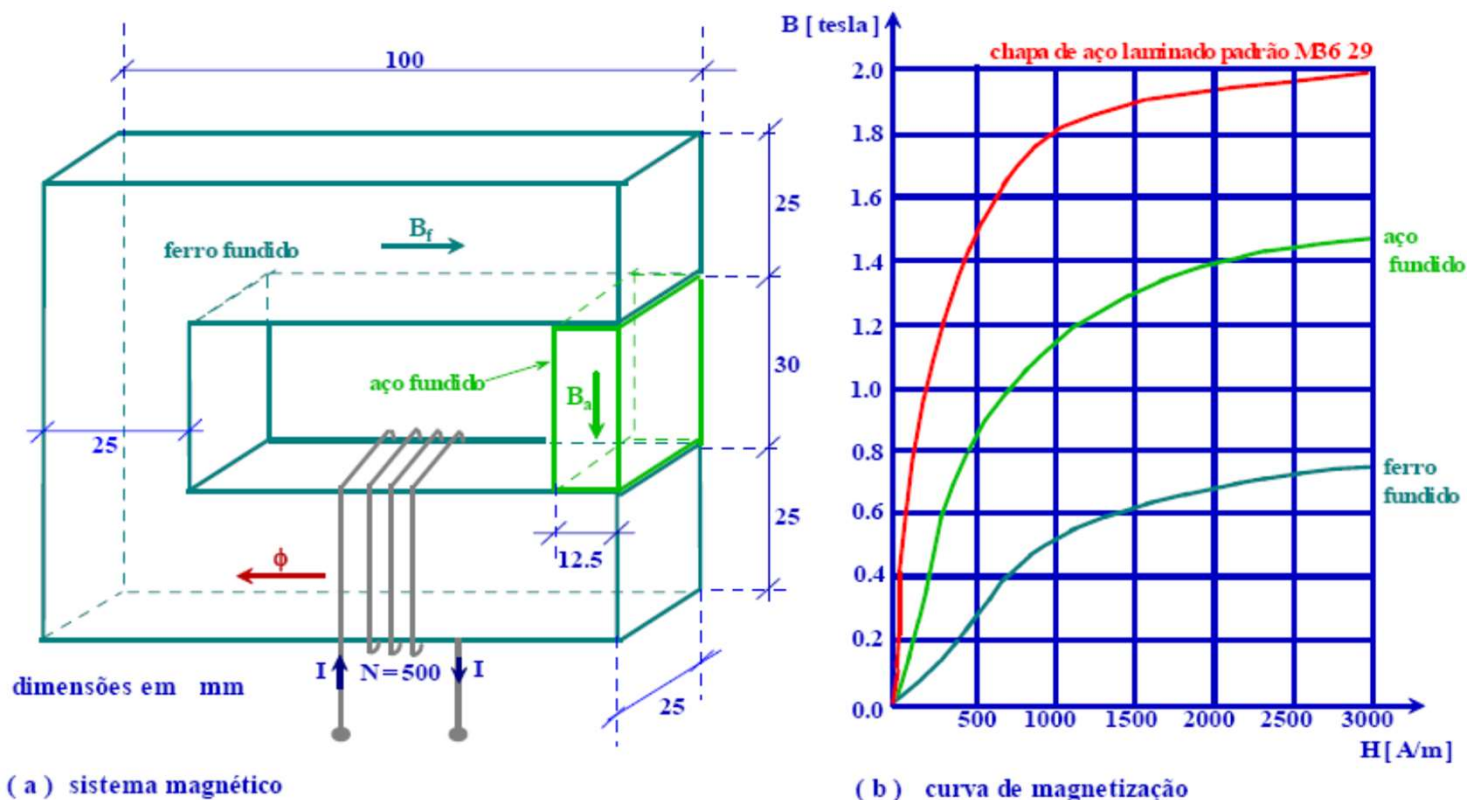


1) No sistema magnético apresentado na figura a, empregar a curva de magnetização da figura b para determinar:

a) A corrente da bobina, necessária para produzir um fluxo total $\phi = 0.25 \times 10^{-3} \text{ Wb}$

b) A permeabilidade relativa μ_r , para cada material, nestas condições.

c) A relutância de cada parte, núcleo de ferro fundido e de aço fundido do sistema magnético.



CONVERSÃO DE ENERGIA



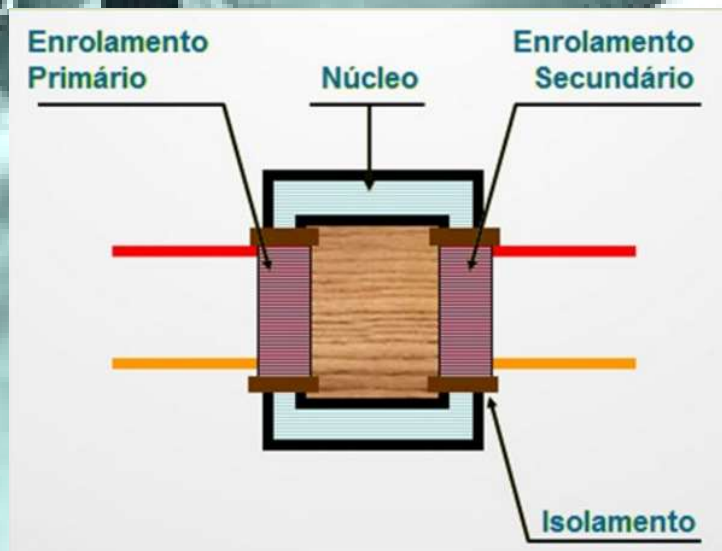
www.electroenge.com.br

Prof. Dr. Giuliano Pierre Estevam

TRANSFORMADORES

Um transformador trata-se de um circuito magnético que interliga dois circuitos elétricos a partir da indução eletromagnética.

Sua estrutura consiste de um núcleo fechado sobre si mesmo, formado por lâminas de ferro doce (para diminuir as perdas devidas às correntes de Foucault), no qual há um enrolamento primário e outro secundário, utilizado para converter o valor da tensão de uma corrente alternada, de acordo com suas espiras acopladas.



O enrolamento ligado à fonte de tensão é denominado de primário; o ligado à carga é o secundário.

O enrolamento (A), ou o enrolamento (B), poderá ser primário ou secundário, dependendo se está ligado à carga ou a fonte.

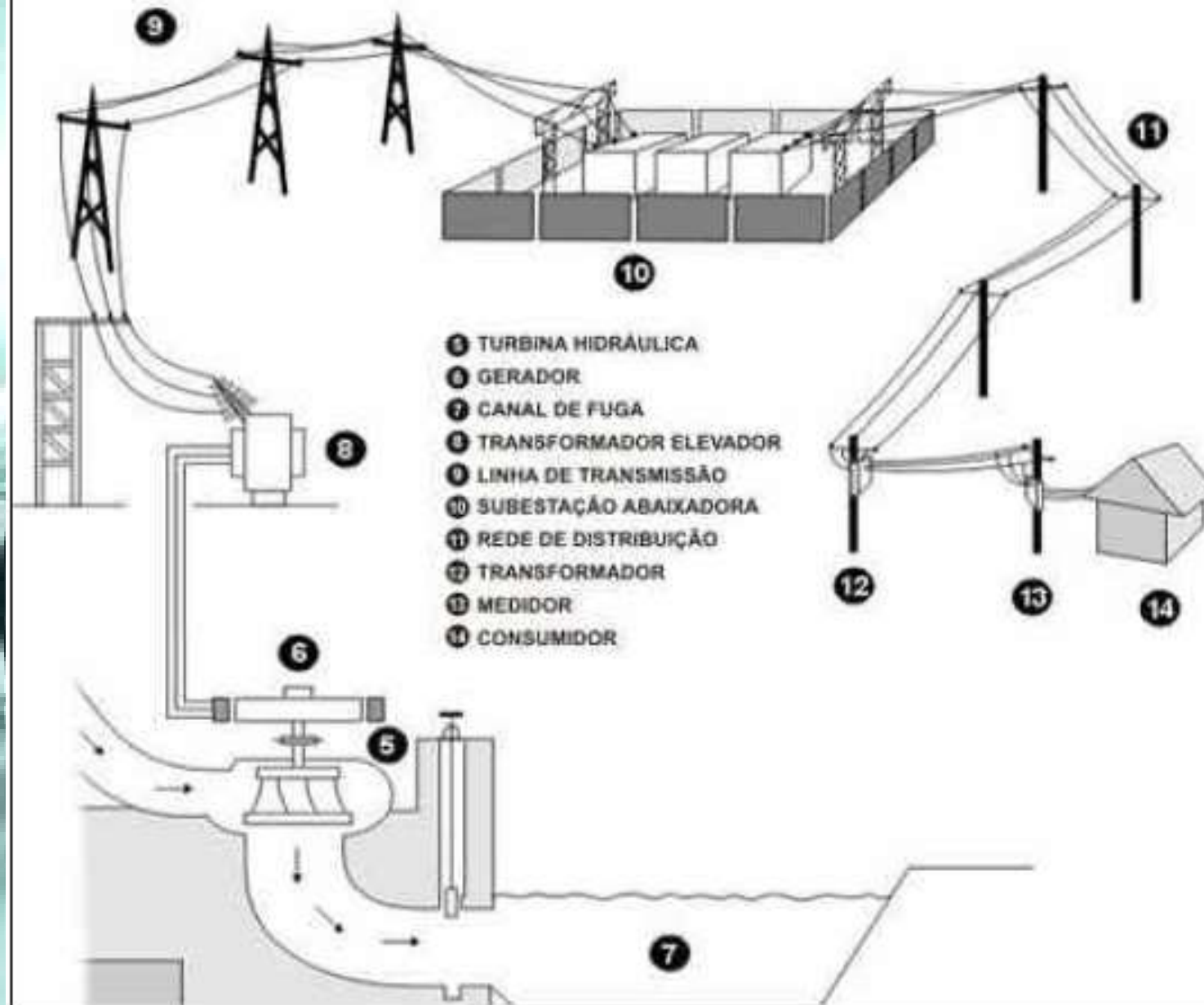
UTILIZAÇÃO

- ISOLAR ELETRICAMENTE DOIS CIRCUITOS

- AJUSTAR A TENSÃO DE SAÍDA À TENSÃO DE ENTRADA DE UM SISTEMA

- AJUSTAR A IMPEDÂNCIA DO ESTÁGIO SEGUINTE A IMPEDÂNCIA DO ESTÁGIO ANTERIOR (CASAMENTO DE IMPEDÂNCIAS)

As diversas aplicações do transformador



Exemplo da necessidade do uso de transformadores em sistemas de potência

Seja um gerador com tensão terminal de 10 kV e capacidade de 300 MW, e que se deseja transmitir esta potência (energia) para um carga situada a um distância de 20 km.

Tem-se que:

$$I_f = P_f / V_f \quad (\text{A})$$

Sabendo que: $P_f = 300,0 \text{ MW}$
 $V_f = 10,0 \text{ kV}$

Assim, temos:

$$I_f = 300,0 / 10,0 = 30,0 \text{ kA}$$

Exemplo da necessidade do uso de transformadores em sistemas de potência

- Sendo a resistividade do cobre $\rho = 1,75 \times 10^{-8} \Omega/\text{m}$, a resistência será:

$$R_L = \rho \cdot l / A \Omega$$

- Para $l = 20 \text{ km}$ e considerando que o condutor tem uma bitola de 25 mm^2 , temos:

$$R_L = (1,75 \times 10^{-8} \times 20 \times 10^3) / (\pi (25 \times 10^{-3})^2) = 0,1783 \Omega$$

- Assim, a perda ôhmica de potência (dissipada na LT) será:

$$P_{\text{loss}} = R_L I^2 = 0,1783 \times (30,0)^2 = 160 \text{ MW}$$

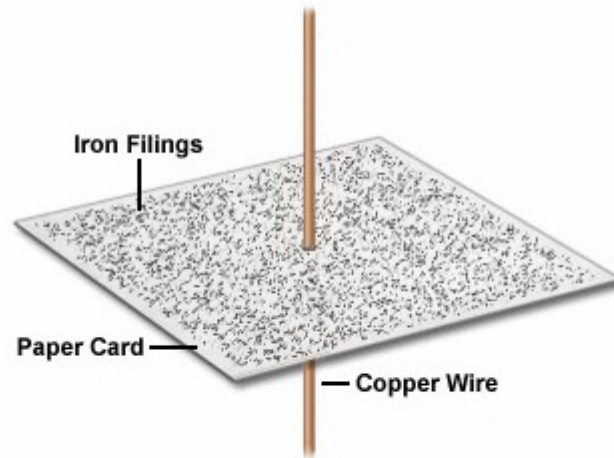
- Esta perda representa:

$$(160/300,0) \times 100 = 53,3\%$$

Ou seja, mais da metade da potência (energia) gerada seria perdida na transmissão.

Revisão (1/6)

■ Produção de um campo magnético.



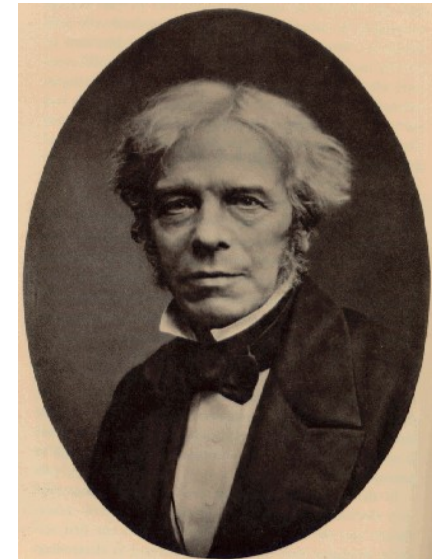
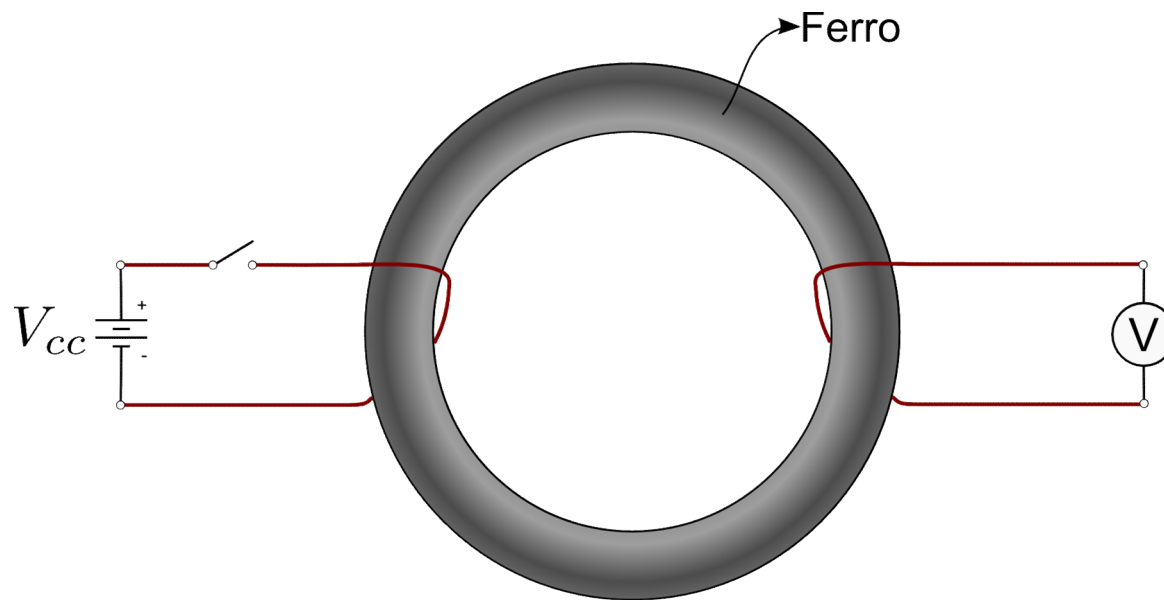
André-Marie Ampère

“Quando um condutor é percorrido por uma corrente elétrica surge em torno dele um campo magnético”

■ Lei circuital de Ampère.

$$\oint_c \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum_{k=1}^n i_k$$

Revisão (2/6)



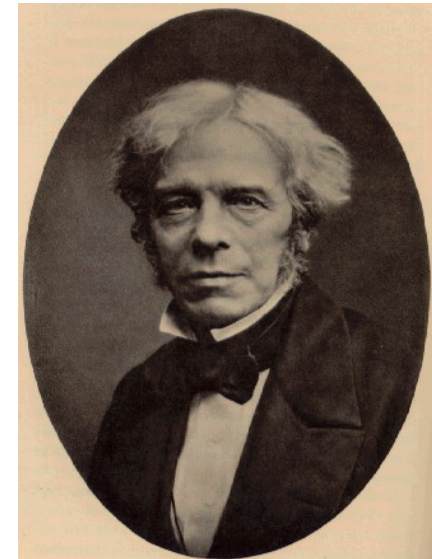
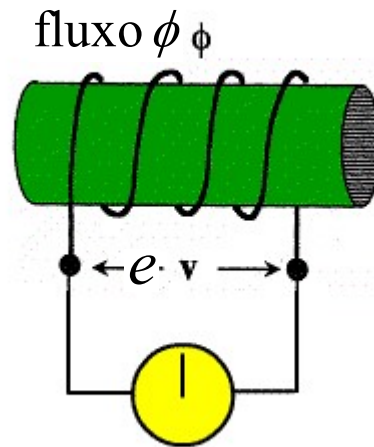
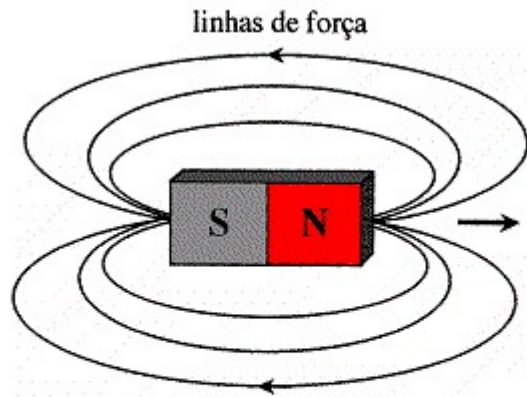
Michael Faraday

Constatações:

- Ocorre um deslocamento do ponteiro do galvanômetro no instante em que a chave é fechada ou aberta (fonte CC).
- Para corrente constante (chave fechada), independentemente de quão elevado seja o valor da tensão aplicada, não há deslocamento do ponteiro.

Revisão (3/6)

■ Lei de Faraday.



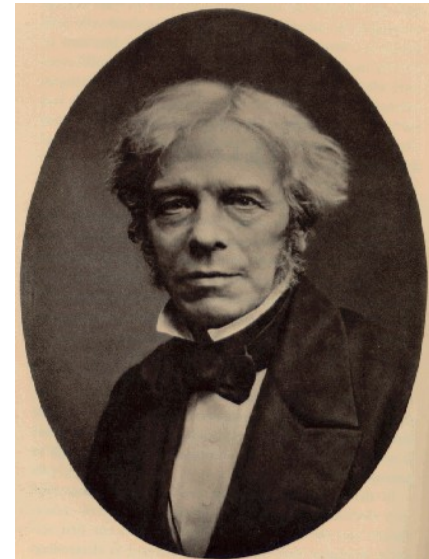
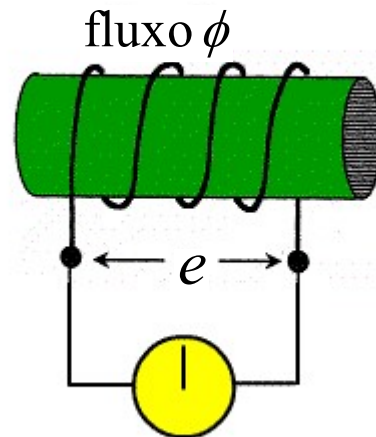
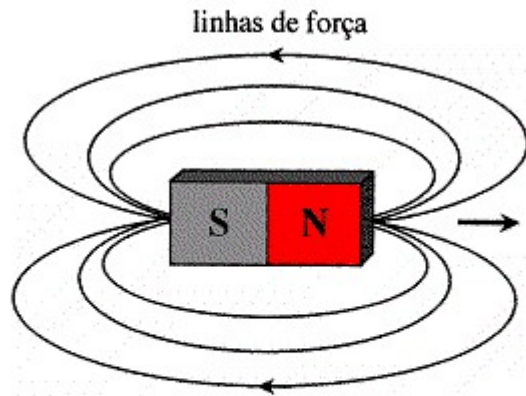
Michael Faraday

Constatações:

- Ao se aproximar ou afastar o ímã do solenóide (bobina) ocorre um deslocamento do ponteiro do galvanômetro.
- Quando o ímã está parado, independentemente de quão próximo este esteja do solenóide, não há deslocamento do ponteiro do galvanômetro.

Revisão (4/6)

■ Lei de Faraday.



Michael Faraday

$$e = \frac{d\phi}{dt}$$

■ A lei de Faraday declara que:

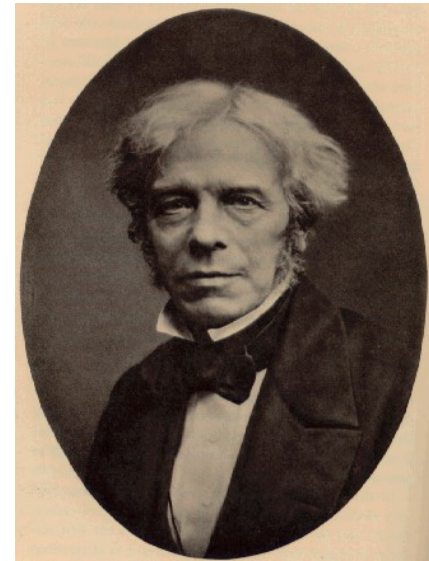
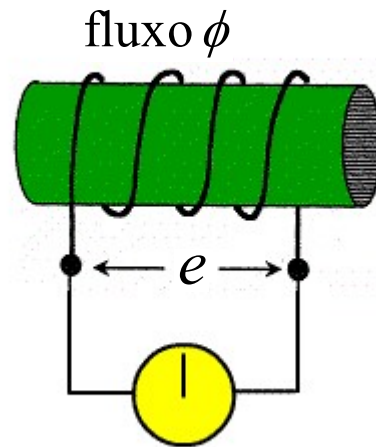
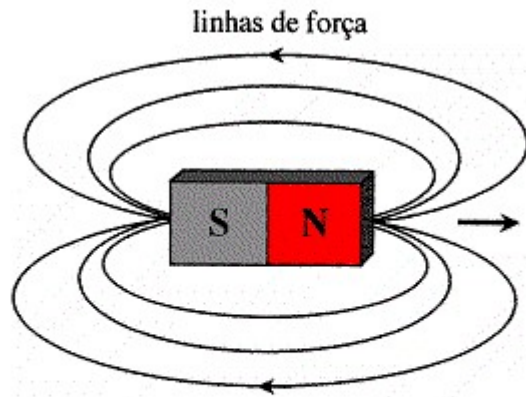
“Quando um circuito elétrico é atravessado por um fluxo magnético variável, surge uma fem (tensão) induzida atuando sobre o mesmo.”

■ A lei de Faraday também declara que:

“A fem (tensão) induzida no circuito é numericamente igual à variação do fluxo que o atravessa.”

Revisão (5/6)

■ Lei de Faraday.



Michael Faraday

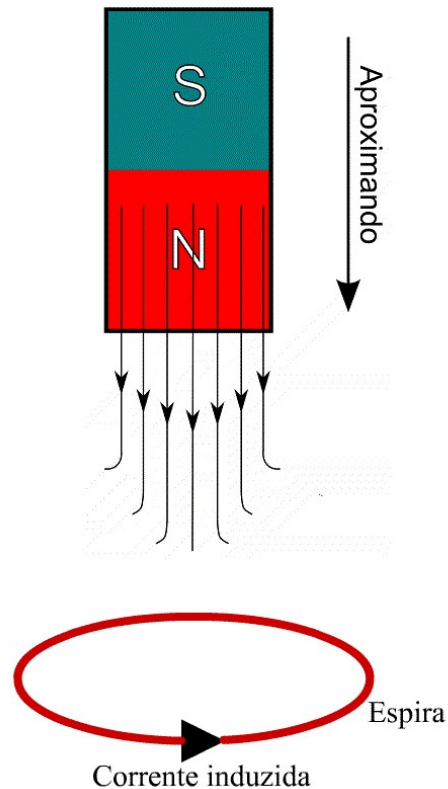
$$e = \frac{d\phi}{dt}$$

Formas de se obter uma tensão induzida segundo a lei de Faraday:

- Provocar um movimento relativo entre o campo magnético e o circuito.
- Utilizar uma corrente variável para produzir um campo magnético variável.

Revisão (6/6)

■ Lei de Lenz.



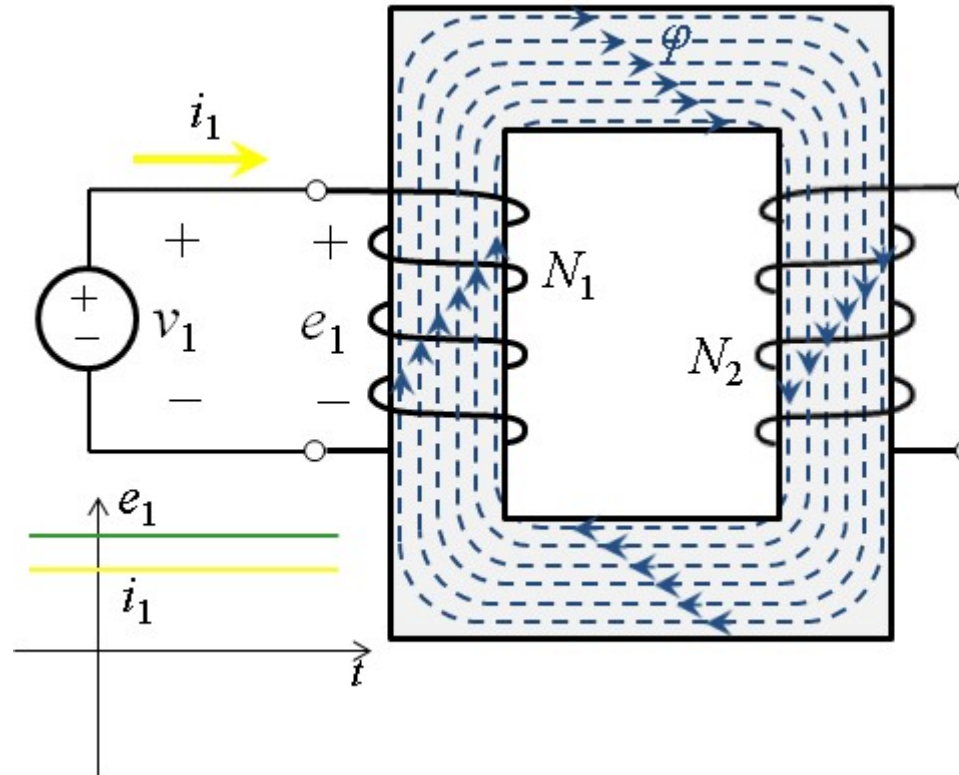
$$e = - \frac{d\phi}{dt}$$



Heinrich Lenz

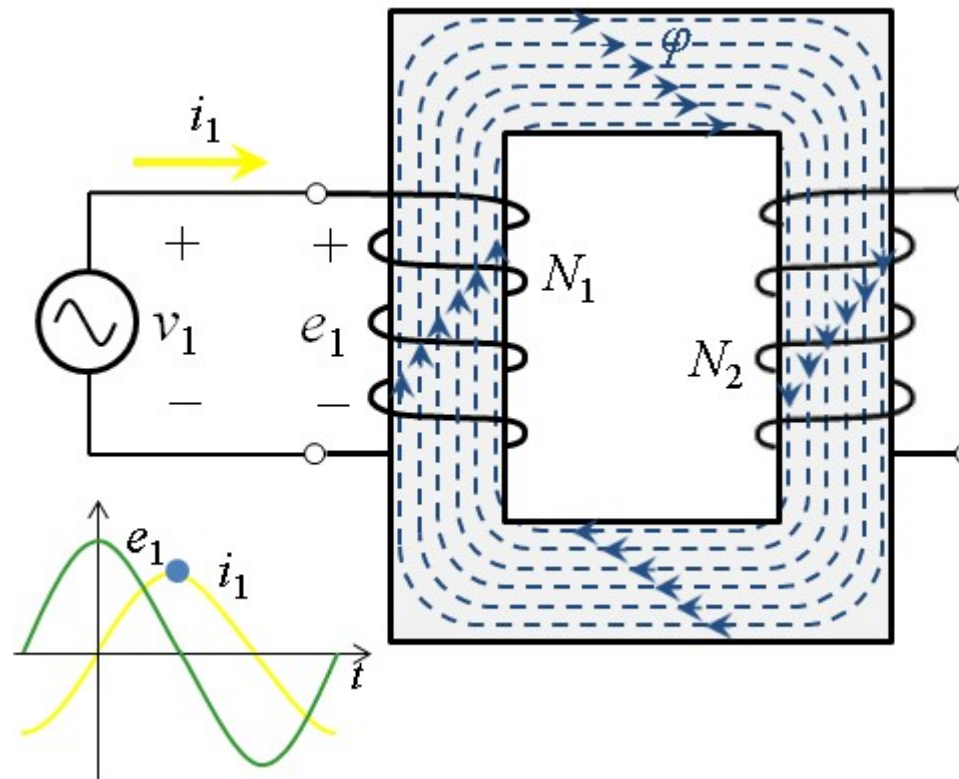
“A tensão induzida em um circuito fechado por um fluxo magnético variável produzirá uma corrente de forma a se opor à variação do fluxo que a criou”

Princípio de funcionamento (1/4)



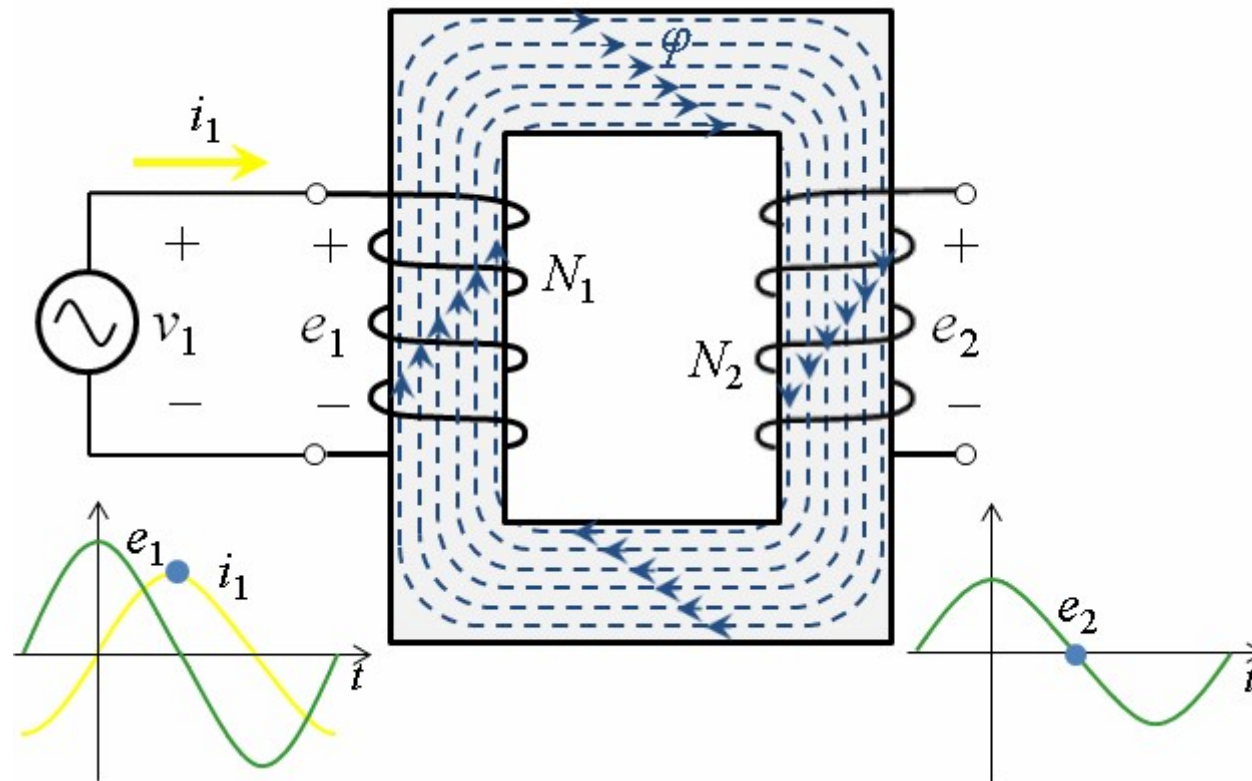
- O que acontece se energizamos a bobina 1 com uma fonte de corrente continua?
- O que observa a bobina 2?

Princípio de funcionamento (2/4)



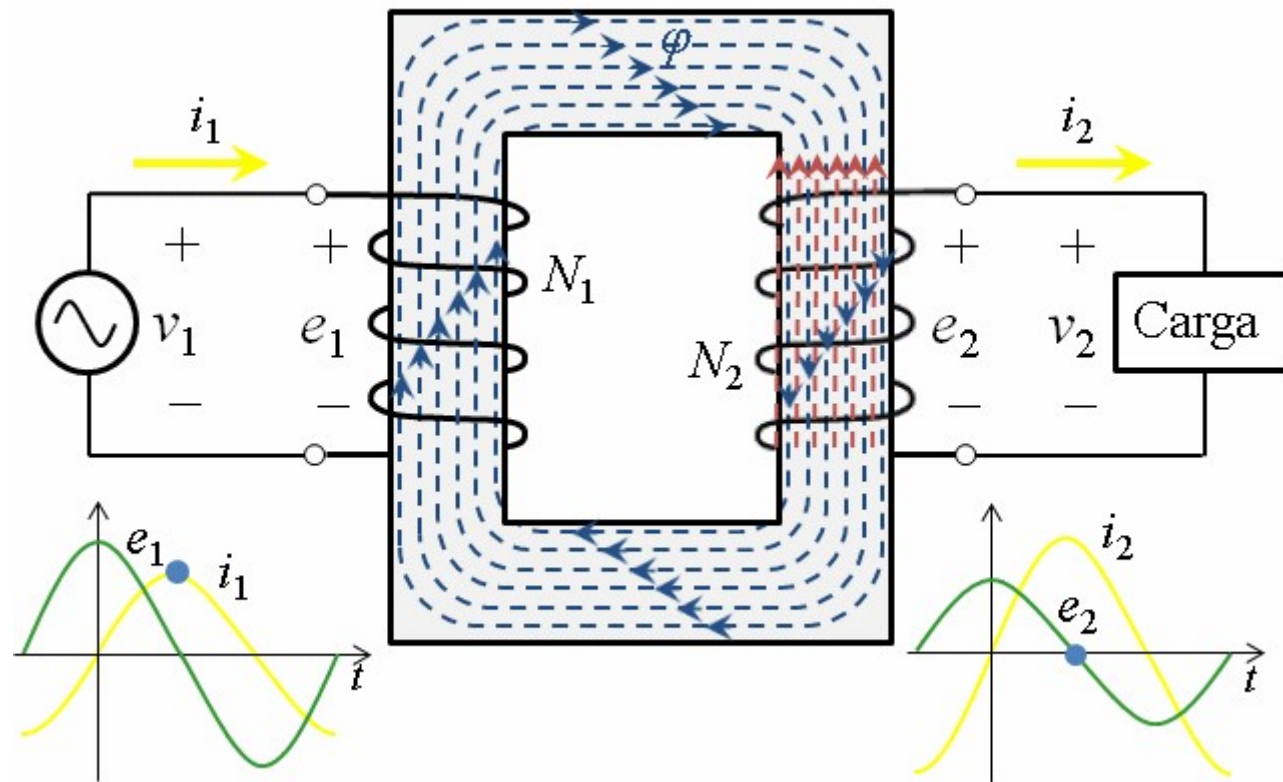
- O que acontece se energizamos a bobina 1 do transformador com uma fonte de corrente alternada?
- O que observa a bobina 2 do transformador?

Princípio de funcionamento (3/4)



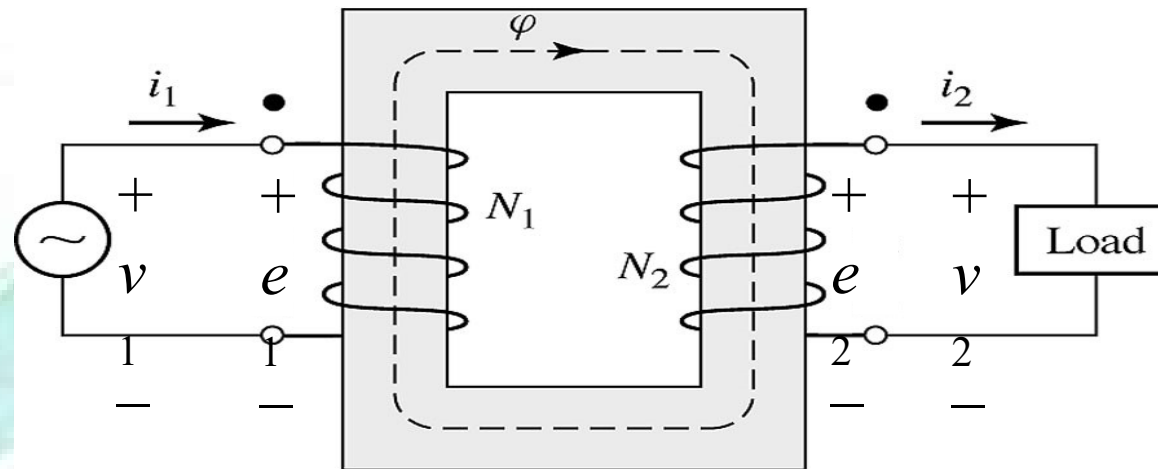
- Pela lei de indução de Faraday, surge uma tensão induzida na bobina 2 do transformador.

Princípio de funcionamento (4/4)

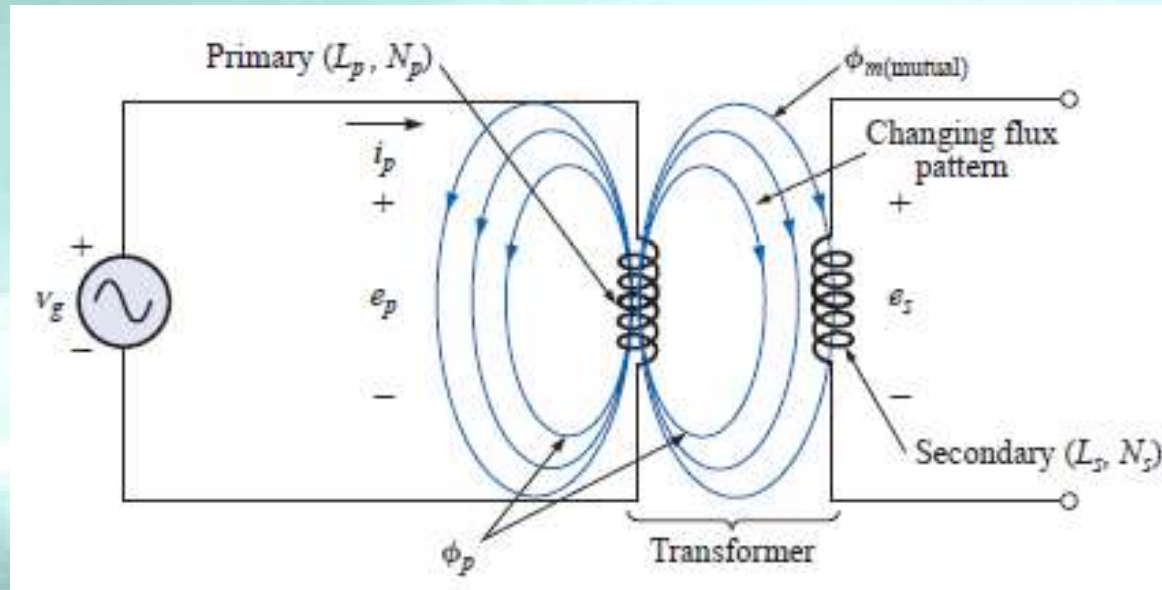


- Se uma carga é conectada na bobina 2 do transformador, uma corrente i_2 circulará pelo mesmo.
- Pela lei de Lenz, o sentido da corrente i_2 é de forma a se opor à variação do fluxo magnético que a criou.

TRANSFORMADOR IDEAL



- A curva de magnetização B-H do núcleo é linear.
- Núcleo com permeabilidade infinita ($\mu = \infty$), ou seja $\mathfrak{R}=0$
- Enrolamento elétrico sem perdas ($r = 0$);
- Perdas no ferro nula;
- Não apresentam fluxo de dispersão.



$$\phi_m = \phi_{m\max} \cos(\omega t)$$

$$e_p(t) = -N_p \frac{d\phi_m(t)}{dt} \rightarrow e_p(t) = N_p \phi \omega \sin(\omega t)$$

$$e_s(t) = -N_s \frac{d\phi_m(t)}{dt} \rightarrow e_s(t) = N_s \phi \omega \sin(\omega t)$$

Equação fundamental do transformador

■ Equação fundamental do transformador

$$\begin{cases} v_1 = e_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt} \\ v_2 = e_2 = N_2 \frac{d\phi}{dt} \end{cases}$$

■ Em valor eficaz tem-se:

$$e_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad \rightarrow \quad E_1 = 4,444 \cdot N_1 \cdot f \cdot B_m \cdot A$$

$$e_2 = N_2 \frac{d\phi}{dt} \quad \rightarrow \quad E_2 = 4,444 \cdot N_2 \cdot f \cdot B_m \cdot A$$

$$E = 4,444 \cdot N \cdot f \cdot B_m \cdot A$$

RELAÇÃO ENTRE TENSÕES INDUZIDAS

$$e_p(t) = \underbrace{N_p \phi \omega}_{V_p \text{ máx}} \text{sen}(\omega t) \quad e_s(t) = \underbrace{N_s \phi \omega}_{V_s \text{ máx}} \text{sen}(\omega t)$$

$$V_p \text{ máx} = \sqrt{2} V_p$$

$$N_p \phi \omega = \sqrt{2} V_p$$

$$N_p \phi 2\pi f = \sqrt{2} V_p$$

$$\frac{N_p}{N_s} = a$$

$$\frac{N_p}{N_s} = \frac{V_p}{V_s}$$

Relação de
transformação

$$V_s \text{ máx} = \sqrt{2} V_s$$

$$N_s \phi \omega = \sqrt{2} V_s$$

$$N_s \phi 2\pi f = \sqrt{2} V_s$$

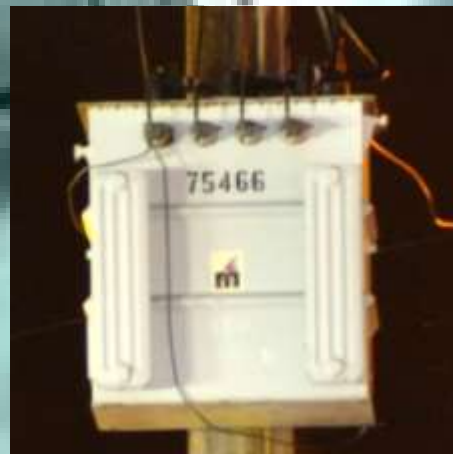
Relação entre
tensões induzidas

CLASSIFICAÇÃO

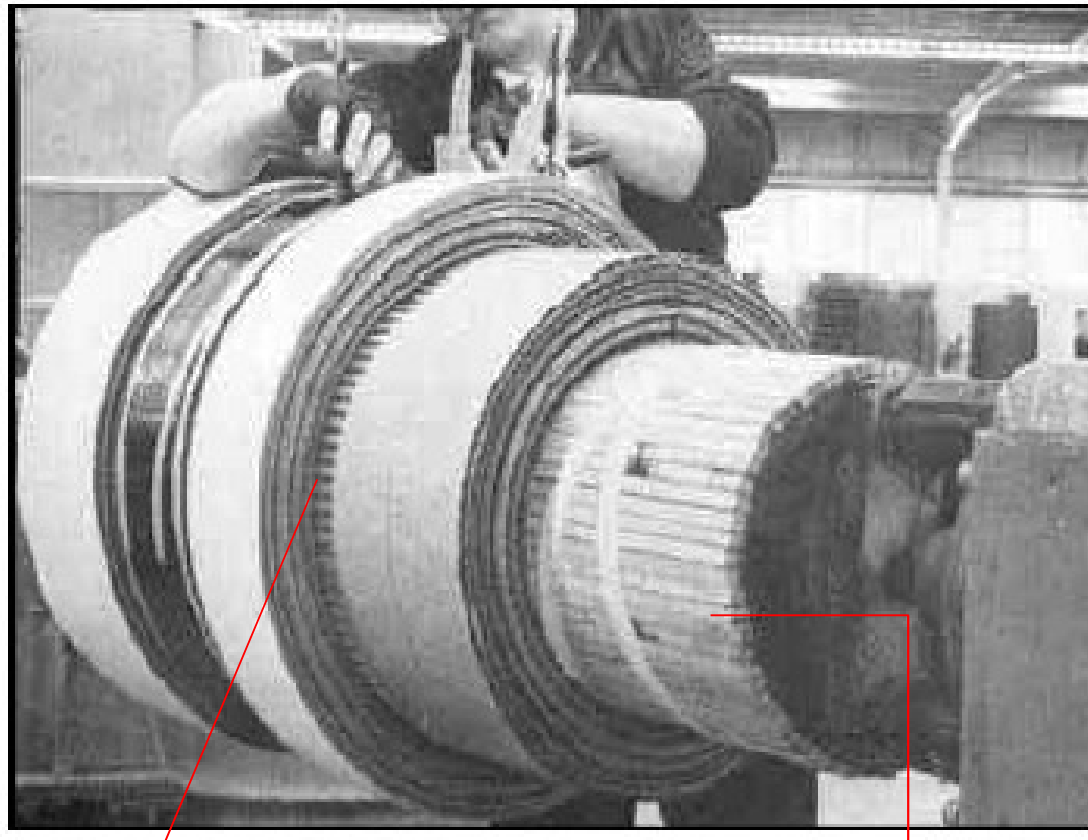
Trafo de potência

Particularmente, recebem ainda uma subclassificação:

- a) Trafo de unidade (geralmente monofásico e de elevação)
- b) Trafo de potência (usado nas subestações, monofásicos ou trifásicos)
- c) Trafo de distribuição (trifásicos usados para distribuir a energia elétrica, abaixadores).



As bobinas (enrolamentos) de um transformador são isoladas eletricamente do núcleo e entre si também através de materiais isolantes especiais.



Enrolamento de um braço de um trafo de potência. Repare na concepção do enrolamento concêntrico (secundário interno, primário externo).

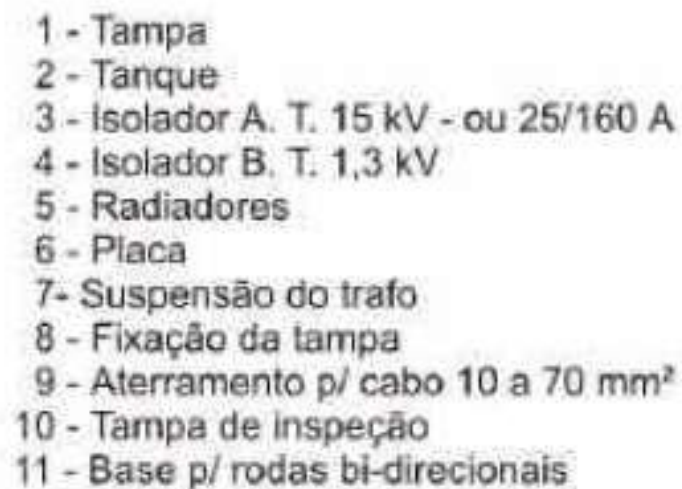
primário

secundário

Os terminais do primário estão identificados com os símbolos H1, H2 e H3 e os terminais do secundário com os símbolos X1, X2 e X3, cada um representando uma das fases. O símbolo X4 ou X0 representa o neutro na ligação ESTRELA

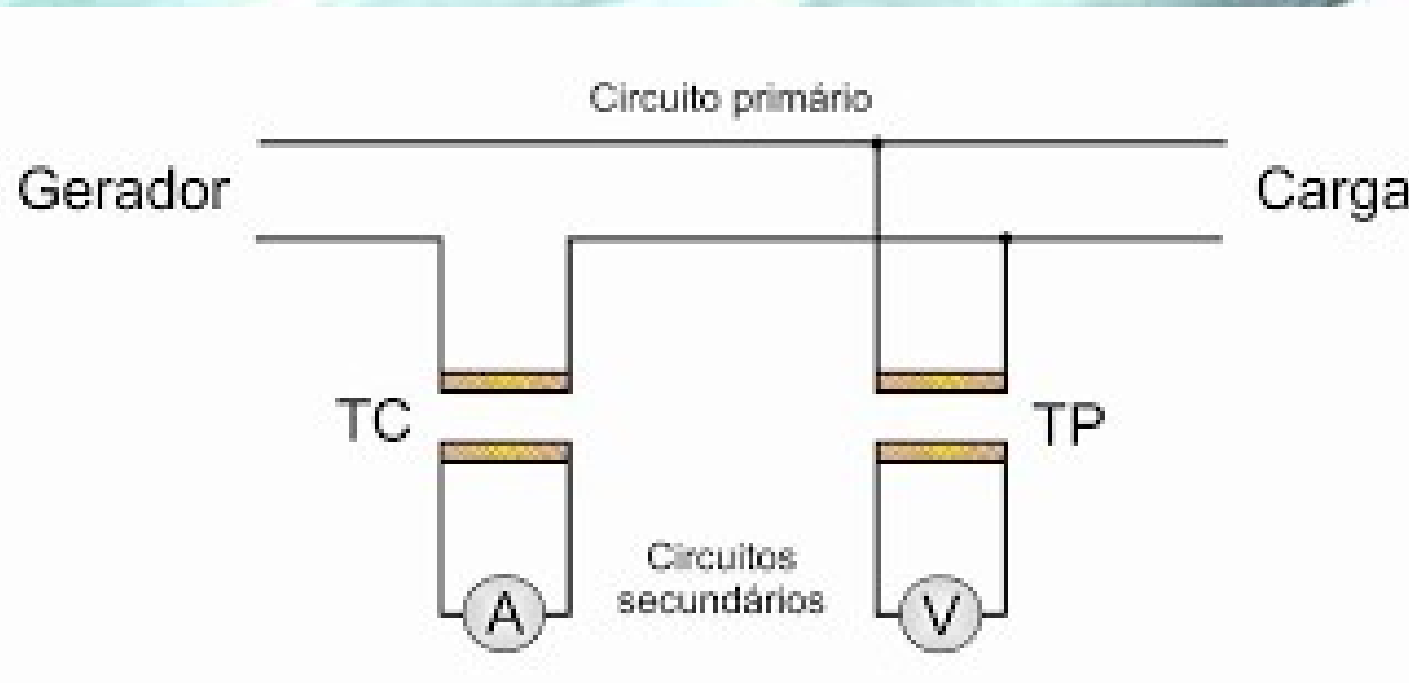
O diagrama mostra um transformador de distribuição com as seguintes características:

- 1 - Tampa:** A tampa superior do tanque.
- 2 - Tanque:** O corpo principal do transformador.
- 3 - Isolador A. T. 15 kV - ou 25/160 A:** O isolador de alta tensão.
- 4 - Isolador B. T. 1,3 kV:** O isolador de baixa tensão.
- 5 - Radiadores:** Os radiadores de resfriamento.
- 6 - Placa:** A placa de identificação.
- 7 - Suspensão do trafo:** O suporte de suspensão.
- 8 - Fixação da tampa:** O mecanismo de fixação da tampa.
- 9 - Aterramento p/ cabo 10 a 70 mm²:** O ponto de aterramento.
- 10 - Tampa de inspeção:** A tampa de inspeção.
- 11 - Base p/ rodas bi-direcionais:** A base com rodas para deslocamento.



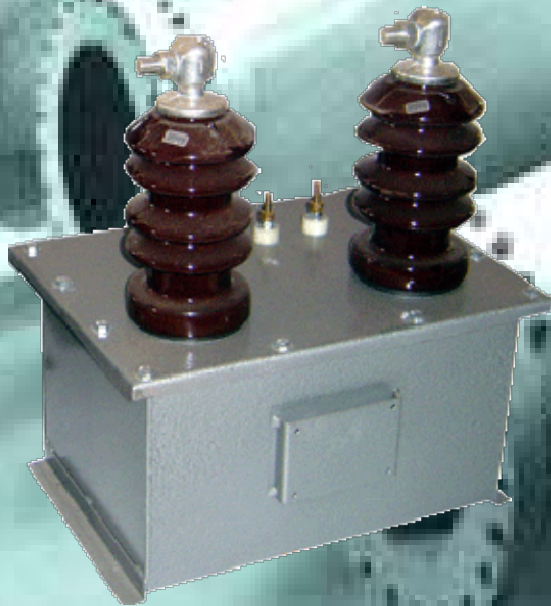
Trafo de medição (corrente ou potencial)

São trafos utilizados para permitir a medição de elevadas tensões e correntes por instrumentos de baixa isolação e pequena suportabilidade. Tipicamente, são conhecidos como *transformadores de potencial (TP)* e *transformadores de corrente (TC)*. O primeiro é utilizado para reduzir a tensão na sua saída, sem se preocupar com a transmissão da potência em si. O segundo, serve para reduzir a corrente dos condutores.



Transformador de potencial (TP)

Possui a tensão nominal de entrada em função da tensão nominal do sistema elétrico ao qual quer se ligar. A tensão de saída, entretanto, pode ser padronizada e geralmente tem valor fixo de 115 V (depende também do fabricante e do sistema). Eles podem ser ligados entre fases ou fase-neutro. Quando se desconecta a carga da sua saída, seus terminais devem ficar em aberto, pois se for ligado um condutor de baixa resistência provocará um curto-circuito franco, suficiente para danificar o equipamento.

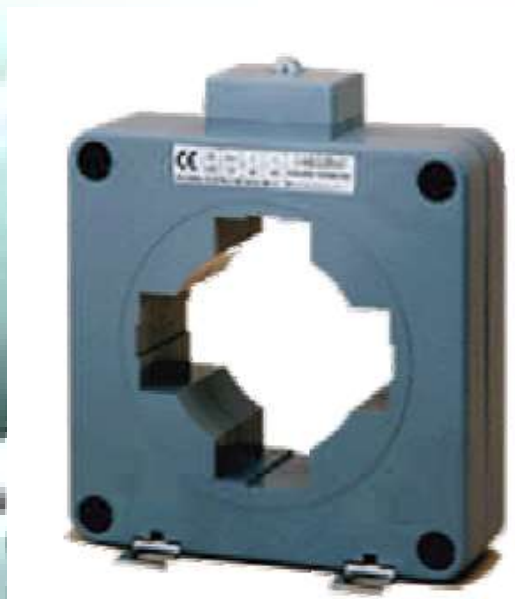


Transformador de corrente (TC)

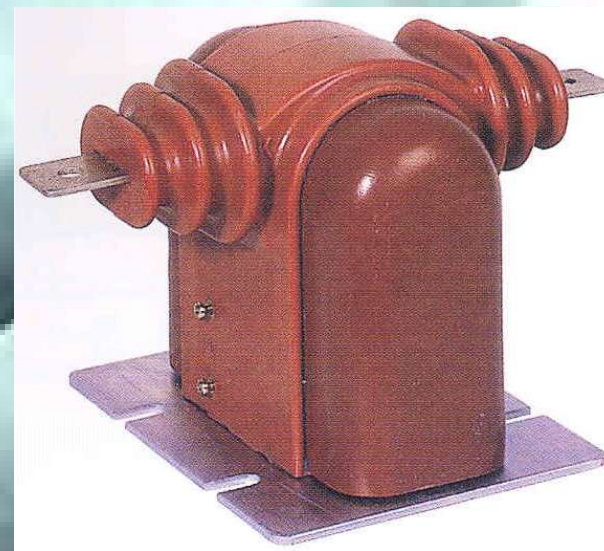
Reduz a corrente que circula nos terminais de entrada para um valor inferior compatível com o instrumento de medição. Esta relação entre a corrente de entrada e saída é conhecida como RTC.



ENROLADO



JANELA



BARRA

Características Elétricas

Potência Nominal

Valor convencional da **potência aparente** que serve de base ao projeto, aos ensaios e às garantias do fabricante, e que determina a corrente nominal que circula, sob tensão nominal, nas condições específicas.

A **potência nominal** de um transformador está limitada pela sua **capacidade de refrigeração**, o que pode ser compreendido facilmente. Assim os transformadores de **pequena potência** podem ser do tipo **transformadores a seco**, com ventilação natural. Já os transformadores de **grande potência** são normalmente transformadores em **banho de óleo**, com ventilação forçada ou não e até mesmo com **circulação forçada do óleo**.

Características Elétricas

Potência Nominal

Por definição, a potência nominal de um transformador trifásico é dada por:

$$S_{trafo} = \sqrt{3} \cdot V_2 \cdot I_{carga}$$

sendo

V_2 à Tensão do secundário (fase-fase) (V)

I_{carga} à Corrente da carga conectada (A)

S_{TRAFO} à Potência dada em Volt-Ampere (VA)

Toda potência aparente (VA) entregue a um transformador é, na prática, considerada a mesma que sua carga recebe. Logo, podemos definir um trafo (grosseiramente) como um "passador" de potência.

Características Elétricas

Tensão Nominal

É a tensão que se aplica aos terminais de linha dos enrolamentos do transformador. No caso de transformadores trifásicos, tipo de distribuição (abaixador), a tensão primária deve ser a mesma da rede de alimentação (fase-fase). Neste caso, as bobinas primárias devem estar ligadas em delta (triângulo) para coincidirem com a tensão de linha da rede. Se ligadas em estrela, a tensão nominal dos enrolamentos é $\sqrt{3}$ inferior à tensão nominal do trafo.

Corrente Nominal

É a corrente que circula nos terminais dos enrolamentos. Seu valor é calculado por:

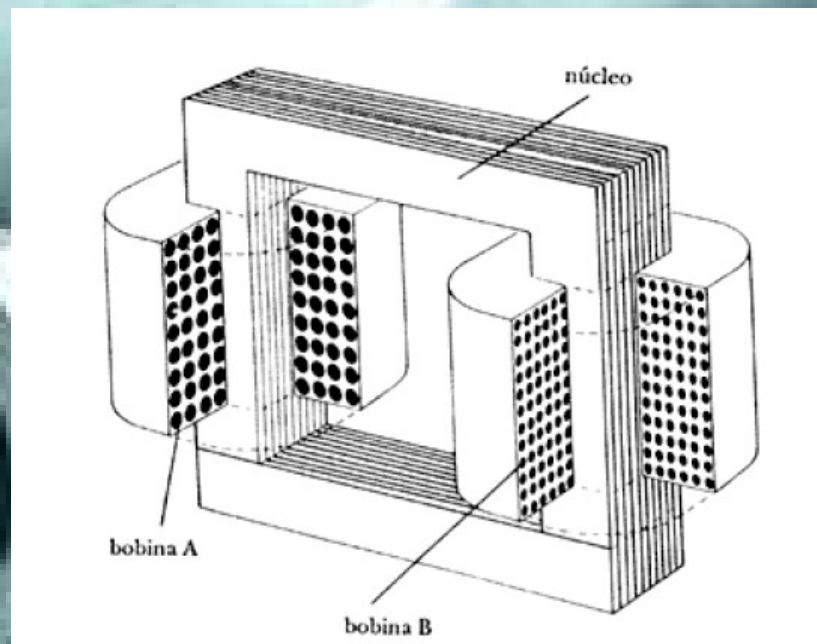
$$I = \frac{S_{trafo}}{\sqrt{3} V}$$

Sendo

S a potência nominal do transformador trifásico (em kVA) e V a tensão entre os terminais de linha do trafo (em kV).

Princípio de Funcionamento dos Transformadores

O funcionamento dos transformadores baseiam-se nos fenômenos da mútua indução entre dois circuitos eletricamente isolados, mas magneticamente acoplados. Para que o acoplamento magnético entre os dois circuitos seja o mais perfeito possível, é necessário que estes estejam enrolados sobre um núcleo de material magnético de pequena relutância (elevada permeabilidade - μ).



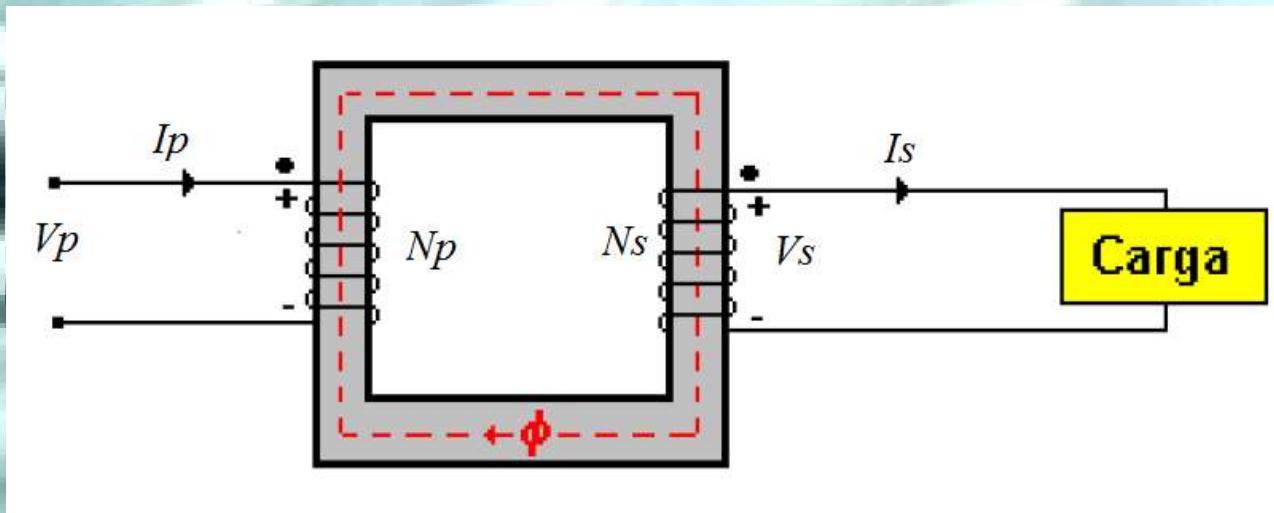
RELAÇÃO ENTRE CORRENTES INDUZIDAS

Sabe-se que a potência aparente (S) entregue a um transformador é igual a potência aparente que ele entrega a carga acoplada.

$$S_P = S_S$$

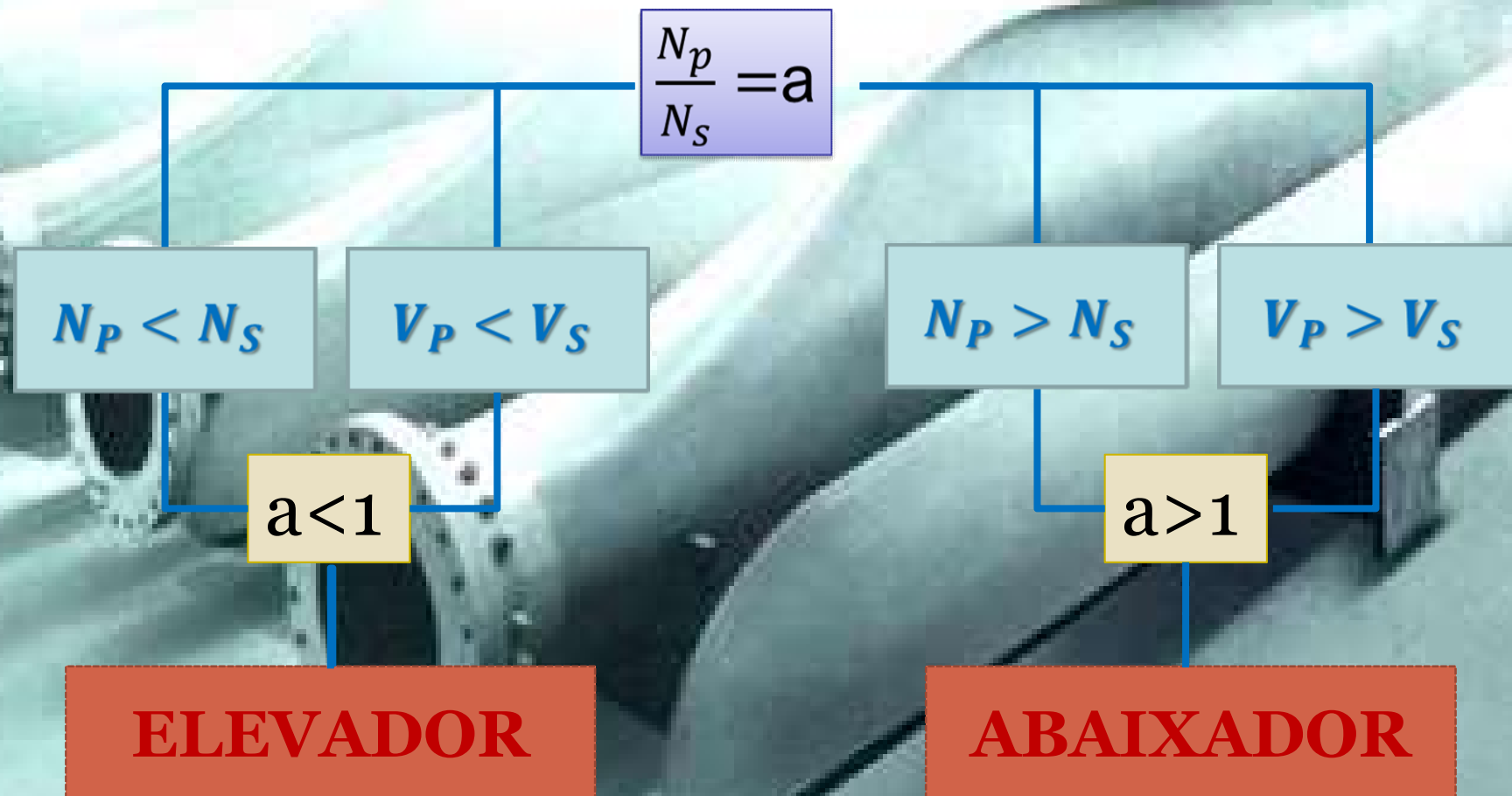
$$V_P \cdot I_P = V_S \cdot I_S$$

$$\frac{I_S}{I_P} = \frac{V_P}{V_S} = a$$



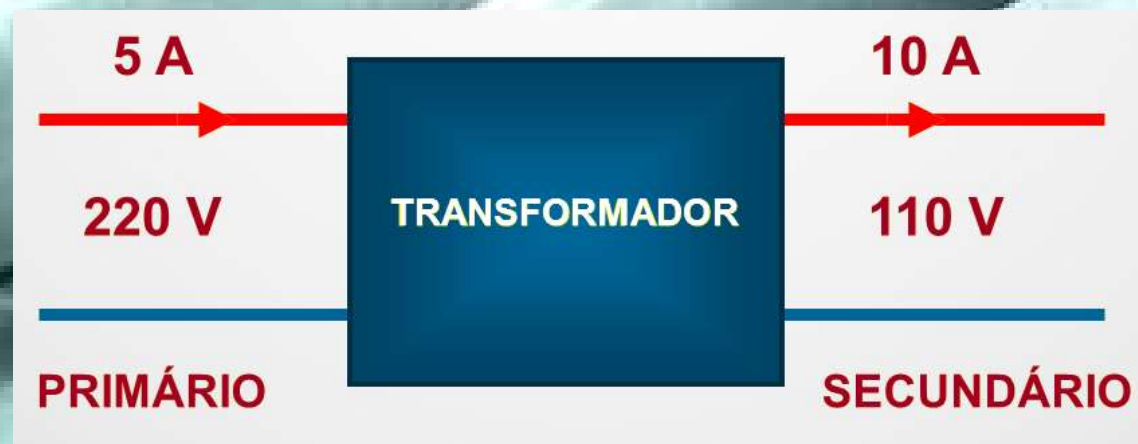
RELAÇÃO DE TRANSFORMAÇÃO (a)

A partir da relação de transformação o trafo pode ser classificado em elevador ou abaixador





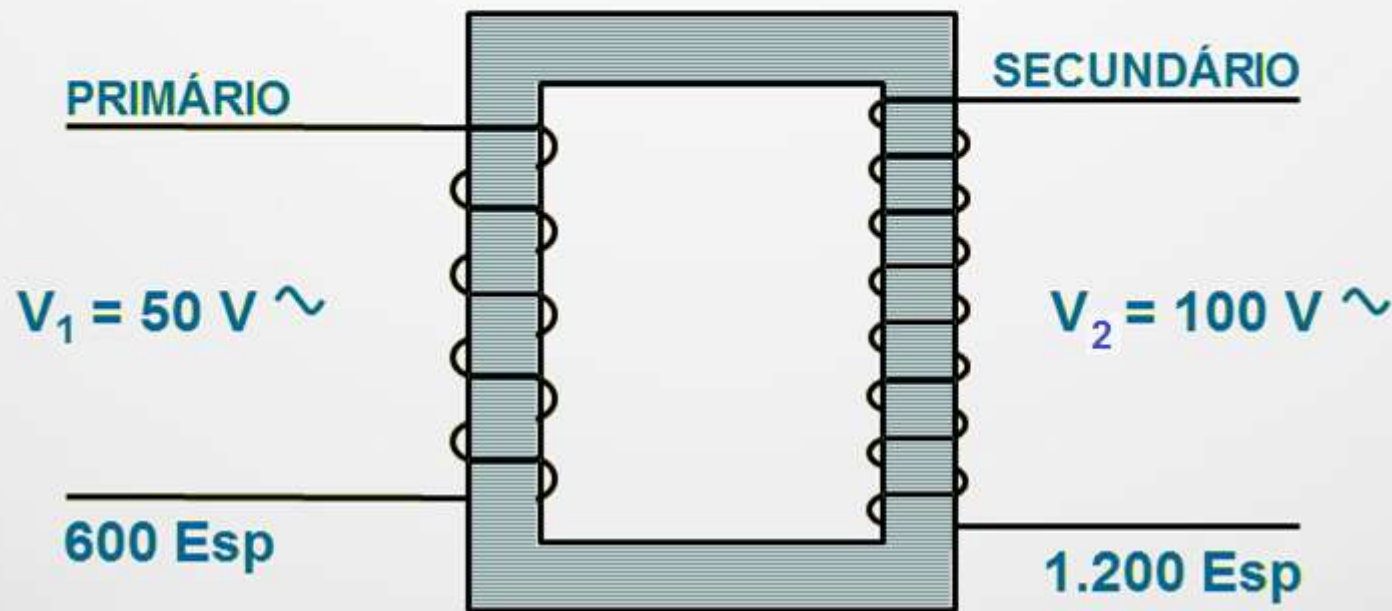
ELEVA A TENSÃO E ABAIXA A CORRENTE



ABAIXA A TENSÃO E ELEVA A CORRENTE

Elevador de tensão

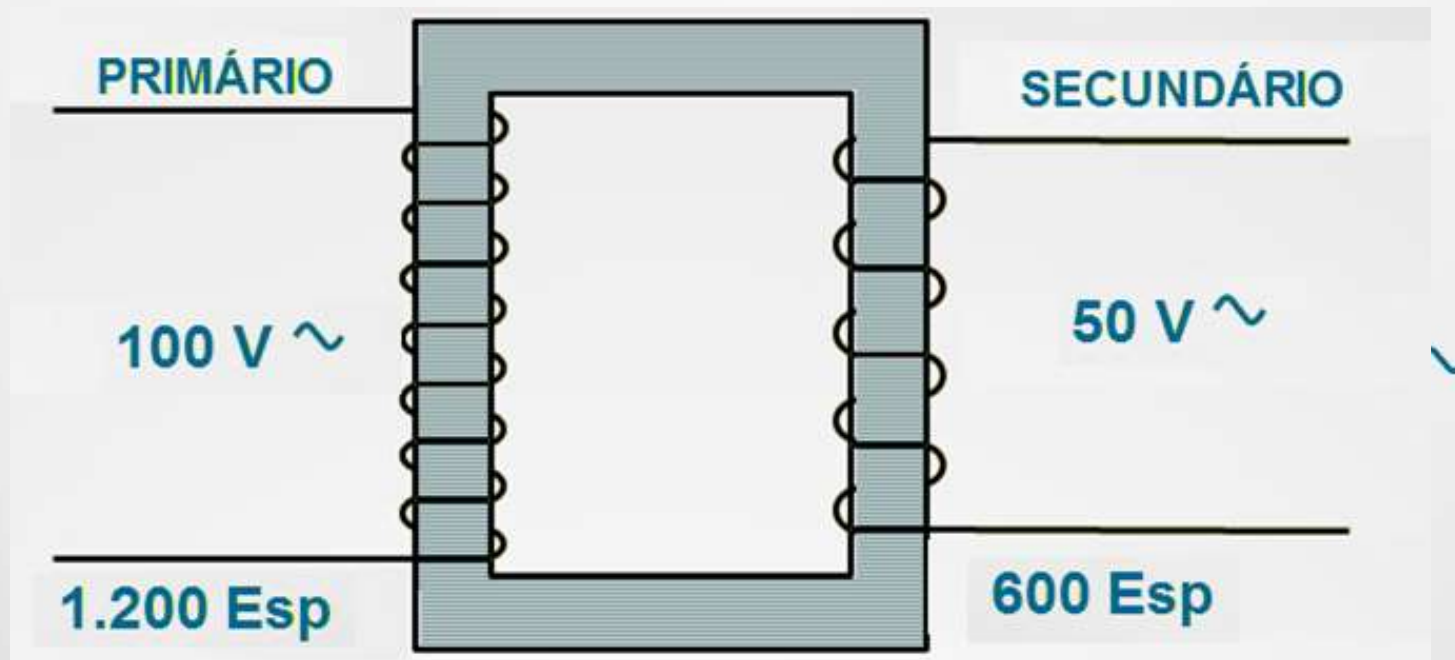
Mais espiras no secundário que no primário



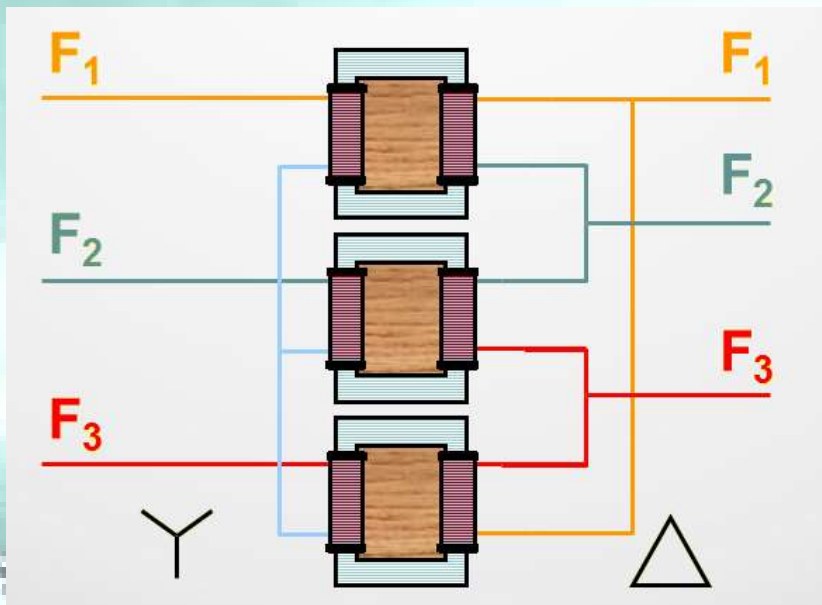
$$N_S > N_P$$

Abaixador de tensão

Mais espiras no primário que no secundário

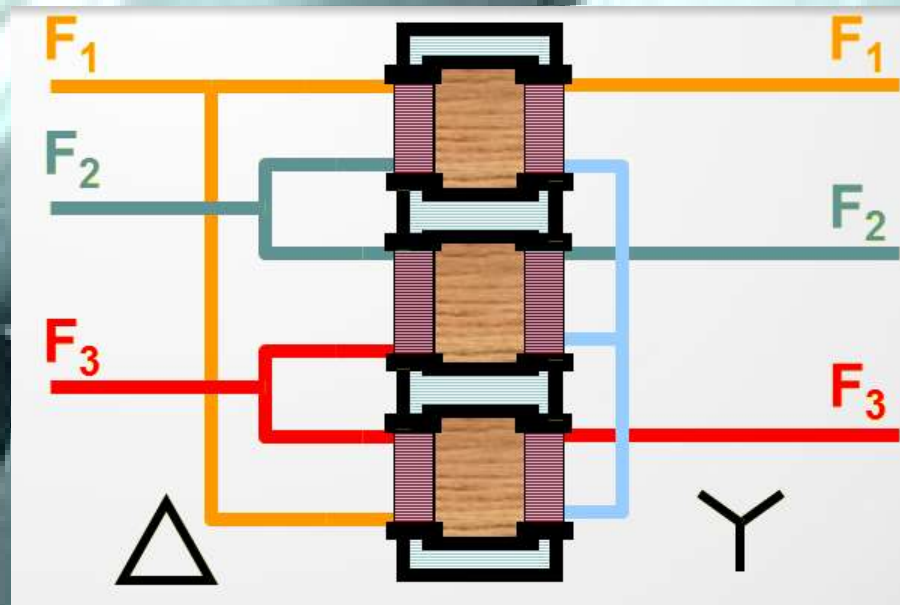


$$N_P > N_S$$



**PRIMÁRIO EM ESTRELA E
SECUNDÁRIO EM DELTA**

**PRIMÁRIO EM DELTA E
SECUNDÁRIO EM
ESTRELA**



Impedância de Transformação

Dos conceitos de circuitos elétricos, viu-se que a impedância Z de um elemento ou carga é definida pela razão do fasor Tensão V pelo fasor Corrente I .

$$Z_L = \frac{V_L}{I_L} = \frac{V_2}{I_2}$$

Visto o circuito magnético pelo lado do primário, é possível representar a impedância que está do lado do secundário (Z_S) para o lado do primário (Z_P).

$$Z_S = \frac{V_S}{I_S} = \frac{\frac{V_P}{a}}{aI_P} = \frac{V_P}{a} \cdot \frac{1}{aI_P} = \frac{Z_P}{a^2}$$

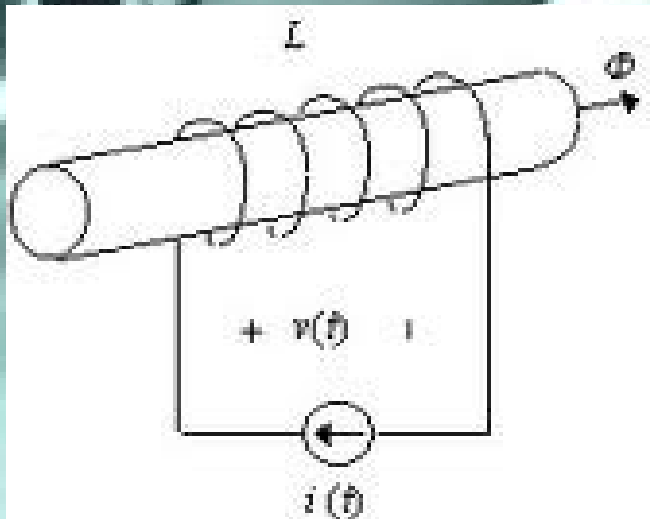
$$Z_p = a^2 Z_s$$

ESTA RELAÇÃO REVELA QUE O TRAFÓ PODE SER UTILIZADO COMO ELEMENTO DE ACOPLAMENTO DE IMPEDÂNCIAS DE MODO A PROVER MÁXIMA POTÊNCIA TRANSFERIDA.

Indutância Própria

Considere uma bobina de N espiras sendo percorrida por uma corrente elétrica. A passagem desta corrente dá origem a um fluxo magnético que corta as próprias espiras da bobina, induzindo uma força eletromotriz (fem) nela mesma. Na verdade, trata-se de uma **força contra-eletromotriz (fcem)**, pois o fenômeno obedecerá a lei de Lenz. Logo, esta capacidade que um condutor tem de induzir tensão em si mesmo, quando a corrente variar ao longo do tempo, chama-se de **auto-indução**.

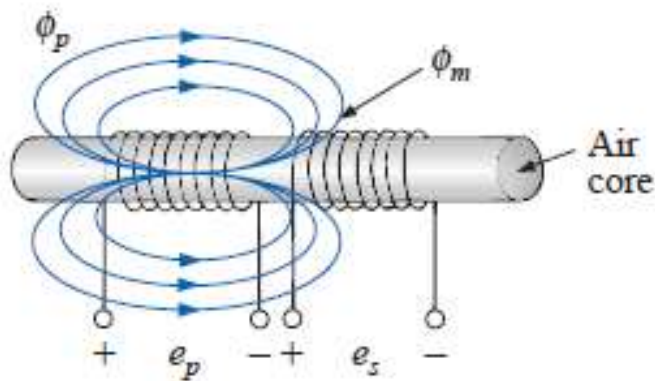
Como ela ocorre sobre uma bobina que possui uma característica indutiva (indutância L), esta indutância chamamos de **indutância própria**. Sua definição matemática advém das próprias tensões induzidas na bobina, ou seja:



$$L = N \frac{d\phi}{di}$$

Indutância Mútua

Quando duas bobinas estão próximas uma da outra e circulando correntes nelas, parte do fluxo produzido por uma delas irá cortar as espiras da outra e vice-versa. Neste caso, diz-se que as bobinas estão *mutuamente acopladas*.



$$M = N_s \frac{d\phi_m}{di_p}$$

$$M = N_p \frac{d\phi_p}{di_s}$$

Como existe fluxo magnético de uma bobina provocando um efeito indutivo sobre a outra e vice-versa, haverá uma influência magnética mútua entre si. Este fluxo mútuo podemos dizer que é produzido por uma indutância específica ($L_m = M$) de cada lado do sistema. Esta indutância dizemos que é uma **Indutância Mútua**

$$M_{PS} = M_{SP}$$

Coeficiente de acoplamento (k)

Relação de acoplamento das indutâncias próprias e mútua entre duas bobinas. Quanto mais próximo da unidade, maior é o acoplamento magnético entre as bobinas, o que significa um sistema mais eficiente, com menores perdas e dispersão magnética.

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_P L_S}}$$

O valor de k é diretamente independente do número de espiras, sendo apenas dependente das indutâncias próprias e mútua envolvidas.

Num transformador ideal, $k = 1$.

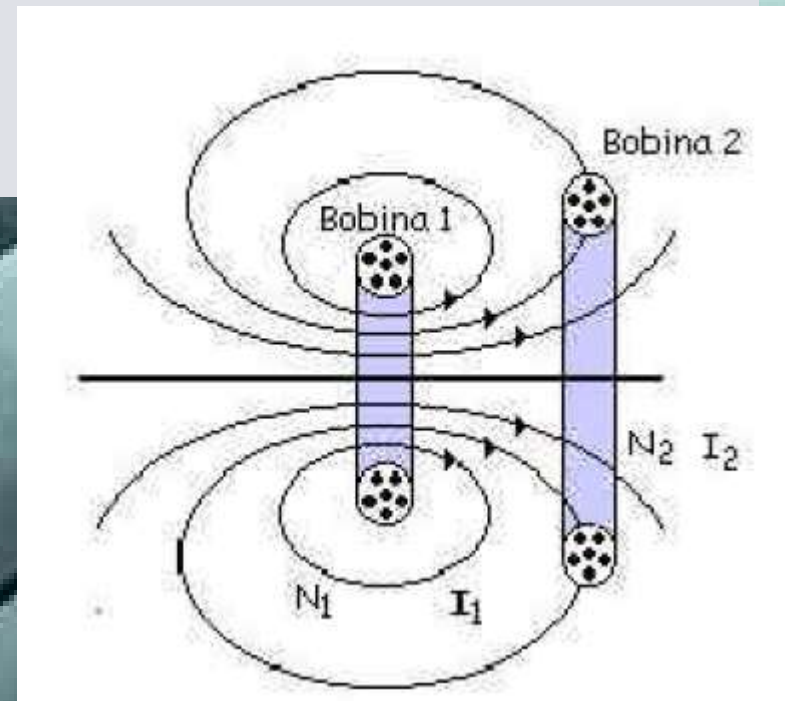
Um sistema de potência monofásico possui um gerador simples de 480V - 60 Hz fornecendo potência para uma carga com $Z_L = 4 + j3 \text{ W}$ através de uma linha de transmissão (LT) de impedância $Z_{LT} = 0,18 + j0,24 \text{ W}$. Responda:

- a) Se o sistema de potência é descrito exatamente como acima, calcule a tensão que chega até a carga no final da linha.
- b) Quais são as perdas na linha de transmissão ?
- c) Supondo que um trafo com $a = (1/10)$ seja colocado logo após o gerador e um outro com $a = 10$ logo antes a carga. Qual será a tensão na carga agora ?
- d) Qual será o valor das perdas para a segunda situação ?

As bobinas 1 e 2 da figura abaixo são colocadas próximas uma da outra e possuem 200 e 800 espiras, respectivamente. Uma variação de corrente de 2,0 A na bobina 1 produz uma variação de fluxo de $2,5 \cdot 10^{-4}$ Wb na bobina 1 e $1,8 \cdot 10^{-4}$ Wb na bobina 2.

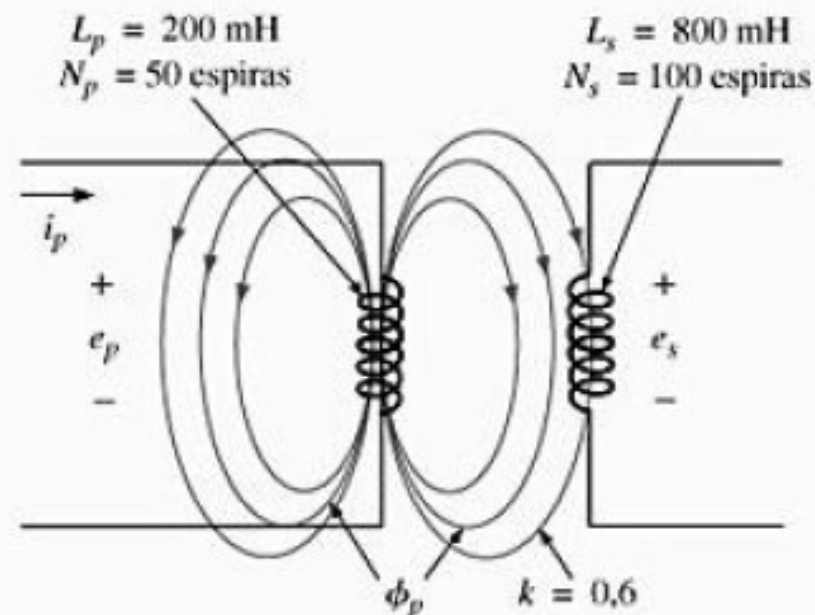
Determine:

- a) A indutância própria da bobina 1;
- b) A indutância mútua ;
- c) O coeficiente de acoplamento;
- d) A corrente induzida na bobina 2.



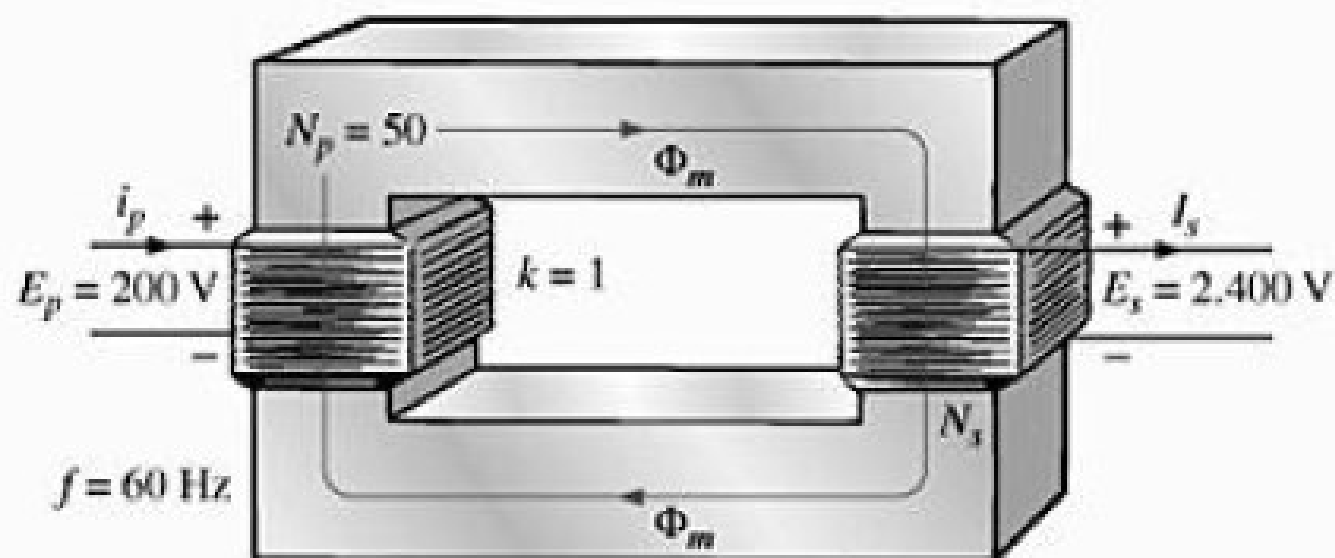
Para o transformador visto na Figura 21.3:

- Determine a indutância mútua M .
- Determine a tensão induzida e_p se o fluxo ϕ_p variar a uma taxa de 450 mWb/s.
- Determine a tensão induzida e_s para a mesma taxa de variação do fluxo ϕ_p do item (b).
- Determine as tensões induzidas e_p e e_s se a corrente i_p variar a uma taxa de 0,2 A/ms.

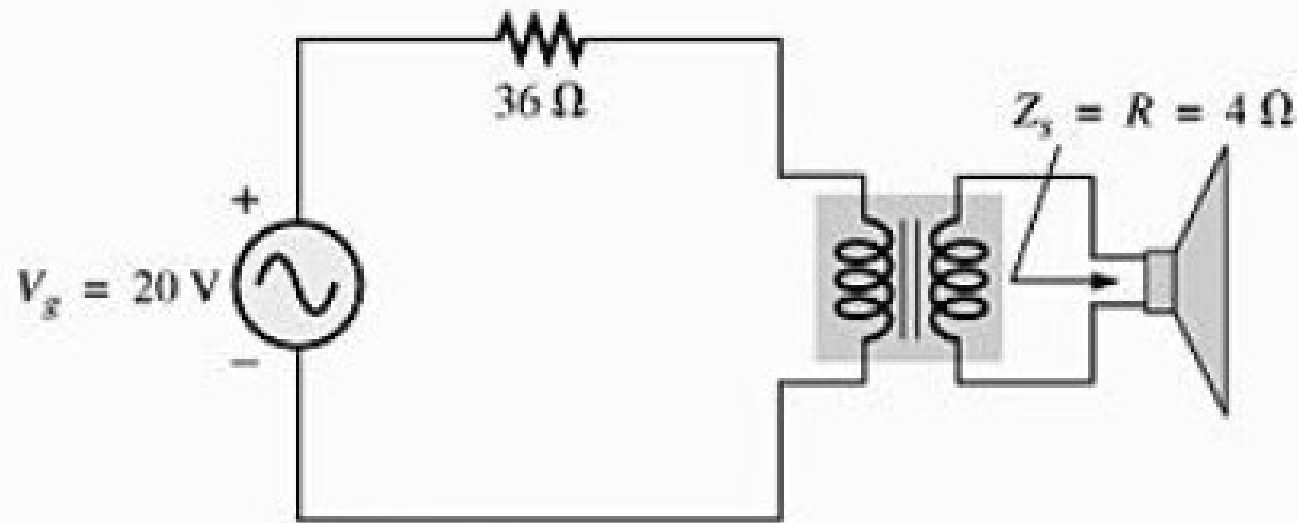


Para o transformador de núcleo de ferro da Figura 21.5, determine:

- O fluxo máximo Φ_m .
- O número de espiras do secundário, N_s .

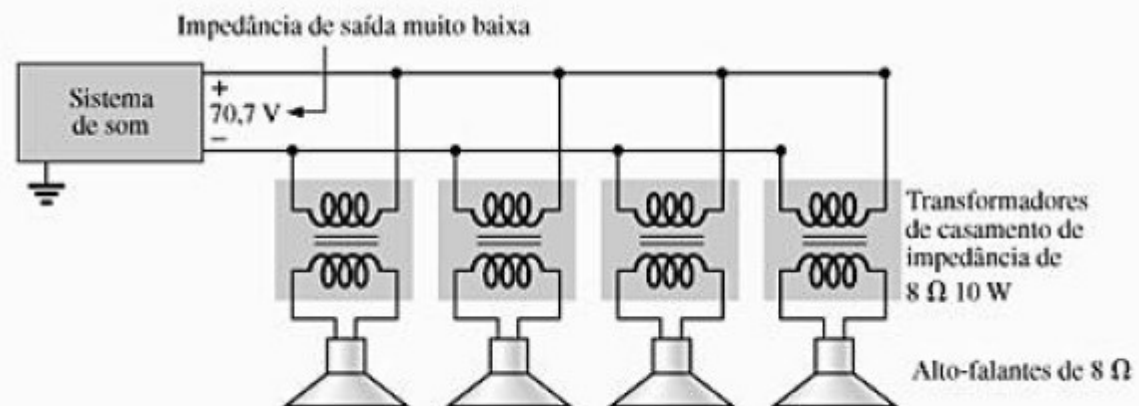


13. a. Para o circuito visto na Figura 21.58, determine a relação de transformação necessária para que a potência fornecida ao alto-falante seja máxima.
- b. Calcule a potência máxima fornecida ao alto-falante.

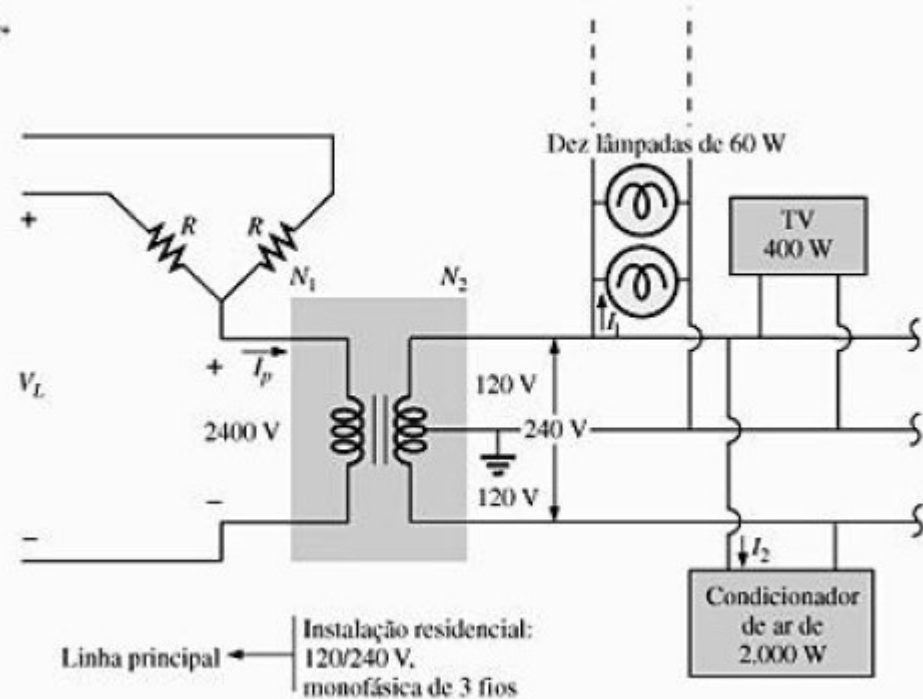


Os transformadores de casamento de impedâncias também são muito usados em sistemas de som como o que é ilustrado na Figura 21.10. Embora o sistema tenha apenas um par de terminais de saída, de um a quatro alto-falantes podem ser ligados ao sistema. Cada alto-falante de $8\ \Omega$ é conectado à linha de $70,7\ \text{V}$ por um transformador de áudio para casamento de impedâncias de $10\ \text{W}$ (a faixa de operação linear deste transformador é a faixa de áudio).

- Se cada um dos alto-falantes no circuito mostrado na Figura 21.10 pode receber no máximo $10\ \text{W}$, qual o valor máximo da potência fornecida pela fonte?
- Para cada alto-falante, determine a impedância de entrada do transformador se todos os alto-falantes estão operando no limite de potência ($10\ \text{W}$).
- Determine a relação de espiras dos transformadores.
- Qual é a tensão e a corrente no alto-falante quando a potência dele for $10\ \text{W}$?
- Qual é a carga, do ponto de vista da fonte, quando se conecta ao circuito um, dois, três falantes?



-
- Diagrama de um sistema de distribuição de energia elétrica com 3 fios. O sistema possui uma tensão nominal de 240 V entre os fios de fase e um aterramento de 120 V. A carga total conectada inclui dez lâmpadas de 60 W cada, uma TV de 400 W e um condicionador de ar de 2.000 W. As correntes I_1 e I_2 são indicadas no diagrama.



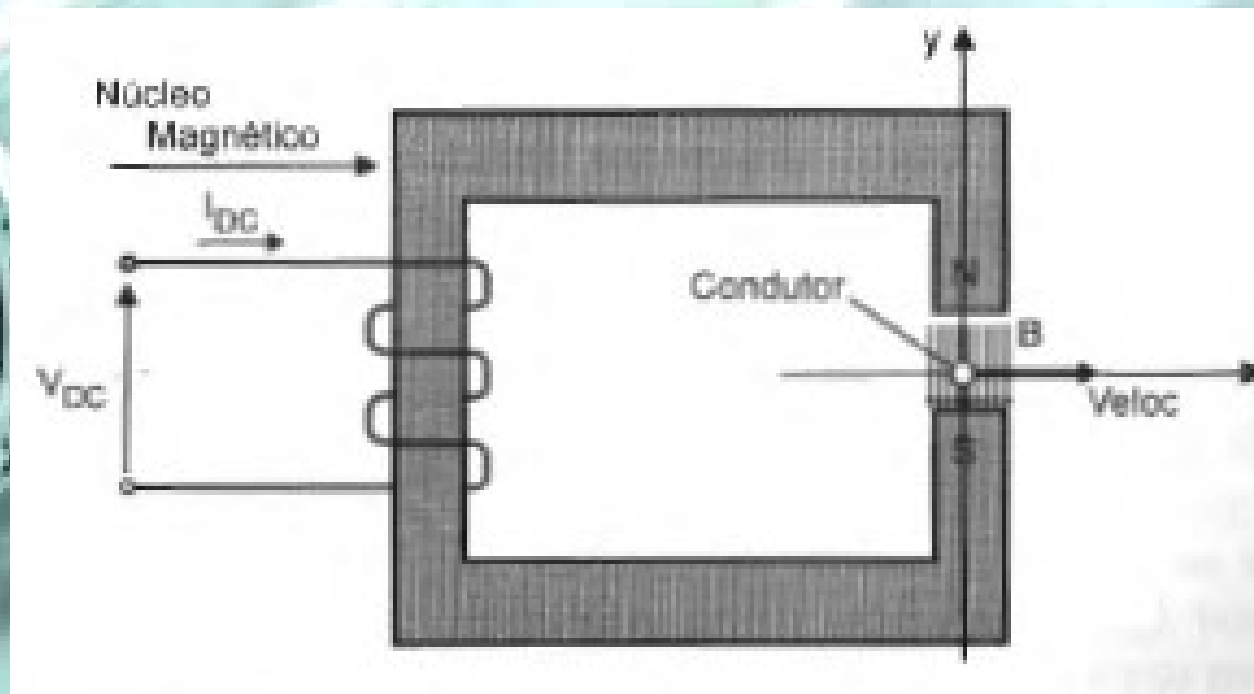
CONVERSÃO DE ENERGIA

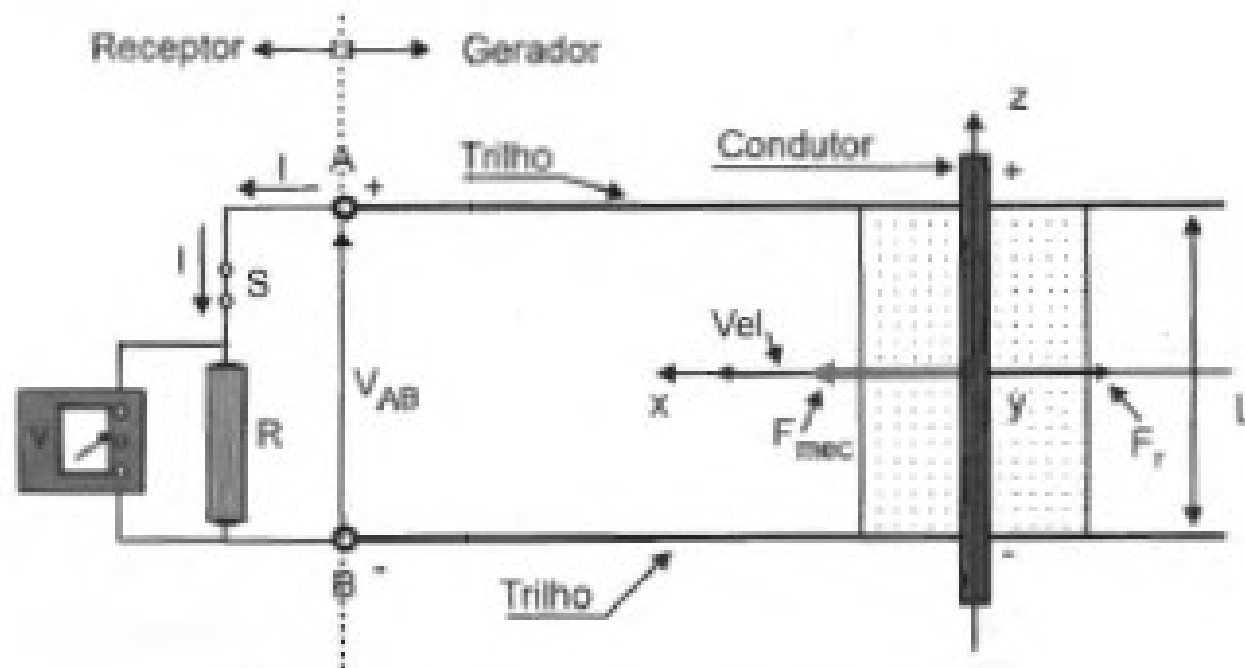


Prof. Dr. Giuliano Pierre Estevam

FORÇA ELETROMOTRIZ MOCIONAL

FORÇA ELETROMOTRIZ OBTIDA A PARTIR DO MOVIMENTO RELATIVO DE UM
CONDUTOR NO INTERIOR DE UM CAMPO MAGNÉTICO





$$E_{mec} = E_{el}$$

$$f_{mec} \cdot \Delta x = R \cdot I^2 \cdot \Delta t$$

$$f_{mec} \cdot V_{rel} = R \cdot I^2$$

$$Emec = fmg . \Delta x$$

$$E . I . \Delta t = fmg . \Delta x$$

$$\frac{\Delta \phi}{\Delta t} . I . \Delta t = fmg . \Delta x$$

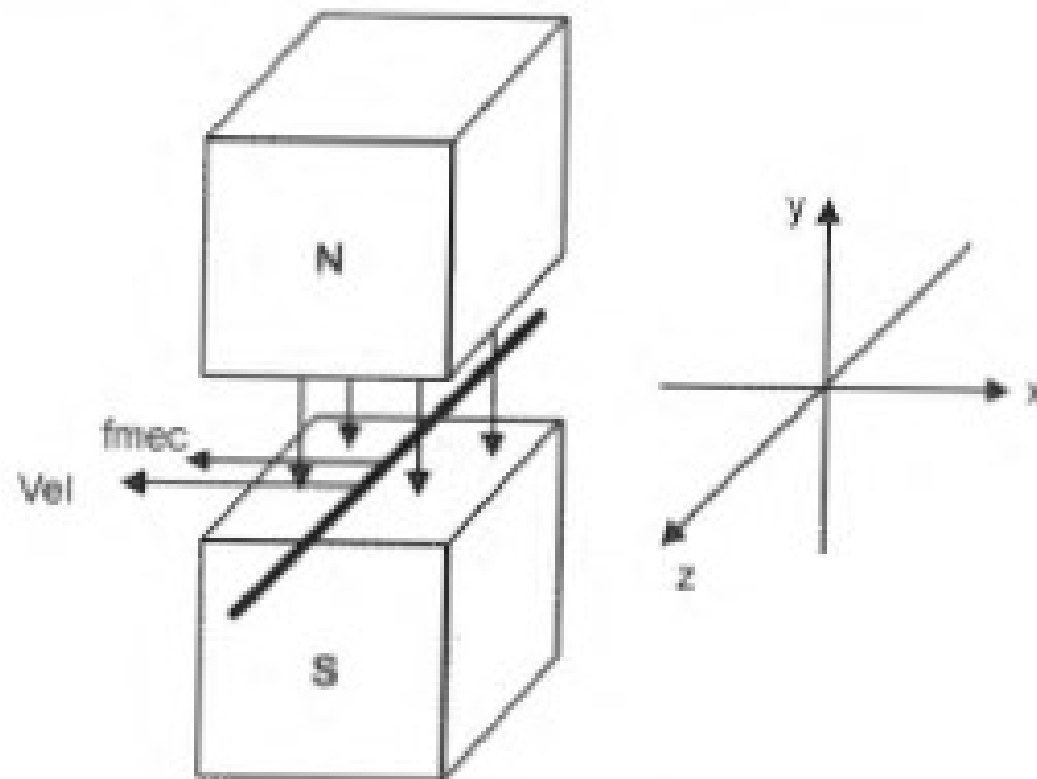
$$B . A . I = fmg . \Delta x$$

$$B . L . \Delta x . I = fmg . \Delta x$$

$$fmg = B . I . L$$

**FORÇA
FRENANTE**

Um campo magnético criado entre duas peças polares (NORTE e SUL), como as mostradas na Figura 3.8, opera com uma densidade de campo magnético B igual a 4500 Gauss. Um condutor de comprimento $L = 0,5$ m viaja nesse campo com velocidade $Vel = 20$ m/s. Despreze as resistências dos condutores de conexão e adote o valor da resistência externa ligada a esse condutor como sendo $R_e = 0,5$ ohms. Determine a potência convertida e a corrente que circula pelo condutor ativo nas condições enunciadas no exercício.



Um gerador de força eletromotriz $E = 6 \text{ V}$ alimenta o circuito mostrado na Figura 3.10. O condutor de comprimento L está imerso em um campo magnético de densidade de campo B igual a 4500 Gauss. Determine a intensidade da força motora que atua no conversor e que é acusada pelo dinamômetro.

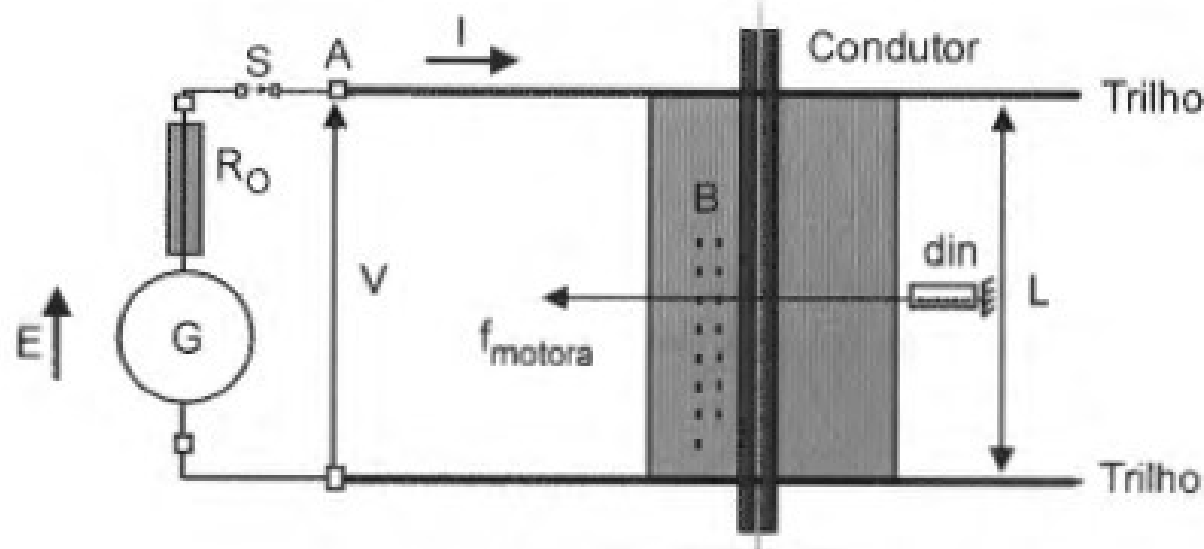


FIGURA 3.10: GERADOR ALIMENTANDO CONDUTOR ATIVO - CONVERSOR ELÉTRICO-MECÂNICO.

Dados: $E = 4,5 \text{ V}$; $L = 0,5 \text{ m}$; $R_E = 1,0 \text{ ohm}$ (resistência total equivalente)

Um motor elétrico de corrente contínua trabalha na tensão de 220 V e solicita de uma fonte de energia elétrica externa uma corrente de 100 A. O rendimento desse motor é de 85%. Determine a potência disponível no eixo motriz do referido motor.

$$R: \quad P = 18.700 \text{ Watts}$$

Um motor de corrente contínua é ligado a uma rede de alimentação de 220 V e solicita uma corrente elétrica de 25 A. O motor tem um rendimento igual a 0,84. Ligado diretamente ao eixo do referido motor está um gerador de corrente contínua que trabalha na tensão de 12 V e possui um rendimento de 0,81. Qual a corrente que deixa os terminais desse gerador, quando ele é solicitado a máxima carga?

$$R: \quad I = 311,85 \text{ A}$$

Determine a densidade de campo magnético de um campo para que um condutor imerso no referido seja submetido a uma força de 0,25 kgf, quando percorrido por uma corrente contínua de 5 A. O condutor tem um comprimento ativo de 0,65 m.

$$R: \quad B = 7546 \text{ Gauss}$$

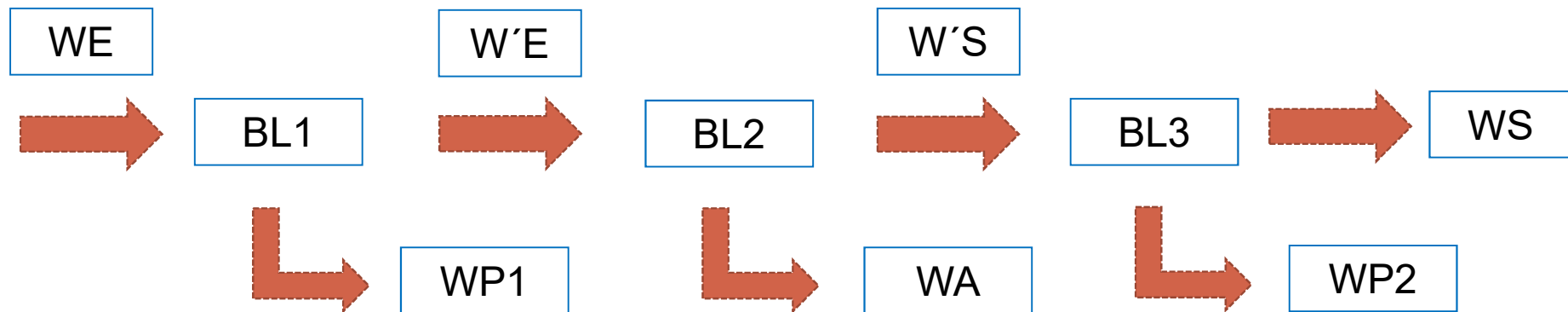
CONVERSÃO DE ENERGIA



Prof. Dr. Giuliano Pierre Estevam

PRINCÍPIOS DE CONVERSÃO DE ENERGIA

PRINCÍPIO DA CONSERVAÇÃO DA ENERGIA

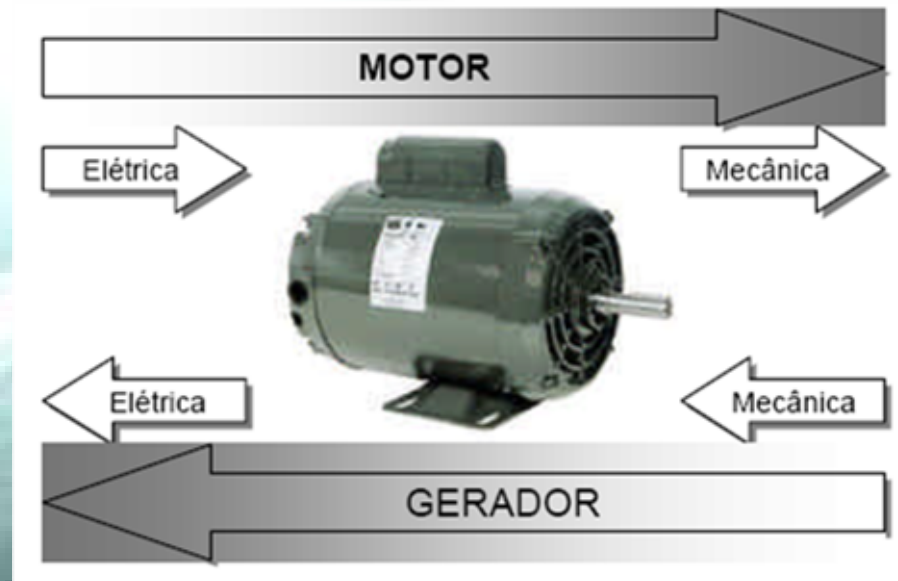


WP { PERDAS POR CORRENTES PARASITAS
PERDAS POR EFEITO JOULE
PERDAS POR HISTERESE

$$WE = WA + WP + WS$$

PRINCÍPIOS DE CONVERSÃO DE ENERGIA

PRINCÍPIO DA REVERSIBILIDADE



PRINCÍPIO DOS TRABALHOS VIRTUAIS

Trabalho realizado por forças que provocam deslocamento infinitesimais.

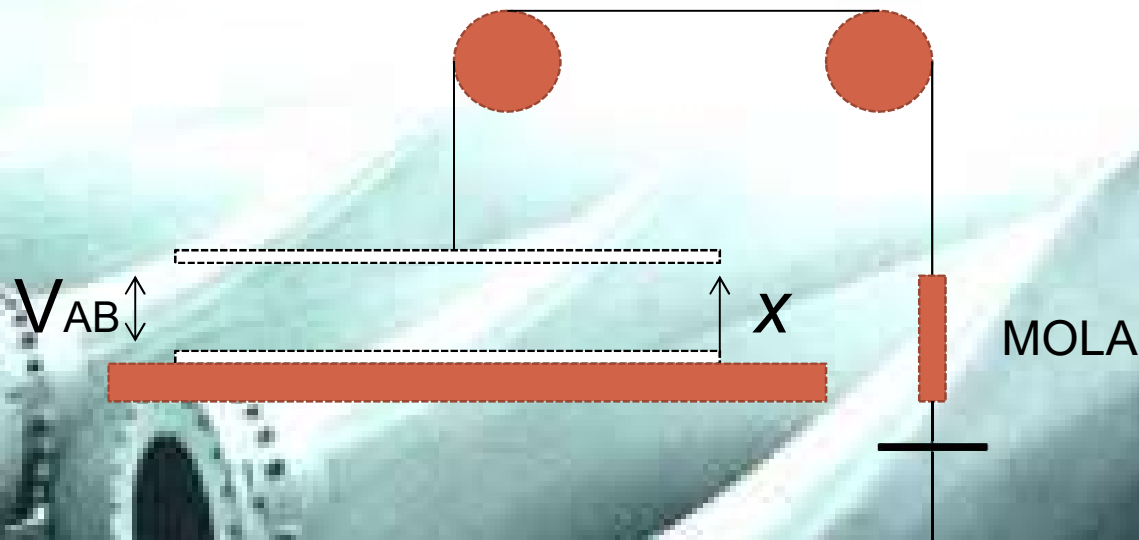
$$\sum_{k=1}^n f m_k \cdot \cos(\alpha) \cdot \Delta x = 0$$



PARA DOIS INSTANTES DISTINTOS TEM-SE:

$$\Delta WE = \Delta WA + \Delta WS$$

CONVERSÃO DE ENERGIA NO CAMPO ELÉTRICO



$$f = \frac{1}{2} v^2 \frac{dC(x)}{dx}$$

$$f = v \frac{dq}{dx} - \frac{dW_A}{dx}$$

$$W_A = \frac{1}{2} C(x) V^2$$

$$C(x) = \varepsilon \frac{A}{x}$$

Determine a expressão da Função Capacitora, da Energia Armazenada na forma de um Campo Elétrico e da Força Portante para um dispositivo que opera no campo elétrico e que tem a configuração mostrada na Figura 5.11.

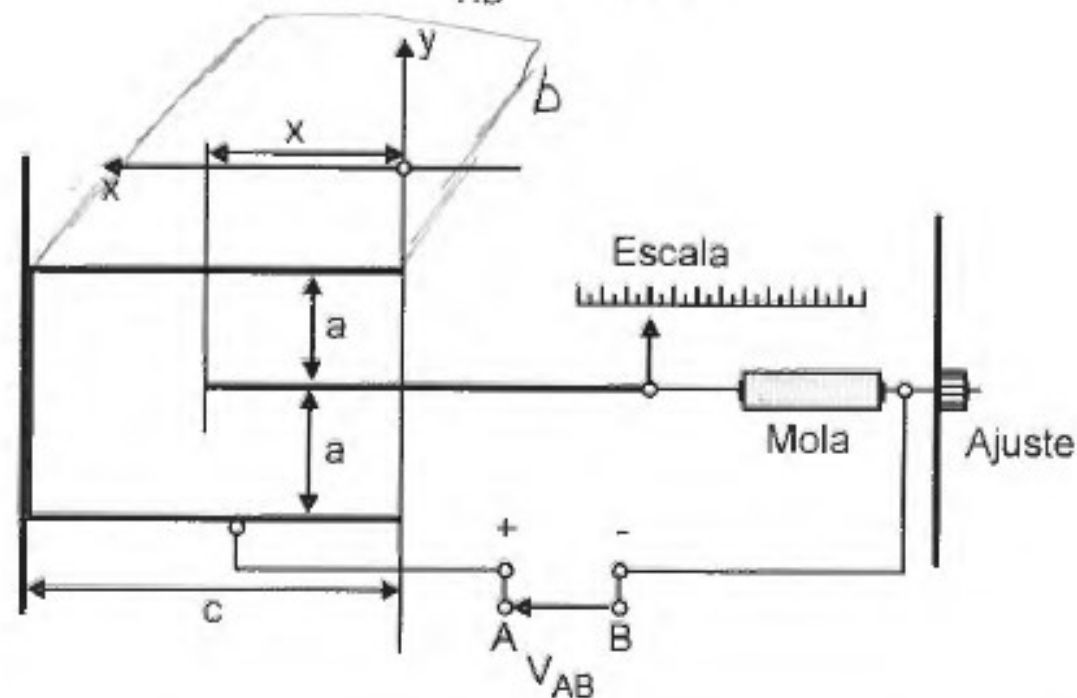
Dados:

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$$

$$b = \text{profundidade da placa} = 0,20 \text{ m}$$

$$a = 0,002 \text{ m}$$

$$v = V_{AB} = 3000 \text{ V}$$



Um instrumento de medida trabalha como mostra a montagem da Figura 5.12. Desenvolva expressões para a função capacitadora, para a energia armazenada e para a força portante presentes no dispositivo conversor.

Dados:

$$\epsilon_1 = 6 \cdot \epsilon_0$$

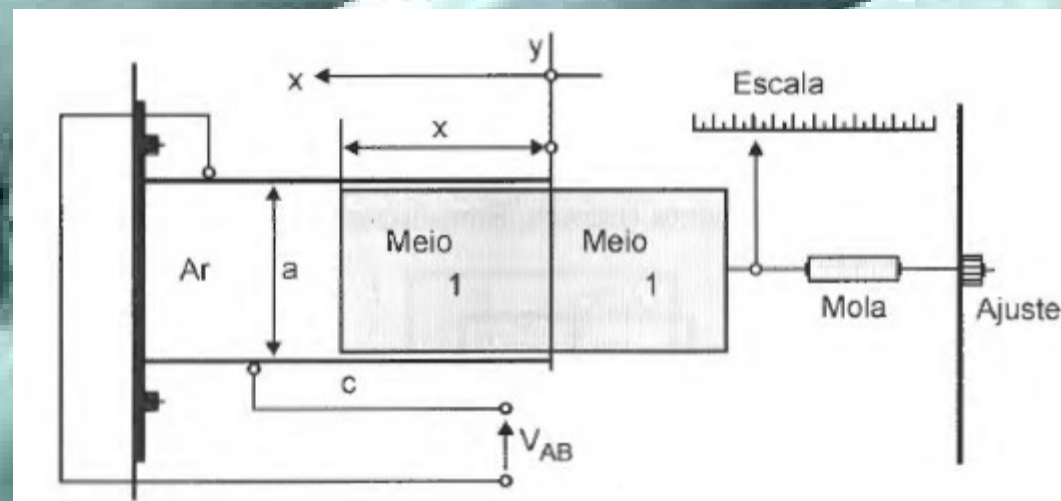
$$\epsilon_0 = 8,85 / 10^{12} \text{ F/m}$$

$$a = 0,003 \text{ m}$$

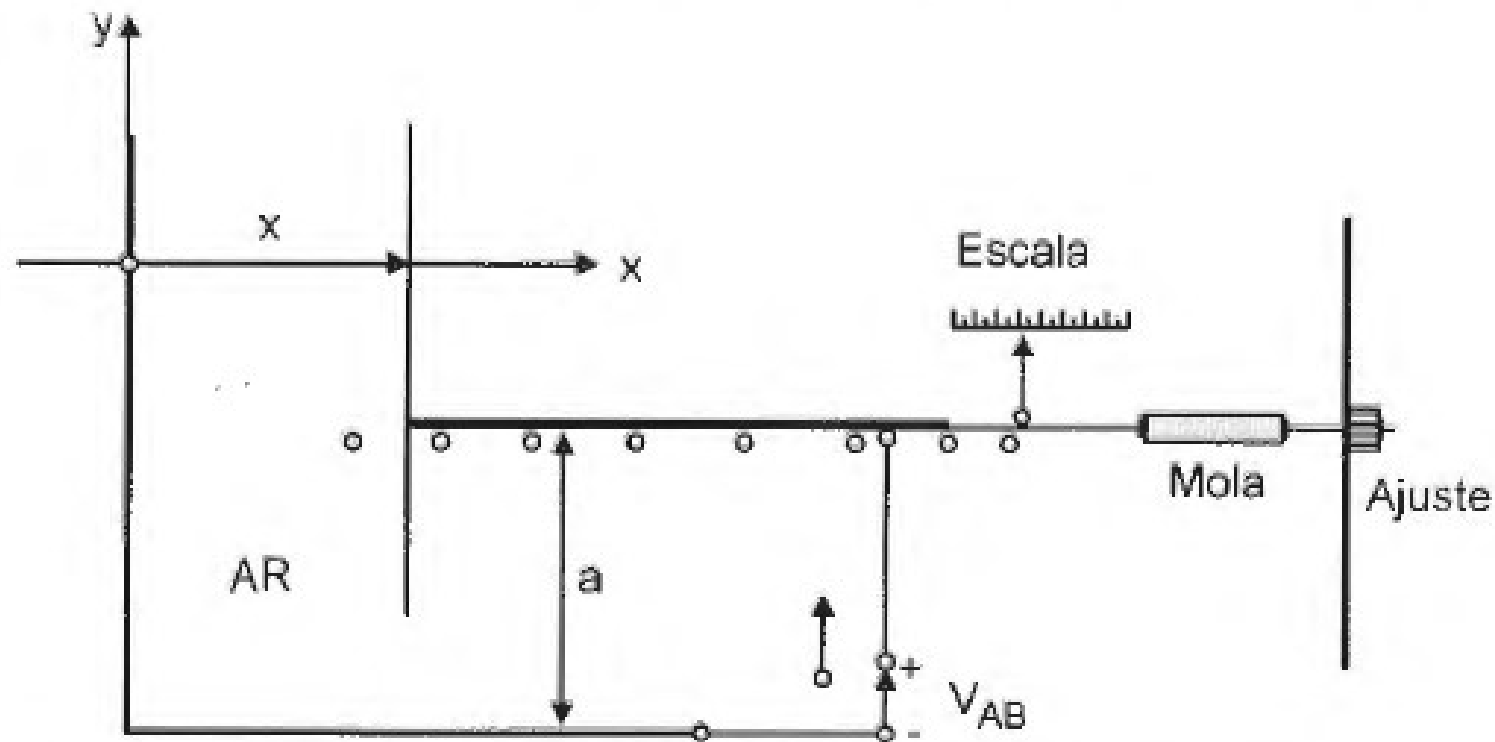
$$b = 0,1 \text{ m (profundidade de montagem)}$$

$$c = 0,15 \text{ m}$$

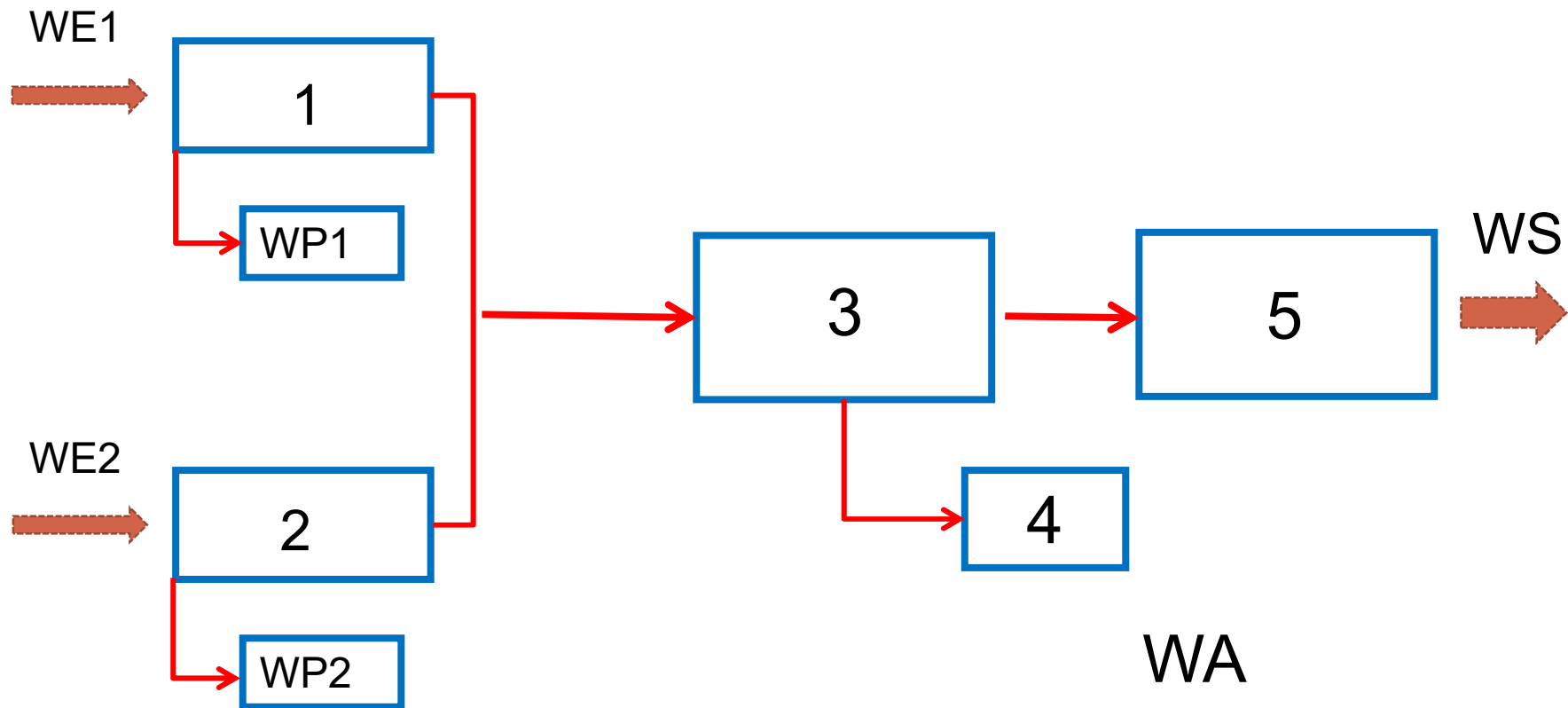
$$v = V_{AB} = 2000 \text{ V}$$



Desenvolva completamente o dispositivo da Figura 5.14. A placa inferior é fixa e a placa superior desliza sobre roletes de material isolante. Despreze o atrito entre a placa móvel e os roletes. Faça hipóteses e admita valores numéricos.



CONVERSÃO DE ENERGIA NO CAMPO MAGNÉTICO



$$WE1 + WE2 = WP1 + WP2 + WA + WS$$

No intervalo de tempo Δt , a variação de energia é dada por:

$$\Delta W_{E1} + \Delta W_{E2} = \Delta W_A + \Delta W_S$$

$$P_{m1} \cdot \Delta t + P_{m2} \cdot \Delta t = \Delta W_A + \Delta W_S$$

De acordo com o princípio dos trabalhos virtuais:

$$\Delta W_S = f_m \cdot \Delta x$$

o que resulta:

$$\underbrace{P_{m1}}_{\substack{v_m \cdot \\ i_m}} \cdot \Delta t + P_{m2} \cdot \Delta t = \Delta W_A + f_m \cdot \Delta x$$

$$v_m = \frac{\Delta \lambda}{\Delta t}$$

$$\frac{\Delta\lambda_1}{\cancel{\Delta t}} \cdot im1 \cdot \cancel{\Delta t} + \frac{\Delta\lambda_2}{\cancel{\Delta t}} \cdot im2 \cdot \cancel{\Delta t} = \Delta WA + fm \cdot \Delta x$$

$$\Delta\lambda_1 \cdot im1 + \Delta\lambda_2 \cdot im2 = \Delta WA + fm \cdot \Delta x$$

$$\frac{\Delta\lambda_1}{\Delta x} \cdot im1 + \frac{\Delta\lambda_2}{\Delta x} \cdot im2 - \frac{\Delta WA}{\Delta x} = fm$$

Para $\Delta t \rightarrow 0$ ($\Delta x \rightarrow 0$), resulta:

$$\frac{d\lambda_1}{dx} \cdot i1 + \frac{d\lambda_2}{dx} \cdot i2 - \frac{dWA}{dx} = f$$

$$\frac{d\lambda_1}{dx} \cdot i_1 + \frac{d\lambda_2}{dx} \cdot i_2 - \frac{dWA}{dx} = f$$

Aplicando a regra da cadeia na equação acima, tem-se:

$$f = -\frac{dWA}{dx}$$

Analisando a expressão $\frac{\Delta\lambda_1}{\Delta t} \cdot i_{m1} \cdot \Delta t + \frac{\Delta\lambda_2}{\Delta t} \cdot i_{m2} \cdot \Delta t = \Delta WA + f_m \cdot \Delta x$

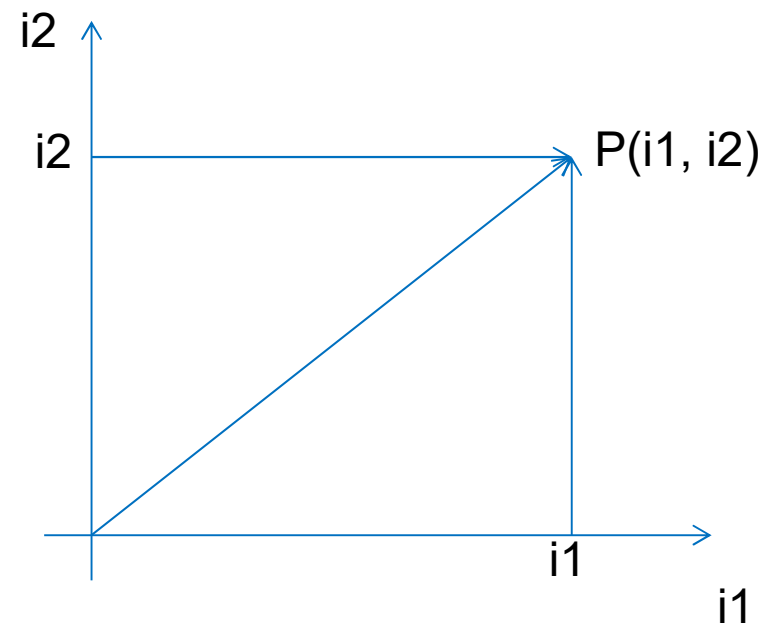
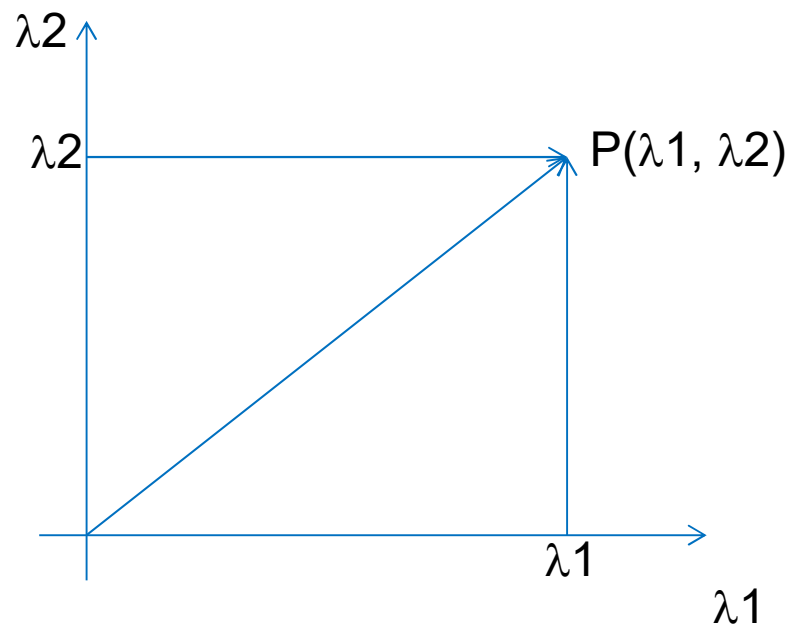
por outro ponto de vista, pode-se obter uma outra expressão para a energia armazenada:

$$dWA = i_1 \cdot d\lambda_1 + i_2 \cdot d\lambda_2$$

$$dWA = i1 . d\lambda1 + i2 . d\lambda2$$

Integrando os dois lados da equação acima:

$$\int dWA = \int i1 . d\lambda1 + i2 . d\lambda2$$



COENERGIA EM DISPOSITIVOS QUE OPERAM NO CAMPO MAGNÉTICO

Resolvendo a integral a seguir tem-se que: $\int dW_A = \int i_1 . d\lambda_1 + i_2 . d\lambda_2$

$$W_A = (i_1 . \lambda_1 + i_2 . \lambda_2) - \underbrace{\left[\int_0^{i_1} \lambda_1 . di_1 + \int_0^{i_2} \lambda_2 . di_2 \right]}_{\text{Coenergia (WCO)}}$$

Coenergia
(WCO)

$$W_A + WCO = i_1 . \lambda_1 + i_2 . \lambda_2$$

portanto

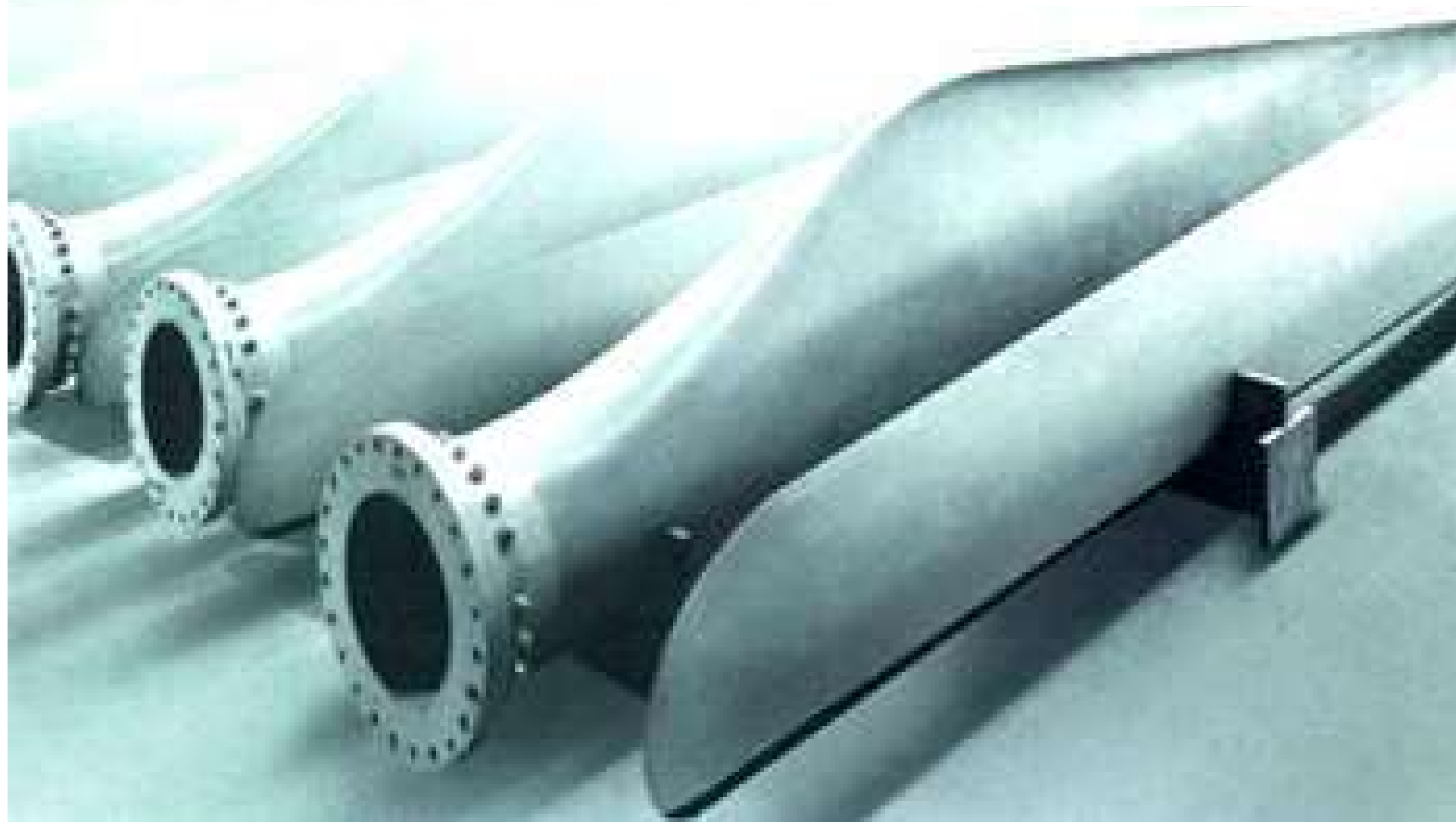
$$W_A = \int_0^{\lambda_1} i_1 . d\lambda_1 + \int_0^{\lambda_2} i_2 . d\lambda_2$$

$$WCO = \int_0^{i_1} \lambda_1 . di_1 + \int_0^{i_2} \lambda_2 . di_2$$

Indique a expressão da energia armazenada em um dispositivo descrito por:

$$i_1 = 10 \cdot \lambda_1 \cdot x^2 + 12 \cdot \lambda_2 \cdot x^2$$

$$i_2 = 12 \lambda_1 \cdot x^2 + 18 \cdot \lambda_2 \cdot x^2$$



Ex 01)

Um dispositivo conversor eletromecânico de energia opera no campo magnético e é regido pelas equações:

$$\lambda_1 = a \cdot i_1^5 \cdot x + b \cdot i_1^2 \cdot i_2^3 \cdot x$$

$$\lambda_2 = d \cdot i_1^3 \cdot i_2^2 \cdot x + e \cdot i_2^5 \cdot x$$

Determine:

- a) *Energia Armazenada na forma de um campo magnético.*
- b) *Coenergia no campo magnético.*
- c) *Força portante desenvolvida pelo dispositivo conversor de energia.*

Ex 02)

O exercício proposto a partir de sua equação funcional tem uma porta elétrica e opera no campo magnético. Determine:

- a) *Energia Armazenada na forma de um campo magnético.*
- b) *Coenergia no Campo Magnético.*
- c) *Força Portante exercida pelo dispositivo conversor.*

$$i = 8 \cdot \frac{\lambda^3}{(k \cdot x^4)}$$

Ex 03)

O exercício proposto a partir de sua equação funcional tem uma porta elétrica e opera no campo magnético. Determine:

- a) Energia Armazenada na forma de um campo magnético.
- b) Coenergia no Campo Magnético.
- c) Força Portante exercida pelo dispositivo conversor.

$$\lambda = A \cdot i^{3/4} \cdot x^3$$

Ex 04)

O exercício proposto a partir de sua equação funcional tem uma porta elétrica e opera no campo magnético. Determine:

- a) Energia Armazenada na forma de um campo magnético.
- b) Coenergia no Campo Magnético.
- c) Força Portante exercida pelo dispositivo conversor.

ESTUDO DOS CONVERSORES QUE OPERAM NO CAMPO MAGNÉTICO

$$\lambda_1 = A_{11}(x) \cdot i_1 + A_{12}(x) \cdot i_2$$

$$\lambda_2 = A_{21}(x) \cdot i_1 + A_{22}(x) \cdot i_2$$

SENDO $\lambda = L \cdot I$, tem-se

$$\lambda_1 = L_1(x) \cdot i_1 + M_{12}(x) \cdot i_2$$

$$\lambda_2 = M_{21}(x) \cdot i_1 + L_2(x) \cdot i_2$$

$$M_{12}(x) = M_{21}(x)$$

$L_i(x)$ ---> Indutância própria da porta elétrica de acesso i

$M_{ij}(x)$ ---> Indutância mútua entre a porta i e a porta j

ENERGIA ARMazenADA

$$\lambda_1 = L_1(x) \cdot i_1 + M(x) \cdot i_2$$

$$\lambda_2 = M(x) \cdot i_1 + L_2(x) \cdot i_2$$

Para um sistema de duas portas elétricas de acesso, o diferencial da energia armazenada na forma de um campo magnético pode ser expresso por:

$$dW_A = i_1 \cdot d\lambda_1 + i_2 \cdot d\lambda_2$$

e a energia armazenada expressa por:

$$W_A = \int_0^{W_A} dW_A = \int_0^{\lambda_1} i_1 \cdot d\lambda_1 + \int_0^{\lambda_2} i_2 \cdot d\lambda_2$$

A coenergia no campo magnético para um dispositivo conversor de duas portas elétricas é expressa por:

$$W_A = \int_0^{W_{CO}} dW_{CO} = \int_0^{\lambda_1} i_1 \cdot d\lambda_1 + \int_0^{\lambda_2} i_2 \cdot d\lambda_2$$

$$W_{CO} = \frac{1}{2} \cdot L_1(x) \cdot i_1^2 + M(x) \cdot i_1 \cdot i_2 + \frac{1}{2} \cdot L_2(x) \cdot i_2^2$$

$$W_A = \frac{1}{2} \cdot L_1(x) \cdot i_1^2 + M(x) \cdot i_1 \cdot i_2 + \frac{1}{2} \cdot L_2(x) \cdot i_2^2$$

EXERCÍCIO

Usando a expressão da energia armazenada para um dispositivo magneticamente linear de duas portas elétricas, observe se é possível chegar a uma expressão em que se visualize a forma como o dispositivo exerce o armazenamento.

$$W_A = \frac{1}{2} \cdot (L_1(x) \cdot i_1^2 + 2 \cdot M(x) \cdot i_1 \cdot i_2 + L_2(x) \cdot i_2^2)$$

Levando à Equação (e11.1) as equações desenvolvidas anteriormente, resulta:

$$W_A = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\mathcal{R}_T(x)} \cdot (N_1^2 \cdot i_1^2 + 2 \cdot (N_1 \cdot i_1) \cdot (N_2 \cdot i_2) + N_2^2 \cdot i_2^2)$$

Examinando o segundo membro da Equação (e11.2), escreve-se:

$$W_A = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\mathcal{R}_T(x)} \cdot (N_1 \cdot i_1 + N_2 \cdot i_2)^2$$

$$W_A = \frac{1}{2} \cdot \frac{\mathcal{I}_T^2}{\mathcal{R}_T(x)}$$

FORÇA PORTANTE

Sabendo que

$$W_A = \frac{1}{2} \cdot L_1(x) \cdot i_1^2 + M(x) \cdot i_1 \cdot i_2 + \frac{1}{2} \cdot L_2(x) \cdot i_2^2$$

$$f = (-) \cdot \frac{\partial W_A}{\partial x}$$

$$f = \frac{1}{2} \cdot i_1^2 \cdot \frac{dL_1(x)}{dx} + i_1 \cdot i_2 \cdot \frac{dM(x)}{dx} + \frac{1}{2} \cdot i_2^2 \cdot \frac{dL_2(x)}{dx}$$

Pode-se chegar

$$f = (-) \cdot \frac{1}{2} \cdot (\phi(x))^2 \cdot \frac{d\Re_T(x)}{dx}$$

Um dispositivo que opera no campo magnético tem a configuração mostrada na Figura 7.13. Desenvolva a expressão para a força portante que atua no dispositivo, em função dos dados do exercício:

Dados: $a = 30 \text{ mm}$; $\mu_{FE} = 3000 \cdot \mu_0$; $N = 1000$ espiras

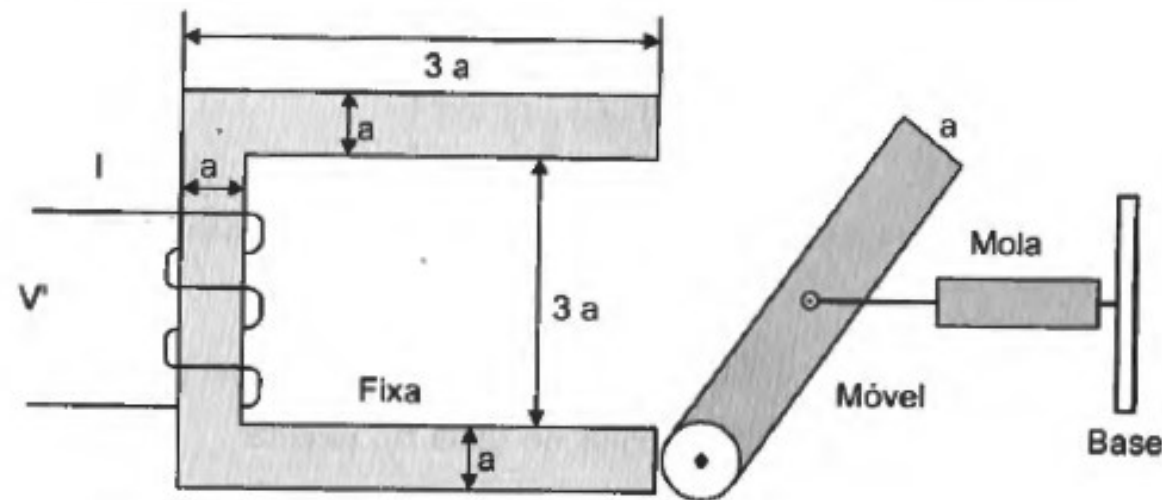


FIGURA 7.13: DISPOSITIVO CONVERSOR DE UMA PORTA ELÉTRICA.

$$L_1(x) = \frac{N_1^2}{\mathcal{R}_T(x)}$$

$$W_A = \frac{1}{2} \cdot L_1(x) \cdot i_1^2$$

$$f = (-) \cdot \frac{\partial W_A}{\partial x}$$

7.13.1 EXERCÍCIO PROPOSTO 1

Utilizando equações já desenvolvidas, determine, para o dispositivo da Figura 7.16:

- ✓ a) Indutância $L_1(x)$.
- ✓ b) Reatância Indutiva do Dispositivo.
- ✓ c) Fluxo Magnético.
- ✓ d) Densidade de Fluxo Magnético.
- ✓ e) Força Portante.
- f) Teça comentários.

DADOS: $a = 5 \text{ cm};$ $N = 1000 \text{ espiras};$ $V'_1 = 220 \text{ V};$
 $\mu_{FE} = 1800 \mu_0;$ $\mu_{AR} = \mu_0;$ $f = 60 \text{ Hz}.$

7.13.2 EXERCÍCIO PROPOSTO 2

O dispositivo da Figura 7.16 opera em corrente contínua e constante, de valor igual a 5 A. Para ele, determine:

- a) Força Magnetomotriz.
- b) Relutância do Circuito Magnético.
- c) Densidade de Campo Magnético, para: