

Universidade do Minho
Escola de Engenharia
Departamento de Electrónica Industrial

Mestrado Integrado em Engenharia Física

UC de Análise de Circuitos

Departamento de Electrónica Industrial e Computadores

Paulo Carvalho
pcarvalho@dei.uminho.pt

Sumário

- Rudimentos de magnetismo
 - força elétrica
 - campo elétrico
 - energia potencial elétrica
 - tensão elétrica
 - corrente elétrica
 - produção de um campo magnético
 - Oersted
 - Ampère
 - Intensidade de um campo magnético
 - Faraday
 - Lenz
 - densidade de fluxo magnético
 - fluxo magnético
 - ferromagnetismo
 - correntes de Foucault
 - produção de força num condutor no seio de um campo magnético
- tópicos preliminares
 - representação e caracterização de sinais
 - valor médio (por definição e graficamente)
 - valor Eficaz
 - tensão
 - potencial elétrico
 - diferença de potencial
 - corrente
 - potência
 - rendimento
 - resistência
 - lei de Joule

■ Rudimentos de Electricidade

■ Força Eléctrica

... a **Lei de Coulomb (@1783)** descreve a interação entre duas partículas eléctricas carregadas, estabelecendo que duas cargas eléctricas pontuais se atraem ou repelem com uma força cuja intensidade é:

$$F_{xy} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_x Q_y}{r^2} \text{ N (newton)}$$

$\epsilon_0 \rightarrow$ permitividade do vazio ($8,854 \times 10^{-12}$ F/m)

$Q_x, Q_y \rightarrow$ valor absoluto das cargas eléctricas

$r \rightarrow$ distância entre as cargas

Tópicos Preliminares

$$F_{xy} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_x Q_y}{r^2} \text{ N (newton)}$$

Força proporcional ao módulo das cargas

Constante de Coulomb: $8,98 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$

Força inversamente proporcional
ao quadrado da distância entre as cargas

Nota: a lei da gravitação universal estabelece que: $F_{xy} = G \frac{m_x m_y}{r^2} \text{ N (newton)}, G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2 / \text{Kg}^2$

■ Rudimentos de Electricidade

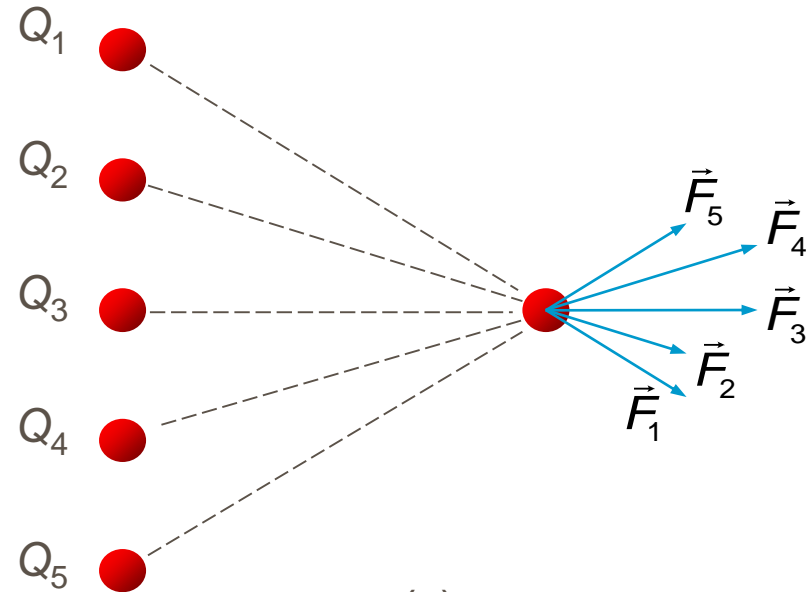
■ Força Eléctrica



(a)



(b)



(c)

Com N cargas (c), a força resultante numa carga específica obtém-se por sobreposição, com a soma vectorial de todas as forças.

■ Rudimentos de Electricidade

■ Campo Eléctrico

- Se considerarmos uma carga Q_x numa posição fixa, e movermos uma carga de teste Q_y na vizinhança de Q_x , verificamos que Q_y experimenta uma força, devido à existência de um campo de forças criado por Q_x .
- A lei de Coulomb como já se viu define essa força.
- Se se reescrever a expressão de F_{xy} , como uma força por unidade de carga:

$$\frac{F_y}{Q_y} = \frac{Q_x}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

A parte direita da expressão corresponde à intensidade do campo eléctrico, que apenas depende de Q_x

$$E = \frac{F_y}{Q_y}$$

■ Rudimentos de Electricidade

■ Campo Eléctrico

- O campo eléctrico é uma medida da acção que uma carga exerce sobre as cargas eléctricas localizadas no seu raio de acção. A intensidade do campo eléctrico criado por uma carga pontual⁽¹⁾ é expressa por :

$$E_x = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_x}{r^2} \text{ V/m (volt por metro)}$$

E_x proporcional ao módulo da carga

E_x inversamente proporcional ao quadrado da distância

⁽¹⁾ A direcção do vector campo eléctrico criado por uma carga eléctrica pontual é radial. Cargas positivas têm sentido divergente e cargas negativas têm sentido convergente

■ Rudimentos de Electricidade

■ Campo Eléctrico

- O campo eléctrico é uma medida da acção que uma carga exerce sobre as cargas eléctricas localizadas no seu raio de acção. A intensidade do campo eléctrico criado por uma carga pontual⁽¹⁾ é expressa por :

$$E_x = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_x}{r^2} \text{ V/m (volt por metro)}$$

E_x proporcional ao módulo da carga

E_x inversamente proporcional
ao quadrado da distância

Pelo que,

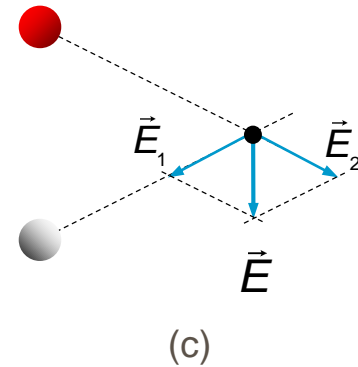
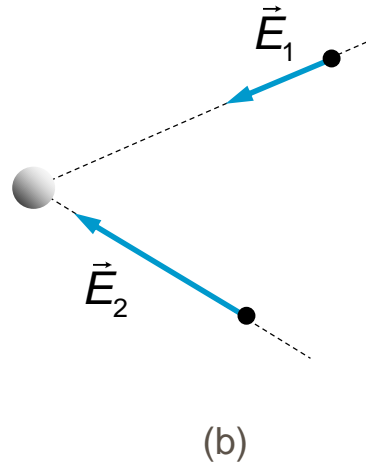
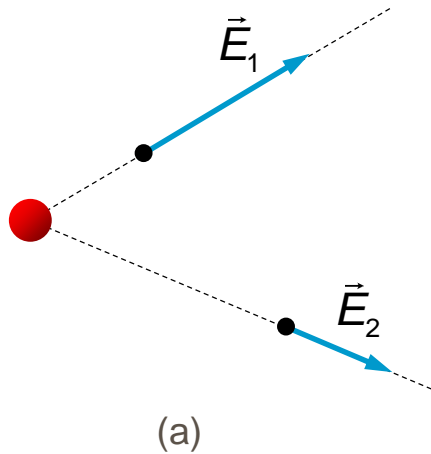
$$F_{x,y} = E_x Q_y$$

A força depende da carga (onde se exerce a força) para além da carga de controlo Q_x
O campo electrico não depende da carga onde se exerce a força

⁽¹⁾ A direcção do vector campo eléctrico criado por uma carga eléctrica pontual é radial. Cargas positivas têm sentido divergente e cargas negativas têm sentido convergente

■ Rudimentos de Electricidade

■ Campo Eléctrico



■ Rudimentos de Electricidade

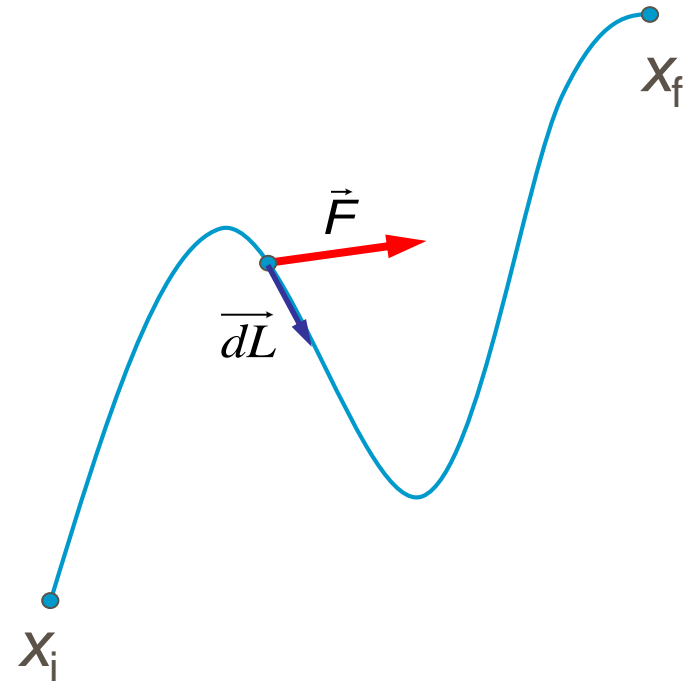
■ Energia Potencial (Eléctrica)

- Energia – caso geral do deslocamento de uma massa sob acção de uma força:

$$W = - \int_{x_i}^{x_f} \vec{F} \bullet \overrightarrow{dL} \quad \text{J (joule)}$$

- Caso particular da queda de uma massa num campo gravitacional (a força é constante e a direcção coincidente com o deslocamento)

$$W = mgh$$



■ Rudimentos de Electricidade

■ Energia Potencial (Eléctrica)

A definição de energia potencial eléctrica aplica-se a qualquer conjunto de cargas eléctricas sujeitas à acção de um campo eléctrico

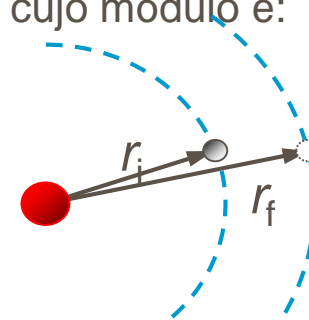
- Se se tentar mover uma carga eléctrica “contra” a direcção do campo eléctrico a que está sujeita, temos de exercer uma força contrária à que é exercida pelo campo, o que implica usar energia ou seja, executar trabalho.
- Se movermos a carga na direcção do campo eléctrico, o consumo de energia é negativo, quem executa trabalho é o campo.

■ Rudimentos de Electricidade

■ Energia Potencial (Eléctrica)

- Considere-se então um átomo de hidrogénio, constituído por um protão e por um electrão. Em face da existência de uma força de atracção entre as duas cargas, o deslocamento do electrão entre órbitas envolve a realização de um trabalho cujo módulo é:

$$W = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} e^2 \left(\frac{1}{r_f} - \frac{1}{r_i} \right)$$



O conceito de energia potencial eléctrica aplica-se a um conjunto de cargas eléctricas sujeitas à ação de um campo eléctrico.

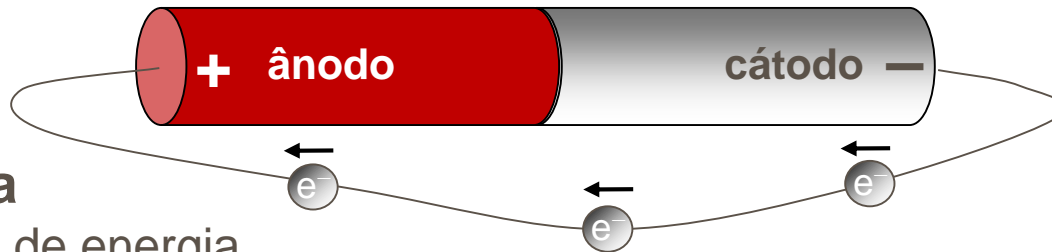
■ Rudimentos de Electricidade

■ Energia Potencial (Eléctrica)

Descarga

Libertação de energia

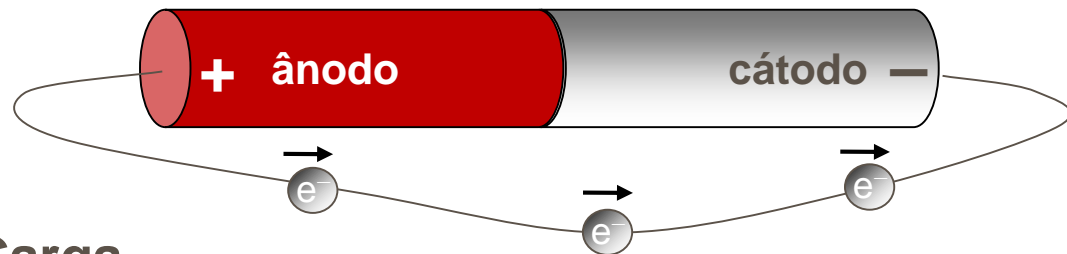
O Sistema dispõe de energia armazenada



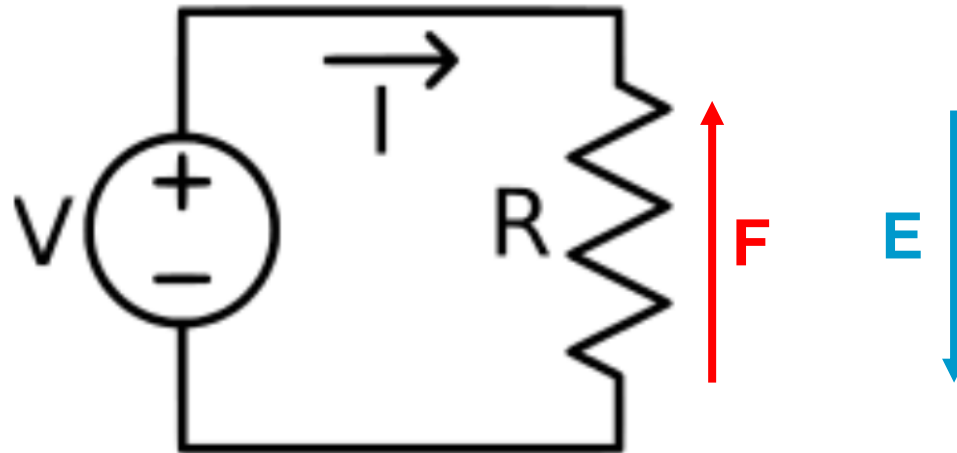
Carga

Fornecimento de energia

O Sistema aumenta a sua energia potencial (eléctrica)



■ Rudimentos de Electricidade



O transporte de um eletrão entre os terminais negativo e positivo de uma bateria é efetuado no sentido da força, portanto no sentido contrário ao do campo elétrico, envolve a libertação de energia (realização de um trabalho negativo) e indica a presença de uma tensão elétrica positiva, no sentido do terminal positivo para o terminal negativo

Tópicos Preliminares

- Rudimentos de Electricidade
- Tensão Eléctrica
 - Existe tensão eléctrica entre dois pontos de um campo sempre que o transporte de carga entre esses mesmos dois pontos envolve libertação ou absorção de energia eléctrica por parte do sistema.

■ Rudimentos de Electricidade

■ Tensão Eléctrica

- A tensão é uma medida da energia envolvida no transporte de uma carga **elementar entre dois pontos de um campo eléctrico**. É uma quantidade que se mede em **volts** (V) e que coincide com o cociente entre a energia libertada e a quantidade de carga transportada:

$$Tensão = \frac{W}{Q} \text{ V (volts)}$$

- Tendo em atenção as relações entre trabalho, força e campo eléctrico, verifica-se que,

$$Tensão = \frac{W}{Q} = \frac{-\int_{x_i}^{x_f} \vec{F} \cdot d\vec{L}}{Q} = \frac{-\int_{x_i}^{x_f} Q\vec{E} \cdot d\vec{L}}{Q} = \int_{x_i}^{x_f} \vec{E} \cdot d\vec{L}$$

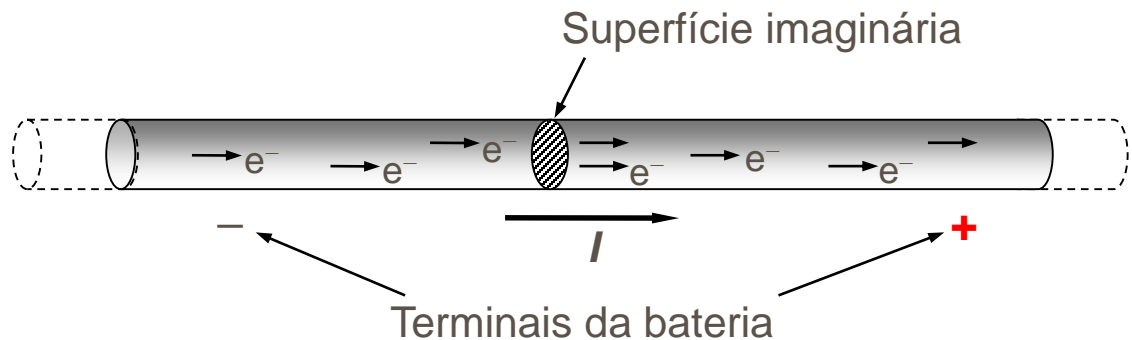
■ Rudimentos de Electricidade

■ Corrente Eléctrica

... define-se corrente média como a quantidade de carga eléctrica que na unidade de tempo atravessa uma dada superfície ...

$$I = \frac{Q}{\Delta T} \text{ A (ampere)}$$

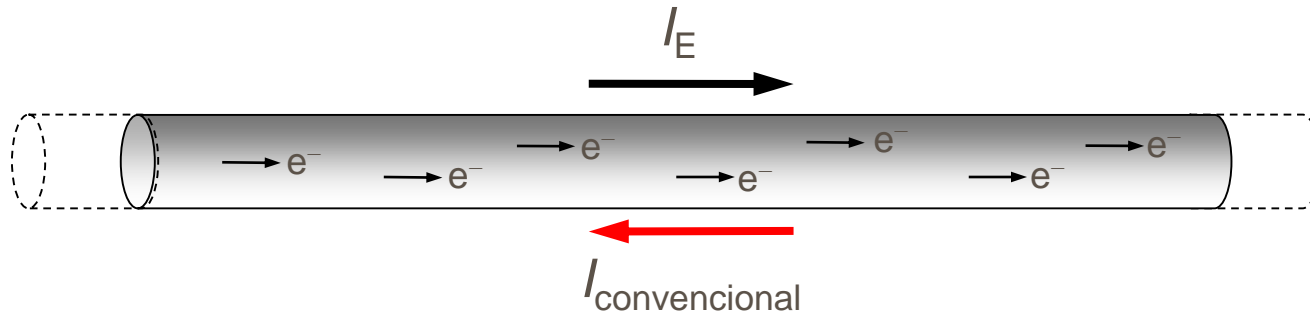
$$\rightarrow i(t) = \frac{dq}{dt}$$



■ Rudimentos de Electricidade

■ Corrente Eléctrica

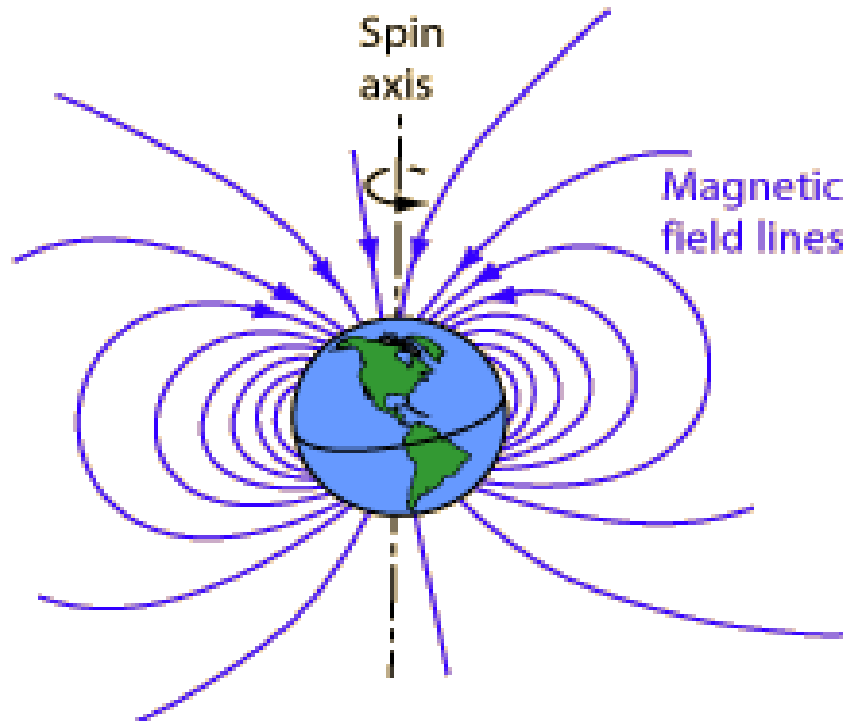
■ Fluxo de electrões *versus* corrente convencional



Quando se aplica uma diferença de potencial aos terminais de um condutor, cria-se um campo eléctrico. Os electrões livres movem-se (ao contrário dos iões positivos que estão retidos na estrutura atómica), e tentam anular o campo eléctrico, mas não o conseguem porque devido à existência de uma fonte de tensão, mantem-se a diferença de potencial aos terminais.

■ Rudimentos de Magnetismo

■ Produção de um Campo Magnético

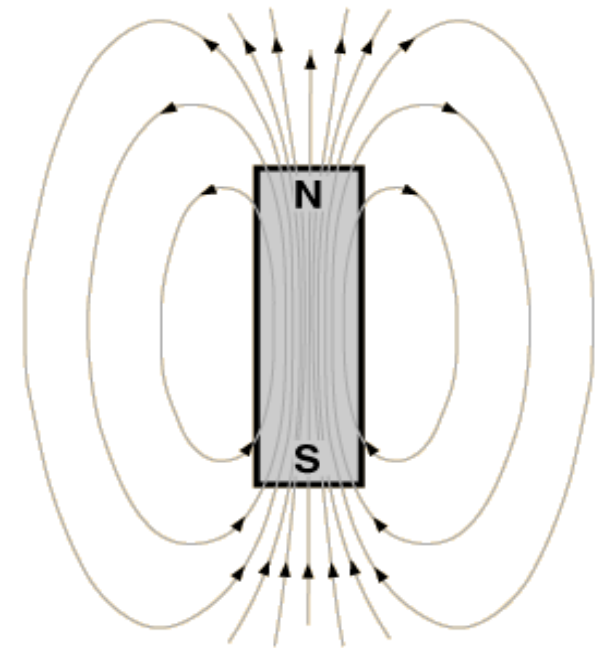


O campo magnético terrestre é formado pelas enormes massas de metal líquido que se movem em correntes de convecção no interior do planeta, e geram correntes elétricas. São estas correntes as responsáveis pelo campo magnético terrestre.

Campo magnético terrestre

- **Rudimentos de Magnetismo**
 - Produção de um Campo Magnético

Ímãs permanentes são objetos que produzem seus próprios campos magnéticos persistentes e possuem um pólo norte e um pólo sul.



Ímã permanente

- **Rudimentos de Magnetismo**
 - Produção de um Campo Magnético

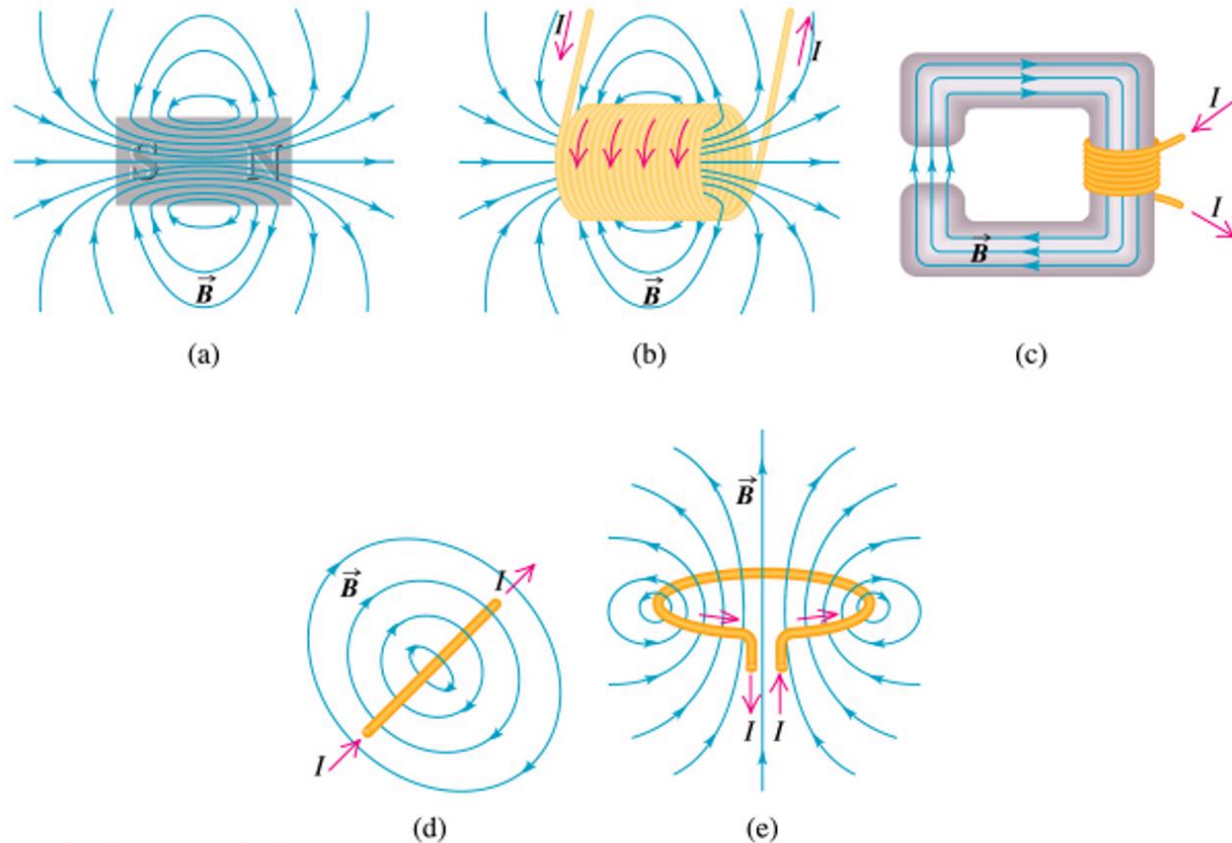
Um campo magnético pode ser produzido a partir de:

- Um íman permanente
- Um campo elétrico variável no tempo
- Uma corrente elétrica

Tópicos Preliminares

■ Rudimentos de Magnetismo

■ Produção de um Campo Magnético



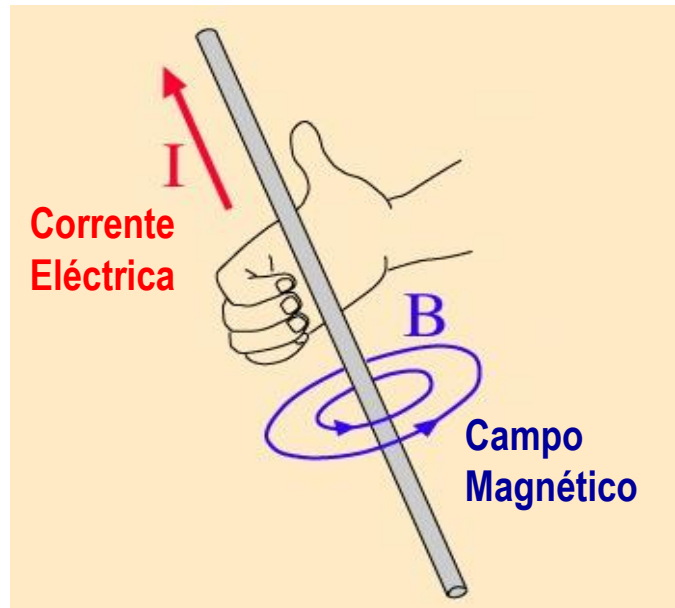
Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

■ Rudimentos de Magnetismo

■ Produção de um Campo Magnético

- Øersted (@1820) – a steady current produces a steady magnetic field

Foi ele que estabeleceu pela primeira vez uma relação entre electricidade e magnetismo

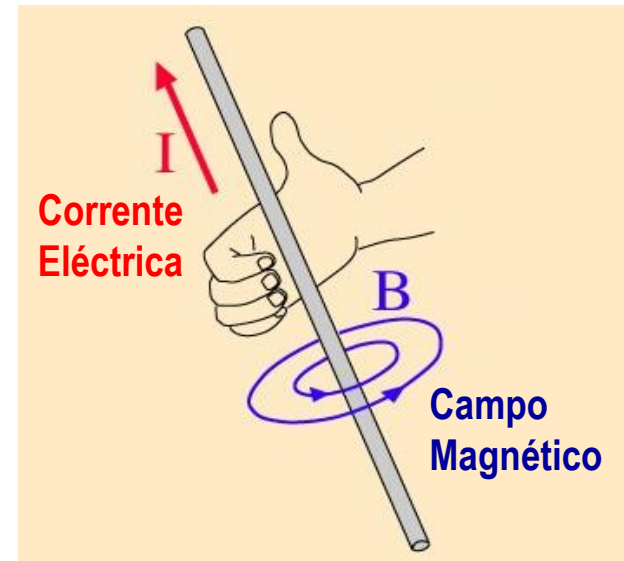


Øersted (@1820)

Concluiu que:

- As linhas de campo estão num plano perpendicular ao fio
- Se a direção da corrente mudar, a direção da força magnética também muda
- A densidade do campo é proporcional à intensidade de corrente
- A densidade do campo é inversamente proporcional à distância

[A experiencia original](#)

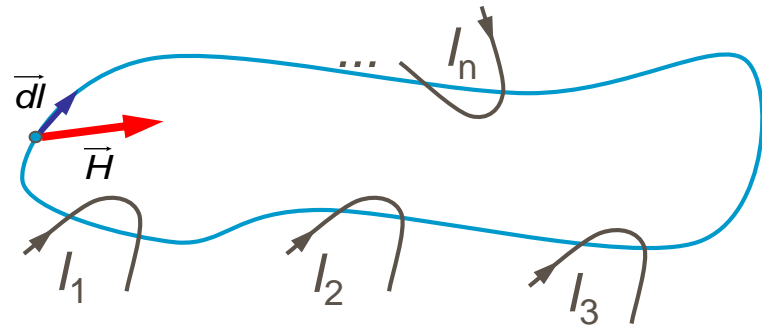


■ Rudimentos de Magnetismo

■ Produção de um Campo Magnético

... a lei básica que governa a produção dum campo magnético a partir de uma corrente eléctrica, é a **lei de Ampère (@1826)**

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum I$$



O integral da intensidade do campo magnético é igual à corrente que penetra na superfície delimitada pelo percurso considerado

H – não depende da natureza do meio magnético

$\vec{H} \rightarrow$ **vector** intensidade do campo magnético (A/m ou amperes · espira/m)

$d\vec{l} \rightarrow$ **vector** elementar (a direcção coincide com o trajecto)

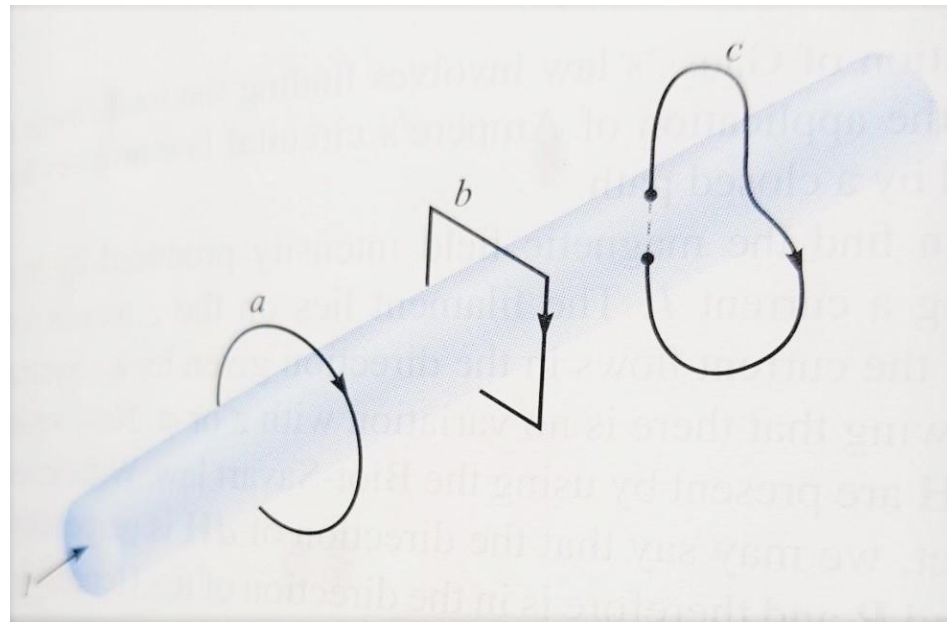
$\sum I \rightarrow$ somatório das intensidades das correntes que contribuem para a produção do campo

■ Rudimentos de Magnetismo

■ Produção de um Campo Magnético

... a lei básica que governa a produção dum campo magnético a partir de uma corrente eléctrica, é a **lei de Ampère (@1826)**

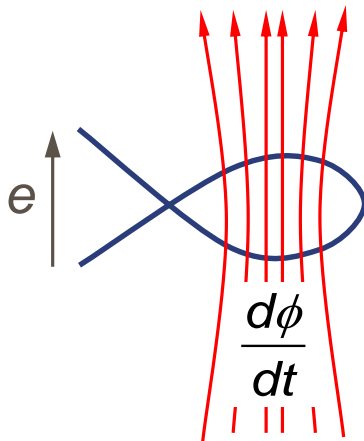
$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum I$$



O integral da intensidade do campo magnético é igual à corrente que penetra na superfície delimitada pelo percurso considerado

■ Rudimentos de Magnetismo

- Lei de Faraday (@1831) – f.e.m induzida a partir dum campo magnético variável



A **lei de Faraday** diz-nos que um campo magnético variável no tempo **induz** numa espira que o "abrace", uma força electromotriz que é directamente proporcional a derivada do fluxo em ordem ao tempo

Ou seja:

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

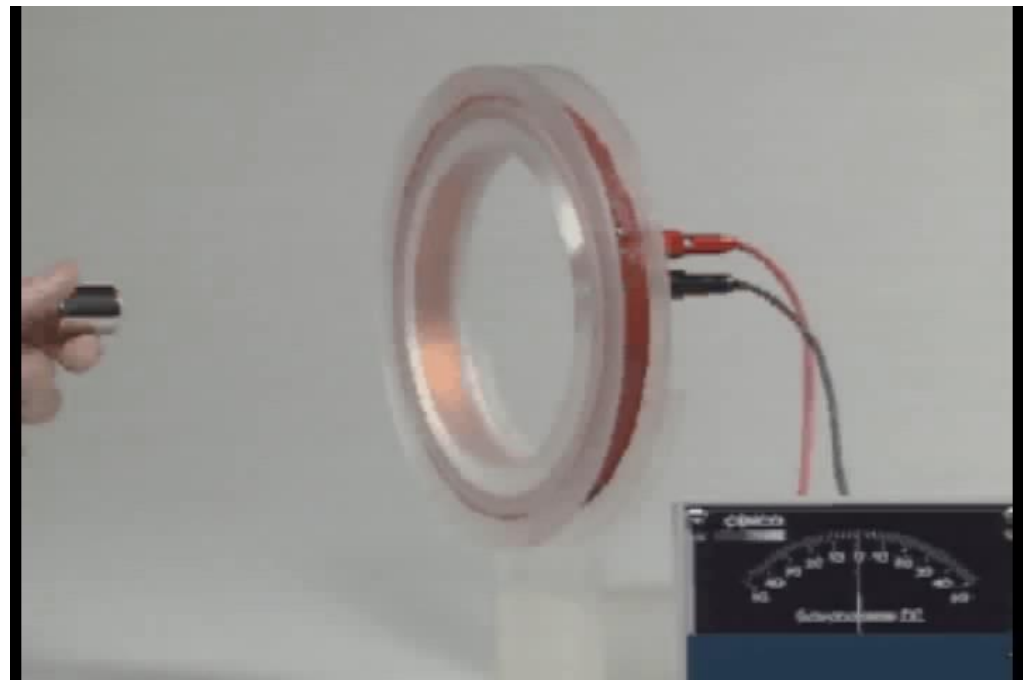
uma corrente pode ser produzida por um campo magnético variável

Indução electromagnética

Nota: **e** não depende da forma do loop. O que é relevante é a variação de fluxo no interior da superfície

<http://phet.colorado.edu/en/simulation/faraday>

Faraday (@1831) – produção de f.e.m. variável induzida a partir dum campo magnético variável

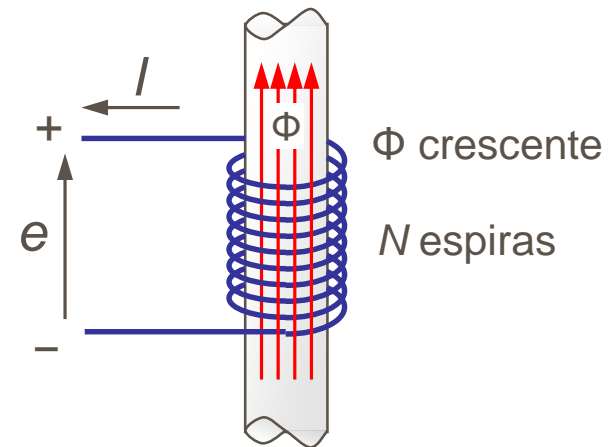


■ Rudimentos de Magnetismo

■ Lei de Lenz (@1834)

O sinal menos associado à equação (que assim traduz a lei de **Lenz**), significa que o sentido da f.e.m. é tal que, se se fechasse o circuito, a corrente que circularia seria de modo a criar um fluxo que se oporia à variação do fluxo original.

[Ver experiencia](#)

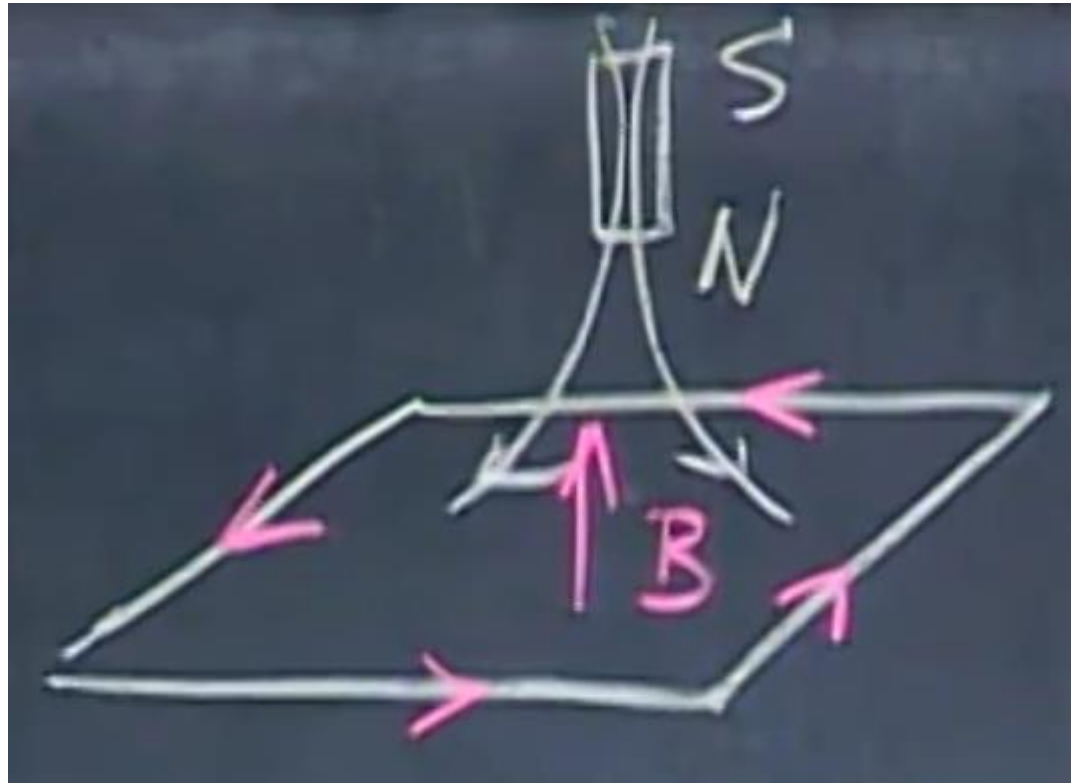


$$e = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (\text{lei de Lenz})$$

$$\text{para } \psi = N\phi, \quad e = -\frac{d\psi}{dt}$$

■ Rudimentos de Magnetismo

■ Lei de Lenz (@1834)



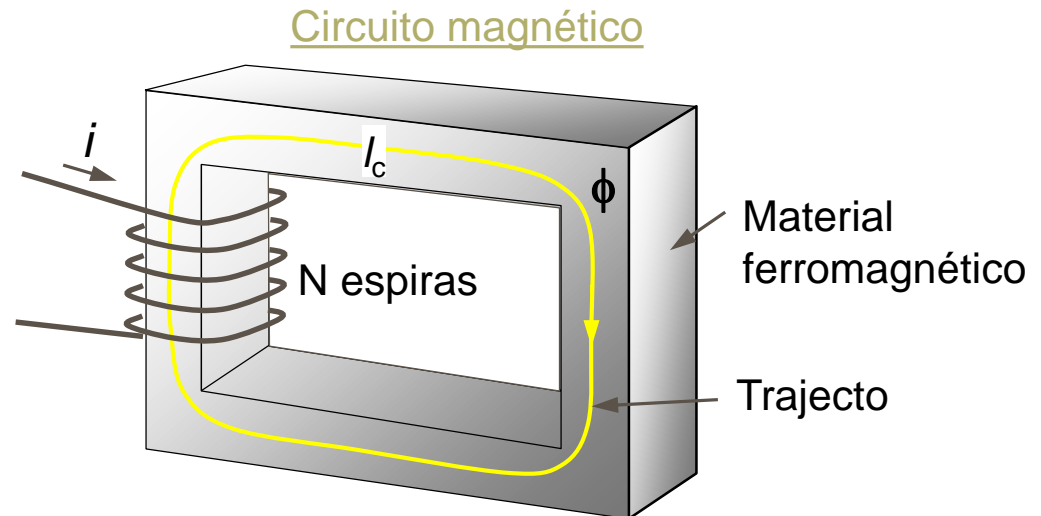
■ Rudimentos de Magnetismo

- Produção de um Campo Magnético a partir de uma corrente

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum I$$

$$\Rightarrow H l_c = Ni$$

$$\Rightarrow H = \frac{Ni}{l_c} = \frac{\mathfrak{Z}}{l_c}$$



$$\mathfrak{Z} = Ni \rightarrow \text{Força magnetomotriz (f.m.m.)}$$

■ Rudimentos de Magnetismo

■ Densidade de Fluxo Magnético

... A relação entre o vector intensidade do campo magnético \vec{H} e o **vector indução magnética** \vec{B} (ou densidade de fluxo magnético) resultante, produzida num determinado material, é dada pela expressão,

$$\vec{B} = \mu \vec{H} = \mu_r \mu_0 \vec{H} \quad \text{T (tesla) ou Wb/m}^2 \text{ (weber/m}^2\text{)}$$

- μ é a **permeabilidade magnética** do material onde se produz o campo
- μ_r é a **permeabilidade relativa** do material onde se produz o campo
- μ_0 é a permeabilidade magnética do **vazio**:

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m (henry/m)}$$

■ Rudimentos de Magnetismo

■ Densidade de Fluxo Magnético

... a densidade do fluxo magnético produzido num determinado material é o resultado do produto de dois termos:

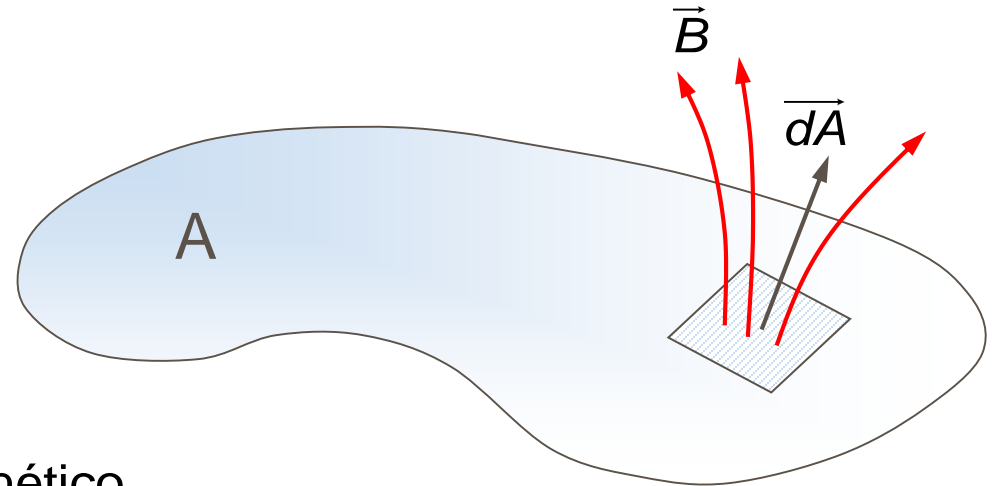
- H , que depende da intensidade da corrente I utilizada para estabelecer o campo e da **geometria** do circuito magnético
- μ , que tem a ver com a maior ou menor facilidade concedida pelo material para o estabelecimento do campo magnético (depende da sua estrutura atómica).

■ Rudimentos de Magnetismo

■ Fluxo Magnético

... o fluxo magnético através de uma superfície **A** (aberta ou fechada) define-se do seguinte modo:

$$\phi = \int_A \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad \text{Wb (weber)}$$



$\vec{B} \rightarrow$ **vector** densidade de fluxo magnético

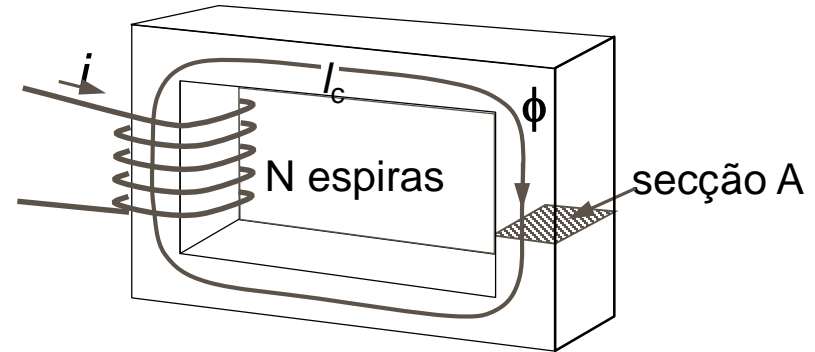
$d\vec{A} \rightarrow$ **unidade diferencial** de área

■ Rudimentos de Magnetismo

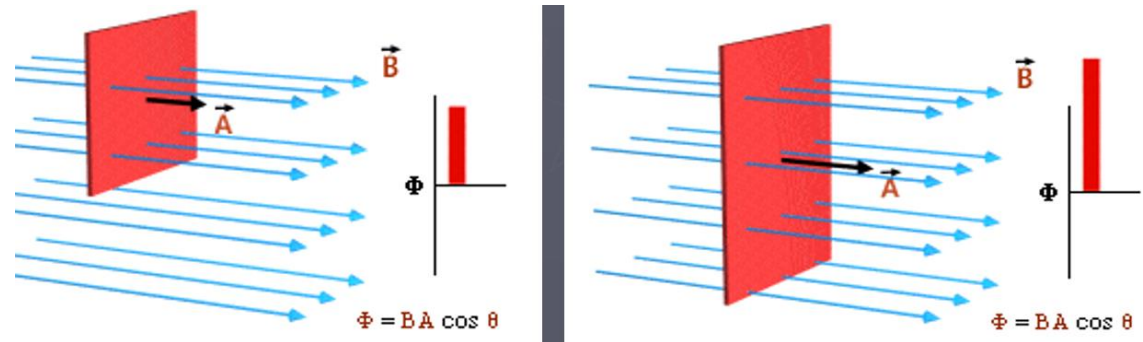
■ Fluxo Magnético

$$\phi = \int_A \vec{B} \cdot d\vec{A} = BA = \mu H A$$

$$\rightarrow \phi = \frac{\mu N i A}{l_c} = \frac{\mu A}{l_c} \mathfrak{F}$$



ϕ depende da área

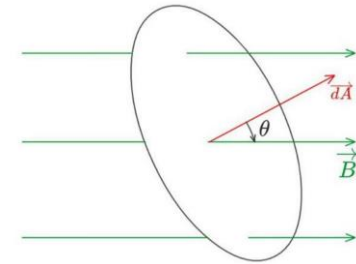


Tópicos Preliminares

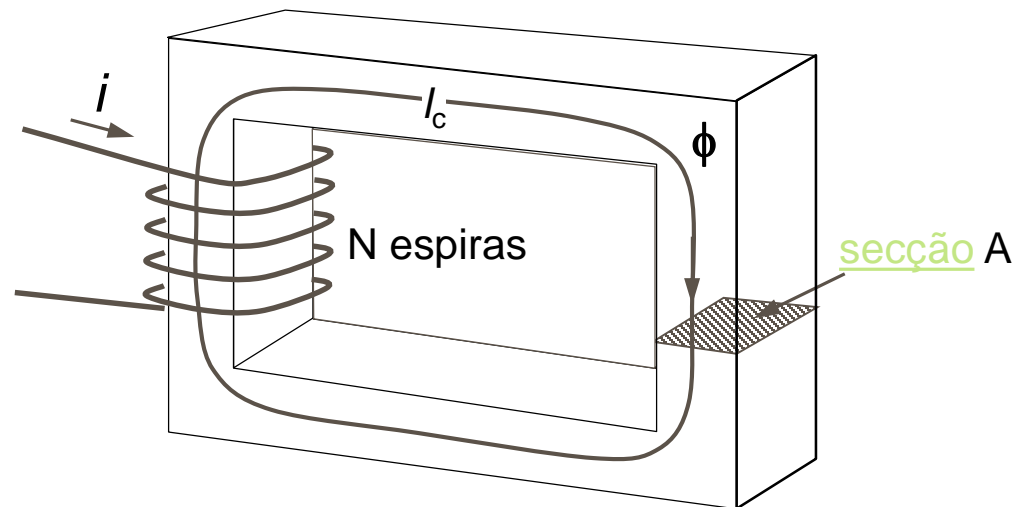
Se admitirmos que:

- todas as linhas de força do campo se fecham através do ferro
- que a densidade do fluxo \mathbf{B} é constante
- que o vector \mathbf{B} é perpendicular à superfície \mathbf{A} ($\theta = 0^\circ$)

Então $\phi = B.A$



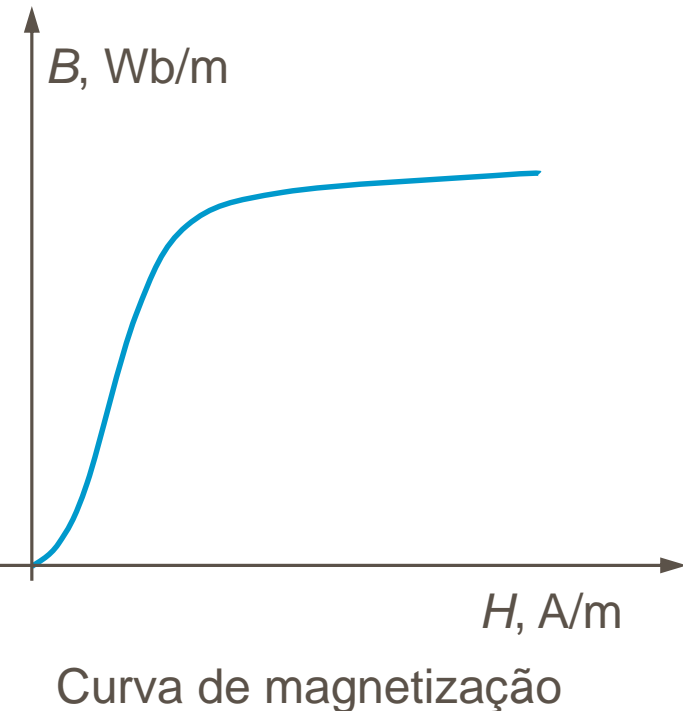
ϕ depende do ângulo entre \vec{B} e \vec{dA}



■ Rudimentos de Magnetismo

■ Comportamento de Materiais Ferromagnéticos

Um material ferromagnético depois de sujeito à acção de um campo magnético externo, apresenta um momento magnético espontâneo, ie, um momento magnético mesmo no contexto de ausência de um campo magnético externo. A existência de um momento espontâneo sugere que os spins dos electrões e os seus momentos magnéticos estão arrançados de uma maneira regular. O facto do momento magnético ser diferente após a remoção do campo magnético externo, deve-se à **histerese**.

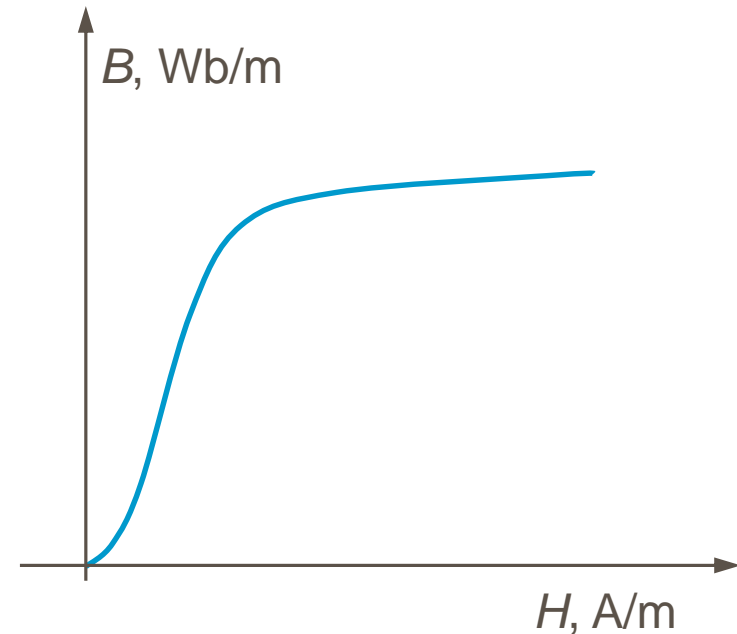


■ Rudimentos de Magnetismo

■ Comportamento de **Materiais Ferromagnéticos**

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

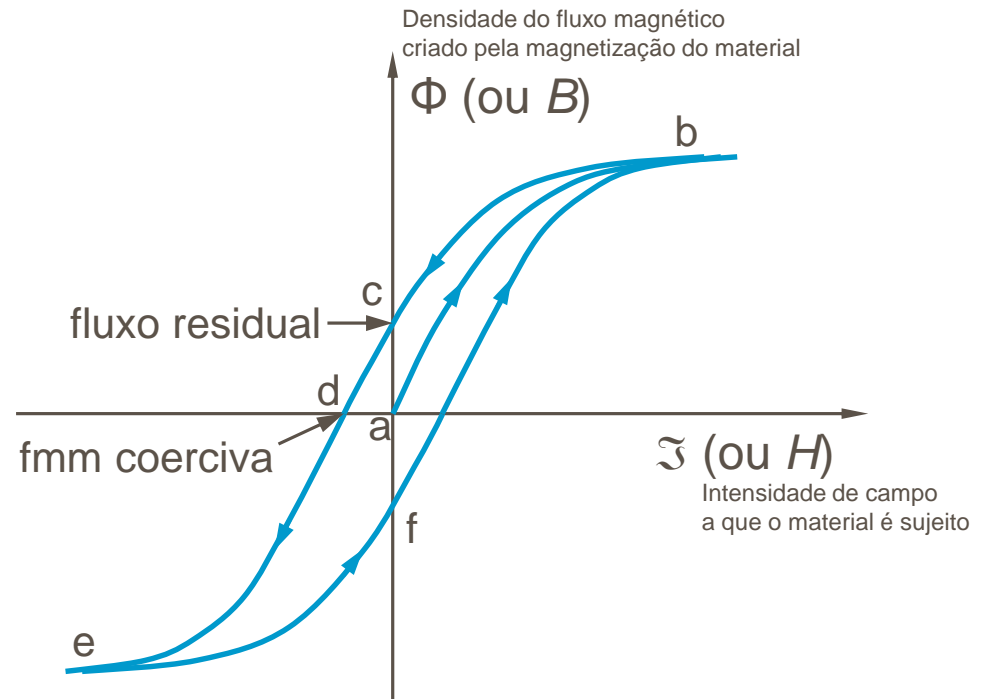
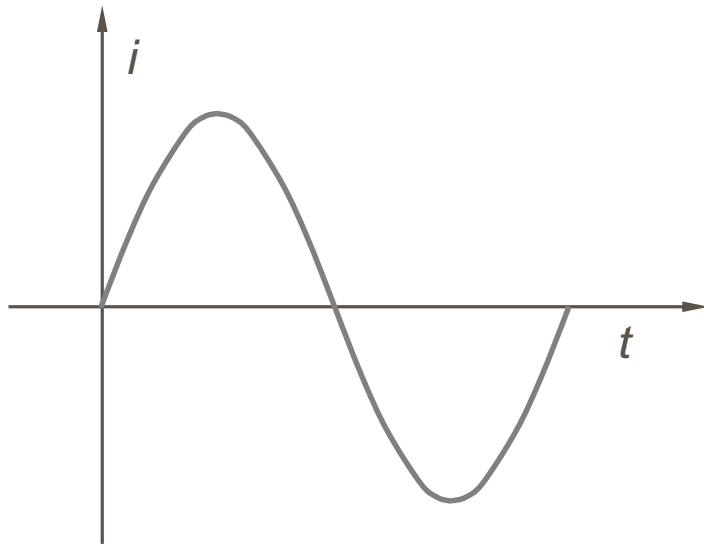
- μ é constante para o vazio e materiais isotrópicos (a relação entre \vec{B} e \vec{H} é linear)
- Para os materiais ferromagnéticos μ depende do próprio valor da densidade de fluxo magnético (a relação não é linear)



Curva de magnetização

■ Rudimentos de Magnetismo

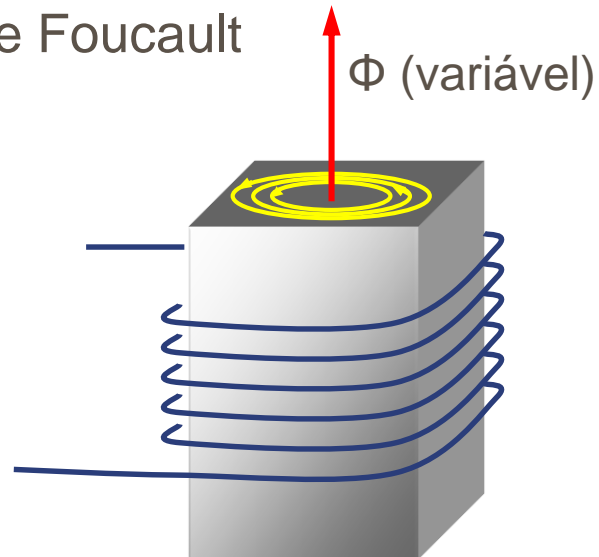
- Perdas nos materiais ferromagnéticos (devidas à histerese)



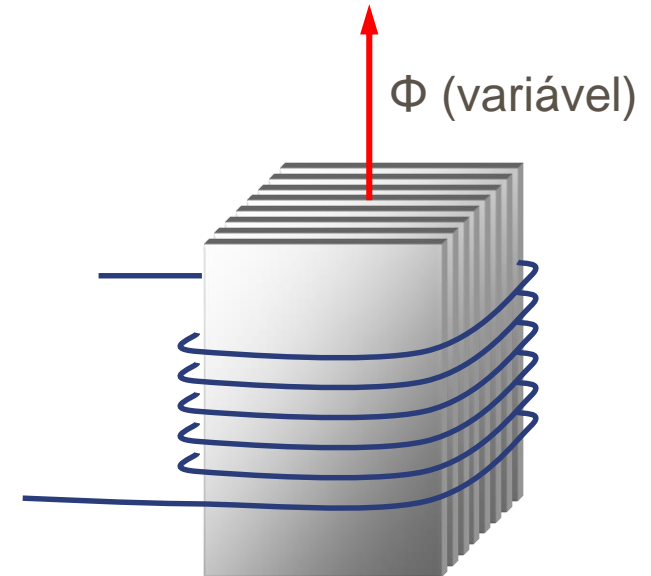
Do fenómeno da histerese resultam perdas no ferro das máquinas eléctricas que se costumam designar por **perdas por histerese**.

■ Rudimentos de Magnetismo

■ Correntes de Foucault



Ferro normal
(maciço)



Ferro laminado

Corrente de Foucault é o nome dado à corrente induzida num material condutor quando sujeito a um fluxo magnético variável.

Um aspeto indesejável deste fenómeno, é o aquecimento do material, por efeito de Joule.

Com ferro laminado e isolado diminuem-se as correntes de Foucault

■ Rudimentos de Magnetismo

- Produção de F.E.M num Condutor que se Movimenta num Campo Magnético

... Num condutor que se move no seio dum campo magnético induz-se uma f.e.m que se exprime do seguinte modo:

$$e_{ind} = (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot \vec{l}$$

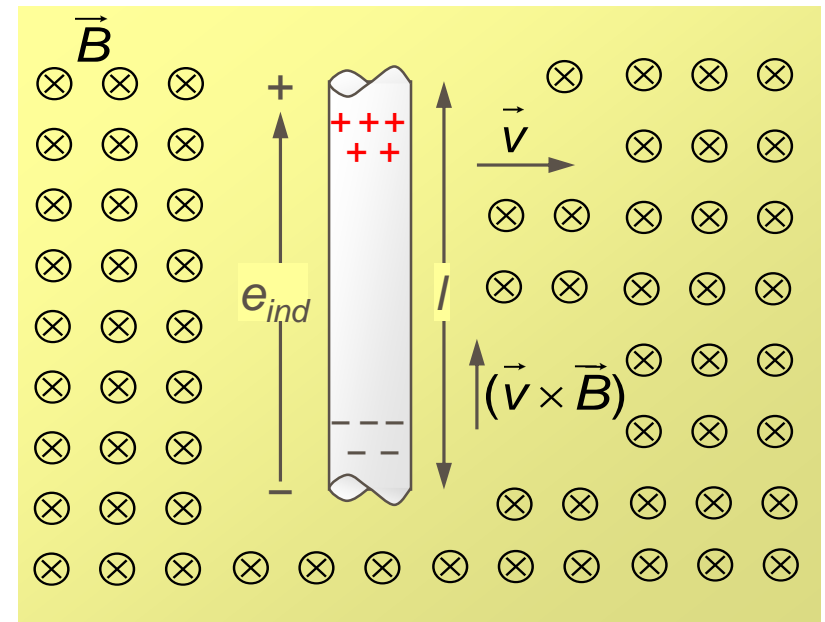
$\vec{v} \rightarrow$ velocidade do deslocamento

$\vec{B} \rightarrow$ densidade de fluxo magnético

■ Rudimentos de Magnetismo

- Produção de F.E.M num Condutor que se Movimenta num Campo Magnético (exemplo)

$$\begin{aligned} e_{ind} &= (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot \vec{l} = \\ &= v \cdot B \cdot \sin(90^\circ) \cdot l \cdot \cos(0^\circ) \\ &= vBl \end{aligned}$$



<http://micro.magnet.fsu.edu/electromag/java/generator/dc.html>

■ Rudimentos de Magnetismo

■ Produção de Força num Condutor

Um condutor percorrido por uma corrente eléctrica no seio dum campo magnético sofre a acção duma força...

As diferentes grandezas em jogo, relacionam-se do seguinte modo:

$$\vec{F} = i(\vec{l} \times \vec{B})$$

$i \rightarrow$ intensidade da corrente

$\vec{B} \rightarrow$ densidade de fluxo magnético

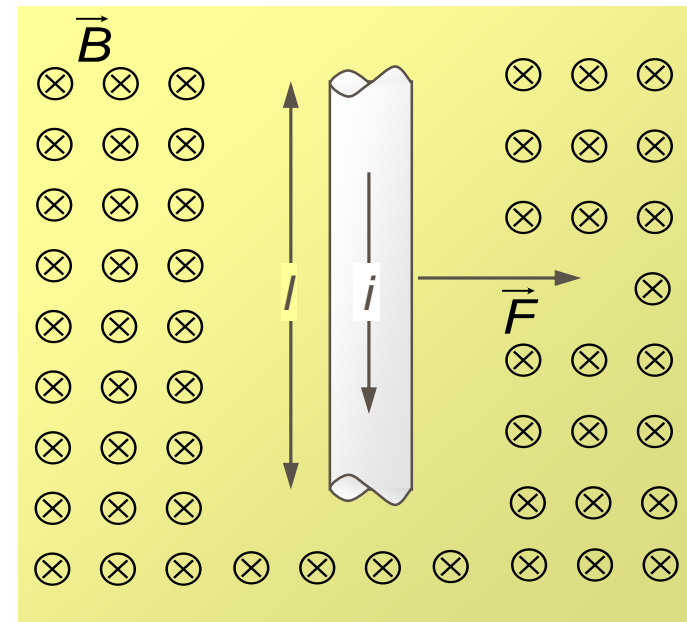
■ Rudimentos de Magnetismo

■ Produção de Força num Condutor (exemplo)

$$\begin{aligned}\vec{F} &= i(\vec{l} \times \vec{B}) \\ &= ilB \quad (\text{porque } \vec{l} \perp \vec{B})\end{aligned}$$

Caso geral:

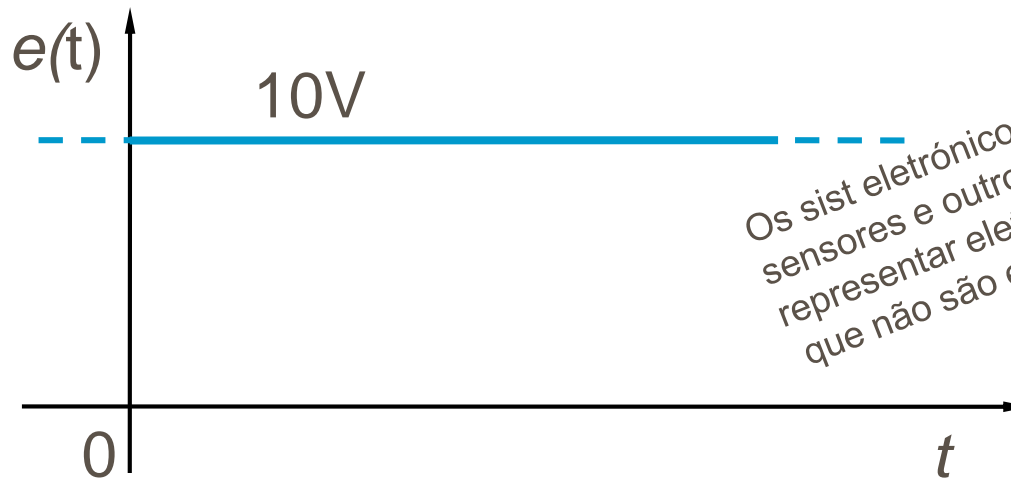
$$\vec{F} = ilB \sin(\theta) \quad (\theta = \angle \vec{l}, \vec{B})$$



θ = angulo entre a corrente i e o campo B

■ Representação de Sinais (matemática e gráfica)

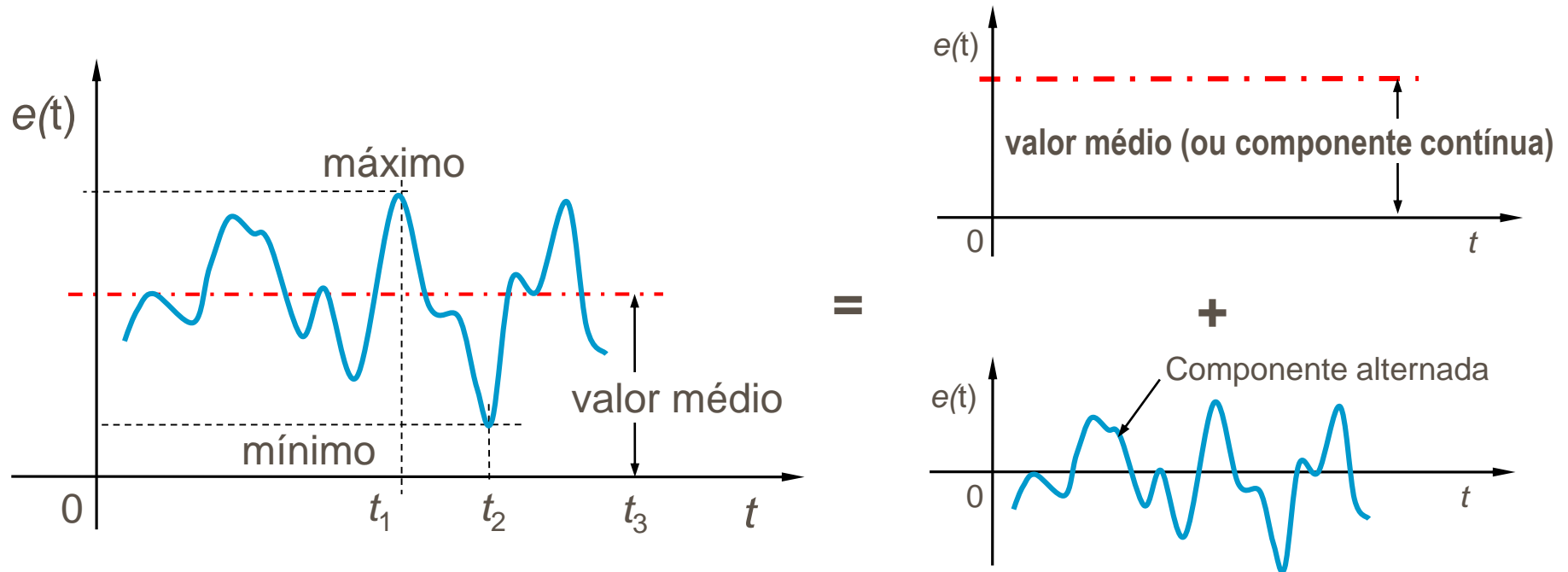
- ... os sinais eléctricos são grandezas (eléctricas) que apresentam uma determinada evolução ao longo do tempo (são função da variável tempo t)...



Os sist eletrónicos conseguem através de sensores e outros sub-sistemas associados, representar eletricamente grandezas que não são elétricas.

$$e(t) = 10 \text{ V}$$

■ Representação de Sinais (matemática e gráfica)

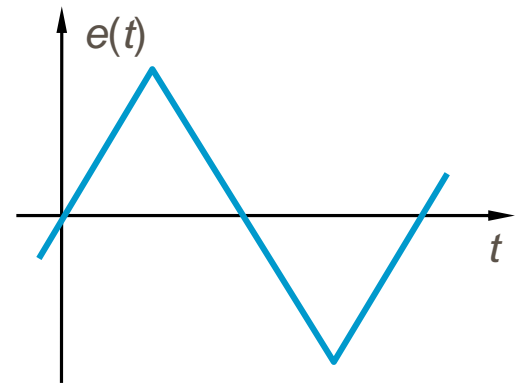
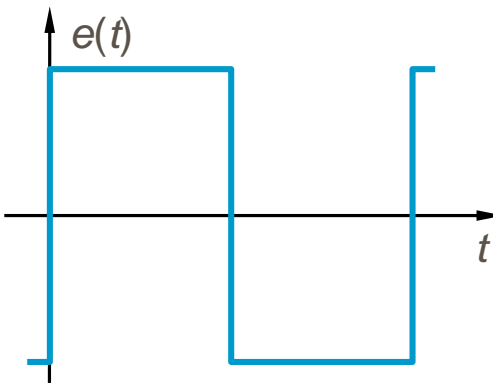
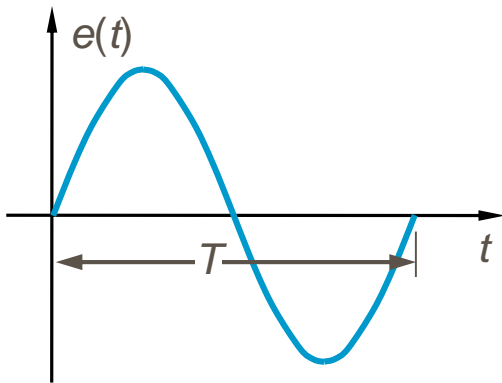


$$e(t) = \text{componente contínua} + \text{componente alternada}$$

■ Representação de Sinais (matemática e gráfica)

■ Sinais periódicos

$$e(t + T) = e(t)$$



■ Representação de Sinais (matemática e gráfica)

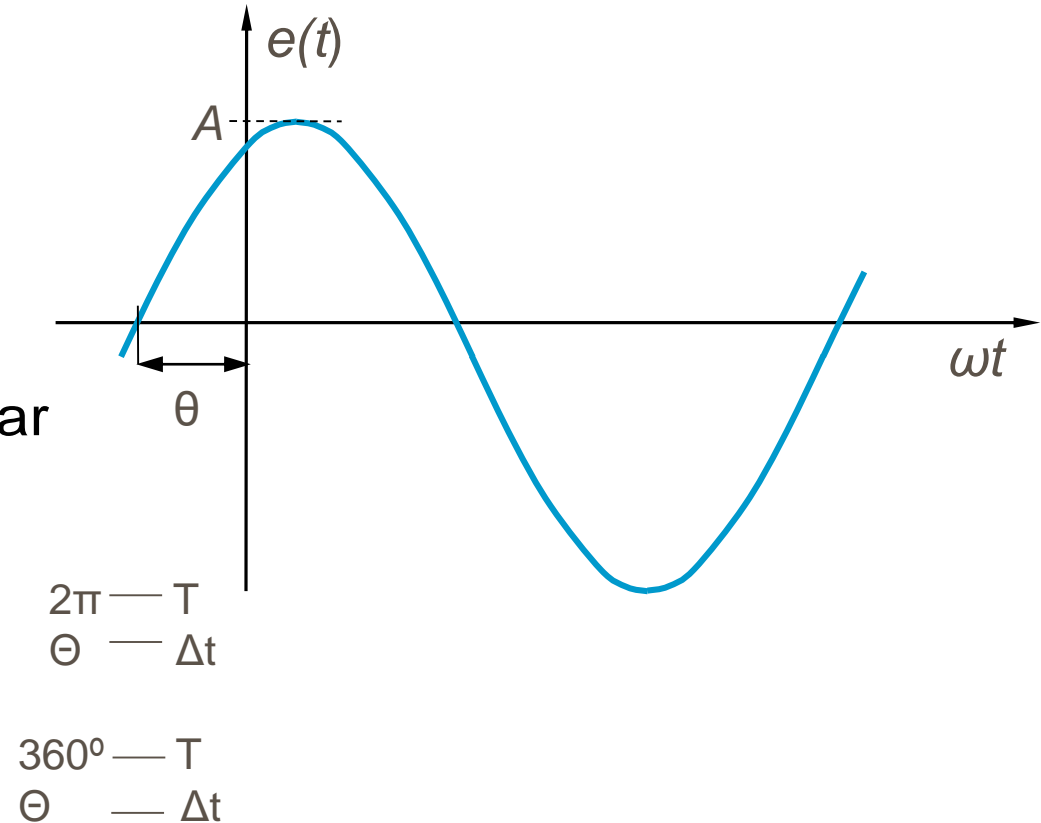
■ Sinais sinusoidais

$$e(t) = A \cdot \text{sen}(\omega t + \theta)$$

$\omega = 2\pi f \rightarrow$ frequência angular

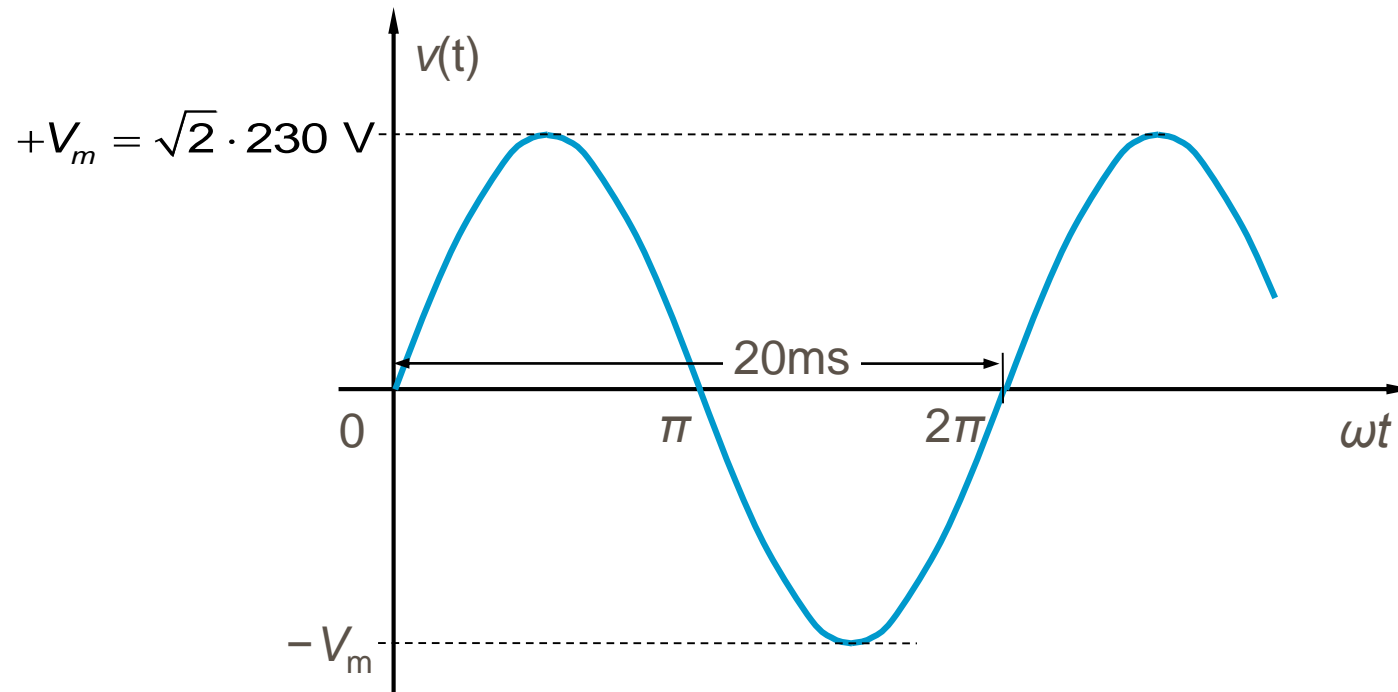
$A \rightarrow$ amplitude

$\theta \rightarrow$ fase



■ Representação de Sinais (matemática e gráfica)

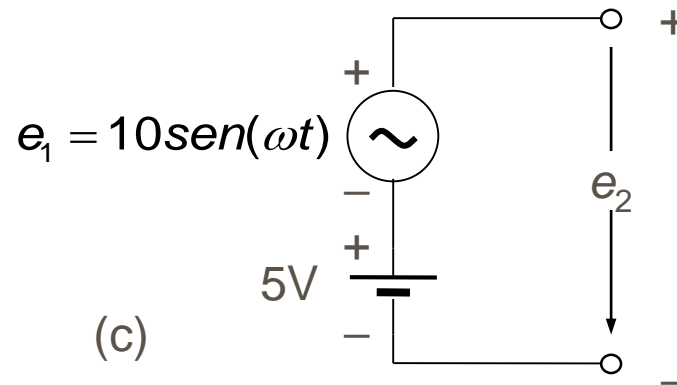
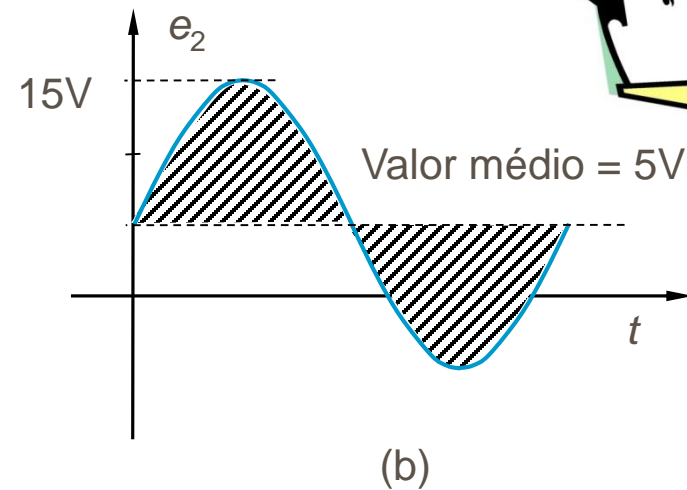
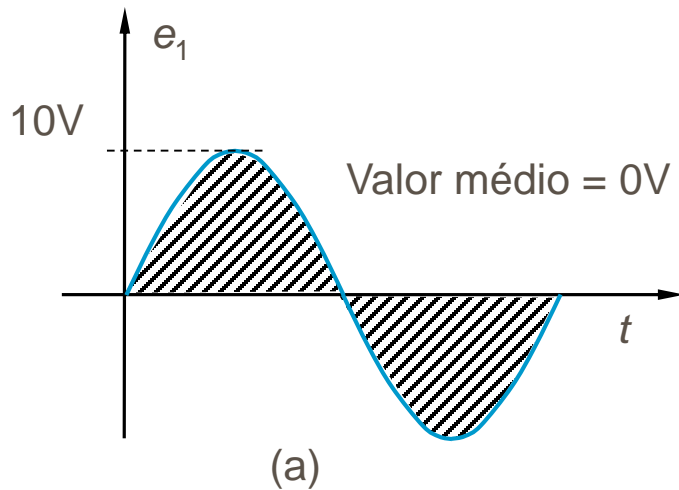
■ Sinais sinusoidais



Forma de onda da tensão na rede de energia eléctrica

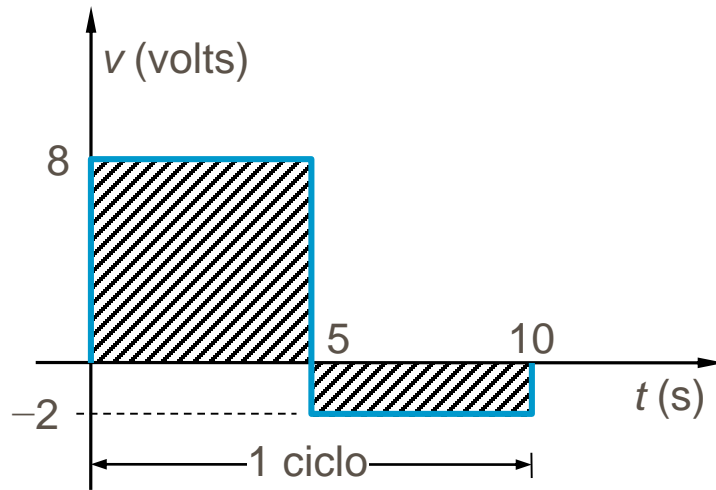
Tópicos Preliminares

■ Valor Médio

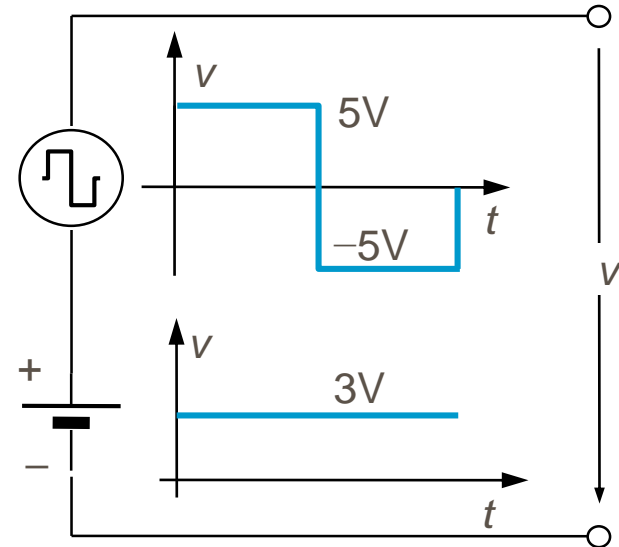


E se inverter a fonte DC?

■ Valor Médio



(a)



(b)

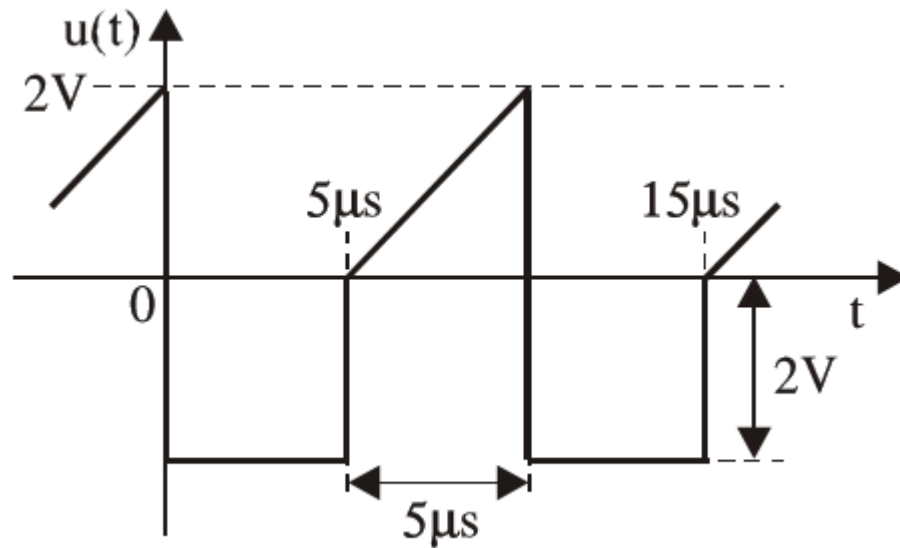
$$G (\text{valor médio}) = \frac{\text{área (soma algébrica)}}{T (\text{período})}$$

$$G = \frac{A_1 - A_2}{T} = \frac{(8 \text{ V})(5 \text{ s}) - (2 \text{ V})(5 \text{ s})}{10 \text{ s}} = \frac{30}{10} = 3 \text{ V}$$

Valor Médio



E se fôr este sinal,
qual é o valor médio?



■ Valor Médio (cálculo para o caso geral)

$$G = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} e(t) dt$$

■ Valor Eficaz

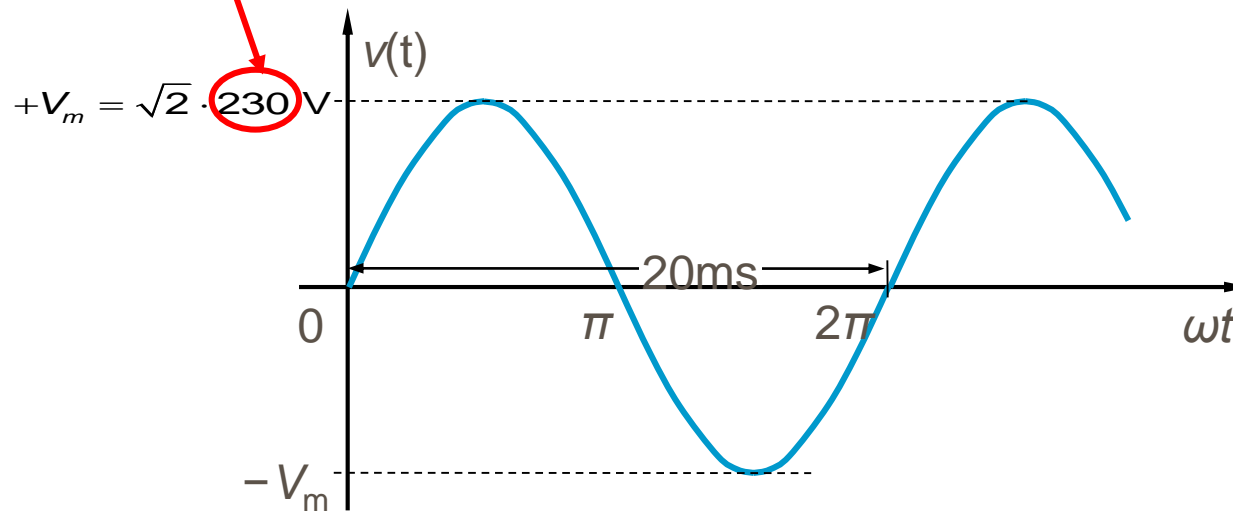
$$E_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} e(t)^2 dt}$$

O valor eficaz de uma grandeza alternada é o valor da grandeza contínua que, para uma dada resistência, produz, num dado tempo, o mesmo *Efeito de Joule* (calorífico) que a grandeza alternada considerada.

O valor eficaz é também conhecido como valor médio quadrático (RMS - *Root Mean Square*)

■ Valor Eficaz

$$E_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} e(t)^2 dt}$$



O valor eficaz de uma grandeza alternada é o valor da grandeza contínua que, para uma dada resistência, produz, num dado tempo, o mesmo *Efeito de Joule* (calorífico) que a grandeza alternada considerada.

O valor eficaz é também conhecido como valor médio quadrático (RMS - *Root Mean Square*)

■ Exemplo: valor eficaz da sinusóide

$$E_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} e(t)^2 dt}$$

$$E_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T A^2 \text{sen}^2(wt) dt} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^\alpha A^2 \text{sen}^2(\varphi) d\varphi}$$

$$E_{\text{eff}}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_0^\alpha A^2 \text{sen}^2(\varphi) d\varphi = \frac{A^2}{4\pi} \int_0^{2\pi} (1 - \cos(2\alpha)) d\alpha = \frac{A^2}{4\pi} \left[\alpha - \frac{1}{2} \text{sen}(2\alpha) \right]_0^{2\pi} =$$

$$= \frac{A^2}{2}$$

$$\rightarrow E_{\text{eff}} = \frac{A}{\sqrt{2}}$$

Tópicos Preliminares

■ Quantidades em corrente contínua (cc):

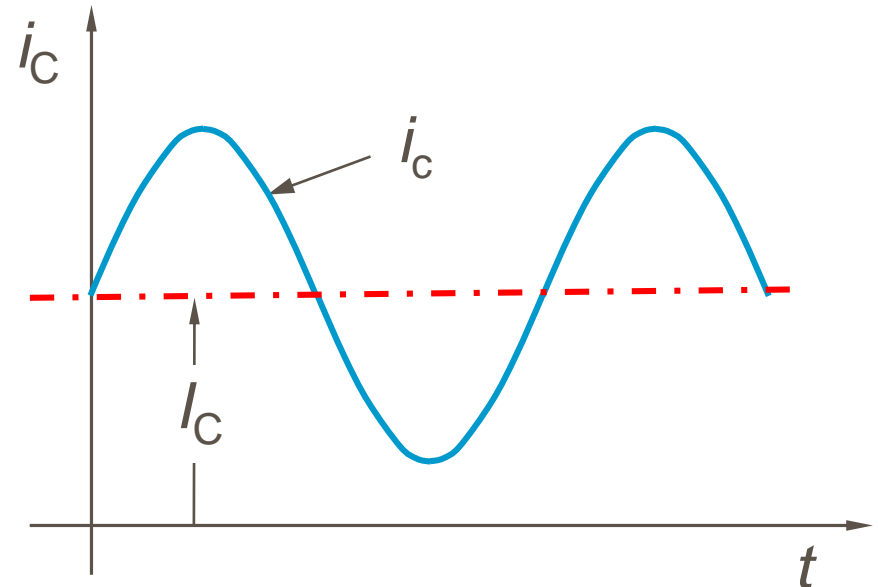
Letras maiúsculas para a variável e para o índice (I_B , I_C , V_{CE})

■ Quantidades em corrente alternada (ca):

Letras minúsculas para a variável e para o índice (i_b , i_c , v_{ce})

■ Quantidades totais (cc + ca):

Letras minúsculas para a variável e maiúscula para o índice (i_B , i_C , v_{CE})



Tópicos Preliminares

■ Sistemas de unidades do SI

Grandeza		Unidade	
Nome	Símbolo	Nome	Símbolo
potencial eléctrico	U	volt	V
tensão, diferença de potencial ou queda de potencial	U, E	volt	V
corrente eléctrica	I	ampere	A
energia	W	joule	J
potência	P	watt	W
frequência	f	hertz	Hz
resistência eléctrica	R	ohm	Ω
resistividade	ρ	ohm metro	$\Omega \cdot m$
capacidade eléctrica	C	farad	F
permitividade	ϵ	farad por metro	$F \cdot m^{-1}$
coeficiente de auto-indução	L	henry	H
permeabilidade	μ	henry por metro	$H \cdot m^{-1}$
momento do binário	T	newton metro	$N \cdot m$

Tópicos Preliminares

Múltiplos

Nome	Símbolo	Factor multiplicador
yotta	Y	$10^{24} = 1\,000\,000\,000\,000\,000\,000\,000\,000$
zetta	Z	$10^{21} = 1\,000\,000\,000\,000\,000\,000\,000\,000$
exa	E	$10^{18} = 1\,000\,000\,000\,000\,000\,000\,000$
peta	P	$10^{15} = 1\,000\,000\,000\,000\,000\,000$
tera	T	$10^{12} = 1\,000\,000\,000\,000\,000$
giga	G	$10^9 = 1\,000\,000\,000$
mega	M	$10^6 = 1\,000\,000$
quilo	k	$10^3 = 1000$
hecto	h	$10^2 = 100$
deca	da	$10^1 = 10$

Tópicos Preliminares

Submúltiplos

Nome	Símbolo	Factor multiplicador
deci	d	$10^{-1} = 0,1$
centi	c	$10^{-2} = 0,01$
mili	m	$10^{-3} = 0,001$
micro	μ	$10^{-6} = 0,000\ 001$
nano	n	$10^{-9} = 0,000\ 000\ 001$
pico	p	$10^{-12} = 0,000\ 000\ 000\ 001$
fento	f	$10^{-15} = 0,000\ 000\ 000\ 000\ 001$
ato	a	$10^{-18} = 0,000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 001$
zepto	z	$10^{-21} = 0,000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 001$
yocto	y	$10^{-24} = 0,000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 001$

■ Rudimentos de Electricidade

■ Tensão Eléctrica

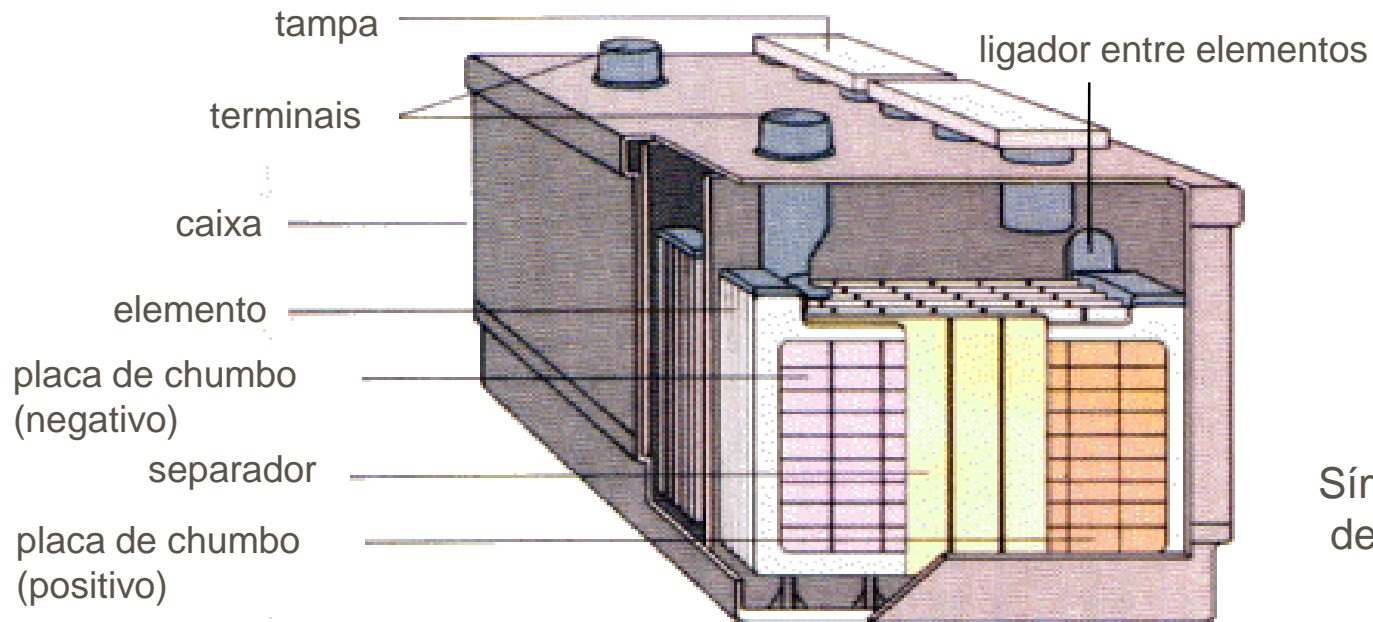
- A tensão é uma medida da energia envolvida no transporte de uma carga **elementar entre dois pontos de um campo eléctrico**. É uma quantidade que se mede em **volts** (V) e que coincide com o cociente entre a energia libertada e a quantidade de carga transportada:

$$Tensão = \frac{W}{Q} \text{ V (volts)}$$

■ Rudimentos de Electricidade

■ Fontes de Tensão

Uma fonte de energia transforma uma forma de energia neste caso, química em energia elétrica



Símbolo de uma fonte de tensão de corrente contínua (CC)

Bateria de chumbo

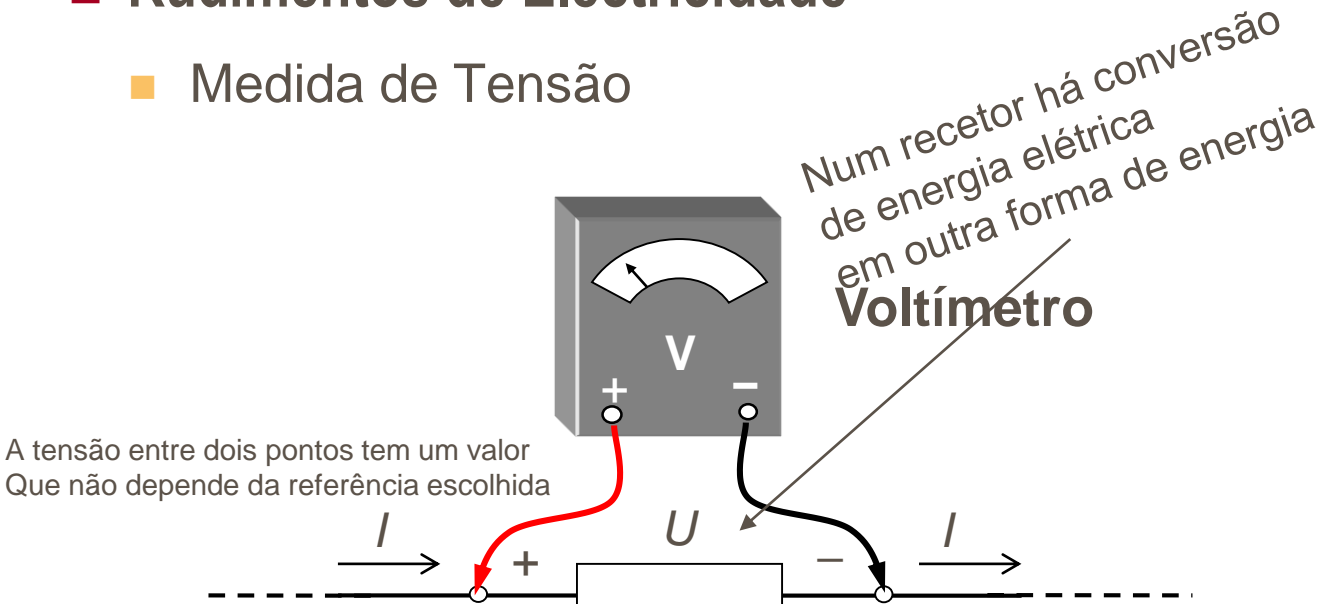
■ Rudimentos de Electricidade

- Valor nominal da tensão de fontes bem conhecidas:
 - Tensão gerada pelas células nervosas: cerca de 30 mV
 - Baterias recarregáveis NiMH or NiCd (por cada célula): 1.2 V
 - Bateria de mercúrio 1.355 V
 - Baterias alcalinas (tipo AAA, AA, C e D): 1.5 V
 - Alimentação do sistema eléctrico dos automóveis: 12 V (nominal)
 - Tensão nominal de rede eléctrica doméstica: 230 V (eficazes ou RMS) na Europa, Austrália, Ásia e África, 120 V na América do Norte, 100 V no Japão
 - Tensão de alimentação de comboios de alta velocidade: 25 kV eficazes
 - Linhas de transporte de energia eléctrica em alta tensão: entre 110 kV e 1150 kV eficazes
 - Relâmpago: varia muito, frequentemente à volta de 100 MV.

Tópicos Preliminares

■ Rudimentos de Electricidade

■ Medida de Tensão



Tensão num ponto, não tem significado físico.

Só existe tensão entre dois pontos.

Pode-se eventualmente falar em potencial num ponto (sub-entendendo-se que se trata da tensão desse ponto relativamente a uma referência)

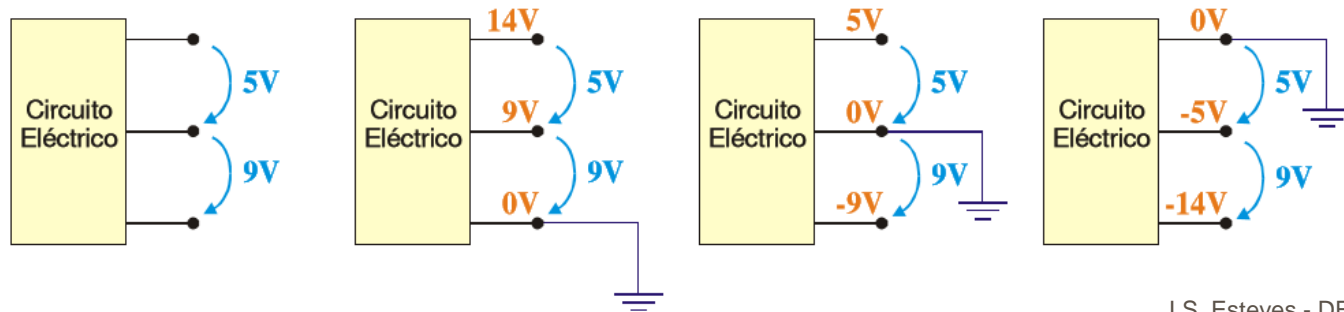
Resistência interna do voltímetro ideal

$$\rightarrow R = \infty \Omega$$

Qual deverá ser a resistência interna do voltímetro para se obter uma medida correcta?



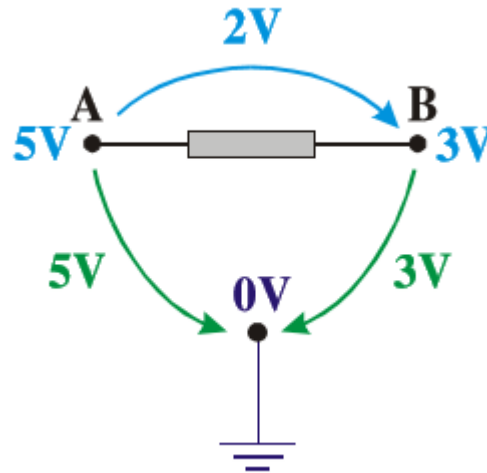
Tópicos Preliminares



J.S. Esteves - DEIC

A tensão entre dois pontos de um circuito tem um valor que não depende da referencia escolhida

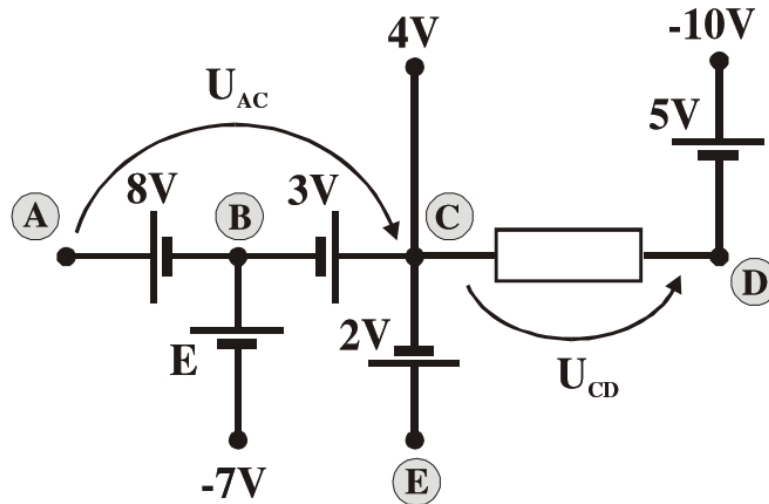
Tópicos Preliminares



J.S. Esteves - DEIC

O potencial elétrico que existe num ponto depende da referência escolhida

Tópicos Preliminares



$U_A =$

$U_B =$

$U_C =$

$U_D =$

$U_E =$

$E =$

$U_{AC} =$

$U_{CD} =$

■ Rudimentos de Electricidade

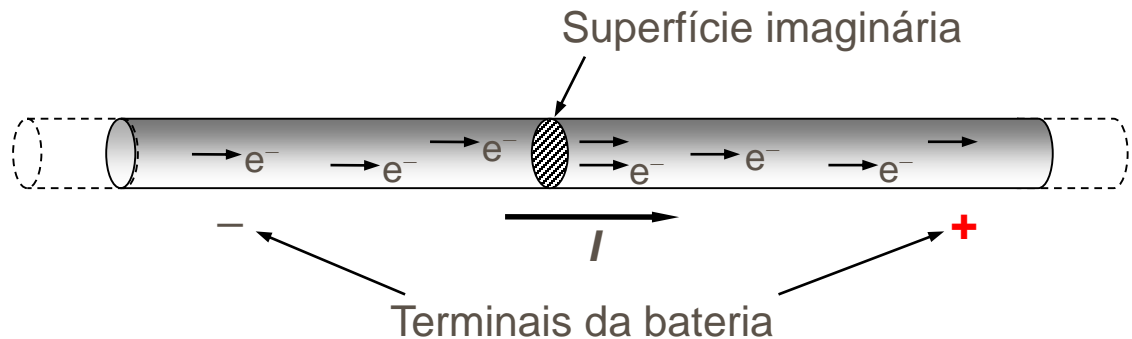
■ Corrente Eléctrica

... define-se corrente média como a quantidade de carga eléctrica que na unidade de tempo atravessa uma dada superfície ...

$$I = \frac{Q}{\Delta T} \text{ A (ampere)}$$

$$\rightarrow i(t) = \frac{dq}{dt}$$

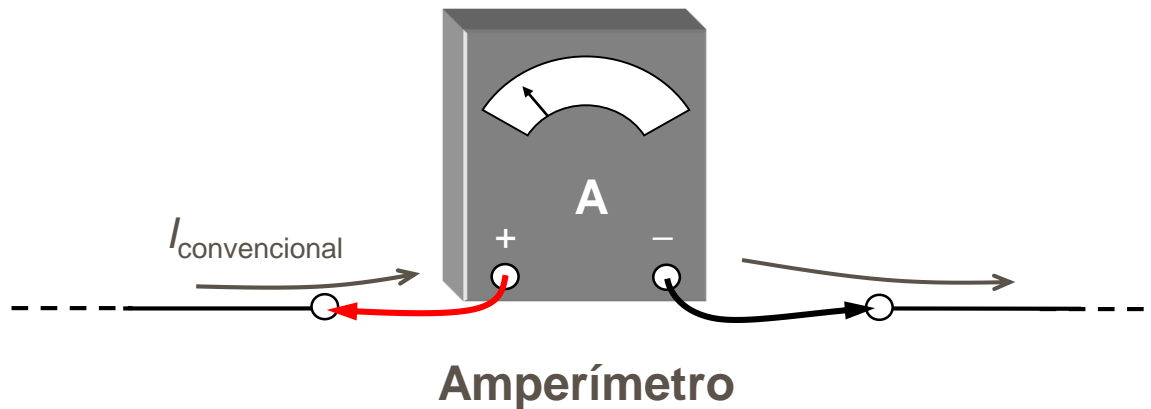
$$\rightarrow q(t) = \int_{-\infty}^t i(\tau) d\tau$$



Tópicos Preliminares

■ Rudimentos de Electricidade

■ Medida Corrente Eléctrica



Resistência interna do amperímetro ideal

$$\rightarrow R = 0 \, \Omega$$

Qual deverá ser a resistência interna do amperímetro para se obter uma medida correta?



■ Rudimentos de Electricidade

■ Potência Eléctrica

... a potência (caso geral) é uma medida do ritmo a que se dissipa ou acumula energia...

$$P = \frac{W}{\Delta T} \text{ W (watt)}, \quad p(t) = \frac{dw(t)}{dt}, \quad w(t) = \int_{-\infty}^t p(\tau) d\tau$$

Tendo em conta as relações entre trabalho, tensão, carga, tempo e corrente eléctrica, a potência eléctrica é dada por (valor médio),

$$P = \frac{W}{\Delta T} = \frac{W}{Q} \frac{Q}{\Delta T} = VI \text{ (W)}$$

$$[\text{J/C}] \cdot [\text{C/s}] = [\text{J/s}] = \text{W (Watt)}$$

■ Rudimentos de Electricidade

■ Potência/Energia Eléctrica

$$W = P \cdot t \quad [J] = [W] \cdot [s]$$

$$W \text{ (em kWh)} = \frac{P \text{ (em watts)} \times t \text{ (em horas)}}{1000}$$

$$1 \text{ kWh} = 1000W \times 3600s = 3.600.000J = 3.600kJ = 3,6 \text{ MJ}$$

■ Rudimentos de Electricidade

■ Potência/Energia Eléctrica

■ Exemplo

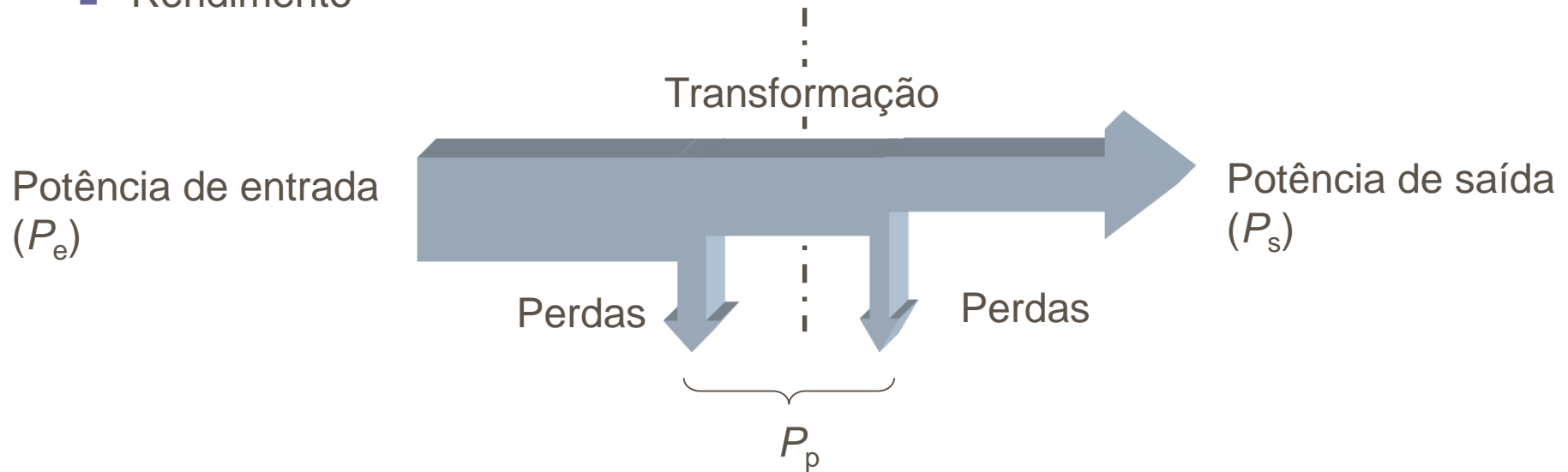
... qual é o custo da energia consumida por um radiador de 2 kW que funciona durante 1h30m?. Assuma que o custo do kWh são 0.1 €.

$$W = \frac{2000W \cdot 1.5h}{1000} = 3 \text{ kWh} \Rightarrow \text{Custo} = 3 \text{ kWh} \frac{0.1\text{€}}{\text{kWh}} = 0.3\text{€}$$

■ Rudimentos de Electricidade

■ Potência/Energia Eléctrica

■ Rendimento



$$P_e = P_s + P_p$$

$$\eta = \frac{P_s}{P_e} \times 100\%$$

■ Rudimentos de Electricidade

■ Resistência

... o fluxo ordenado de cargas eléctricas através de um material pressupõe a aplicação de uma diferença de potencial e é limitado pela estrutura interna do mesmo ...

Existem 3 tipos de materiais:

- Condutores
- Isoladores (não condutores)
- Semicondutores

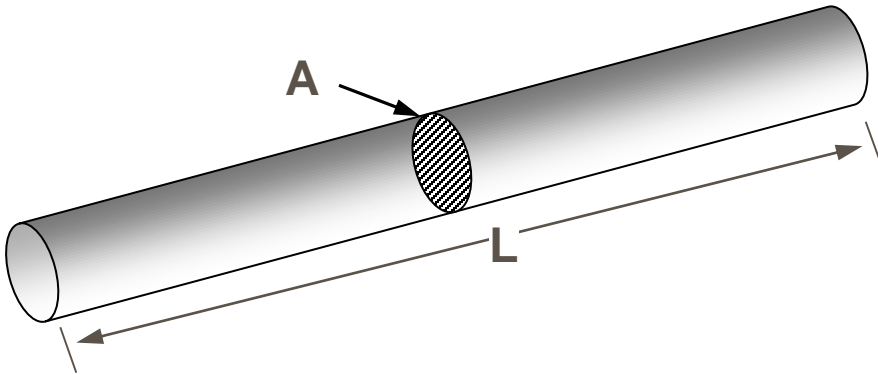
■ Rudimentos de Electricidade

■ Resistência de um condutor

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

← depende da geometria


Resistividade (depende do material e da temperatura)



Material	Resistividade (@ 20°C)
prata	$1.645 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$
cobre	$1.723 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$
ouro	$2.443 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$
alumínio	$2.825 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$
tungsténio	$5.485 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$
níquel	$7.811 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$
ferro	$1.229 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$
constantan	$4.899 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$
nicrómio	$9.972 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$
carbono	$3.5 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{m}$
silício	$2.3 \times 10^3 \Omega \cdot \text{m}$
polystirene	$\sim 10^{16} \Omega \cdot \text{m}$

■ Rudimentos de Electricidade

■ Resistência de um condutor

$$R = \rho \frac{L}{A}$$


Resistividade (também depende da temperatura)

Um condutor percorrido por uma corrente elétrica aquece por efeito de Joule

Aumentando a corrente, aumenta a dissipação térmica

Aumentando a temperatura, aumenta a resistência

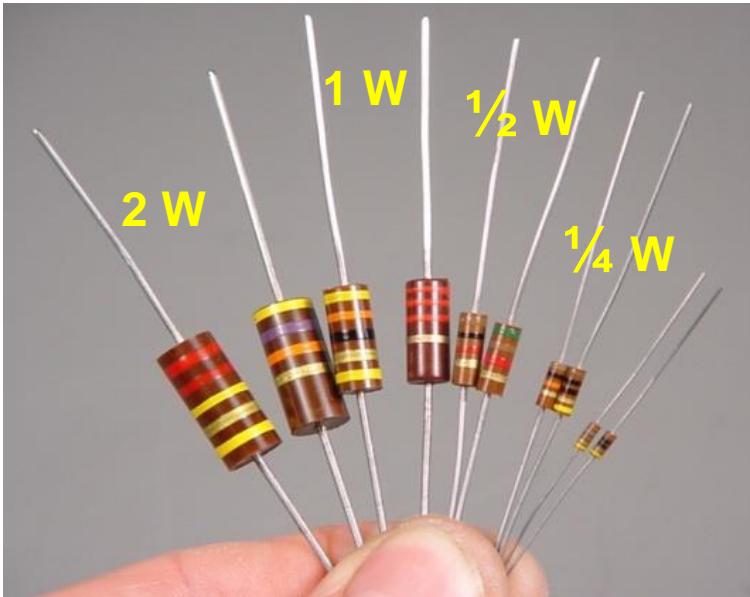
Assim, aumentando a corrente, aumenta a resistência!

Então como é possível ter resistências com um valor nominal fixo e conhecido?

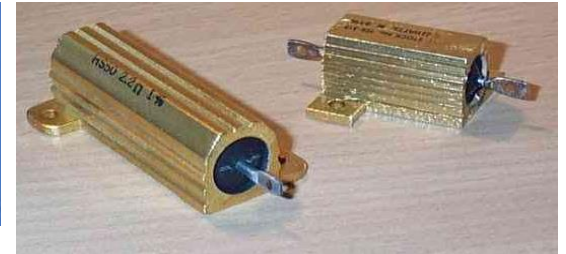
Na realidade, mantendo a temperatura do condutor constante (dentro dos intervalos definidos pelo fabricante), (usando dissipadores se necessário) a resistência do condutor permanecerá constante (dentro das tolerâncias)

■ Rudimentos de Electricidade

■ Tipos de Resistências



(a)

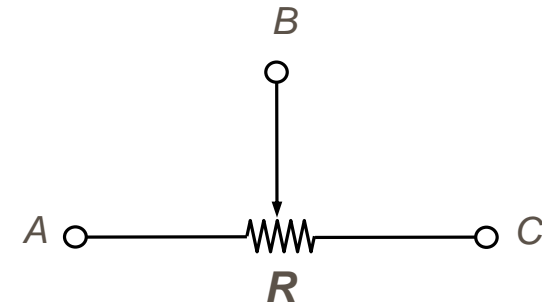


(b)

Resistências fixas: (a) de carbono; (b) bobinadas

■ Rudimentos de Electricidade

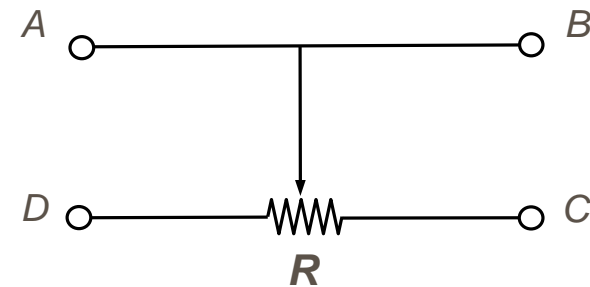
■ Tipos de Resistências



Potenciómetro rotativo (dispositivo e símbolo)

■ Rudimentos de Electricidade

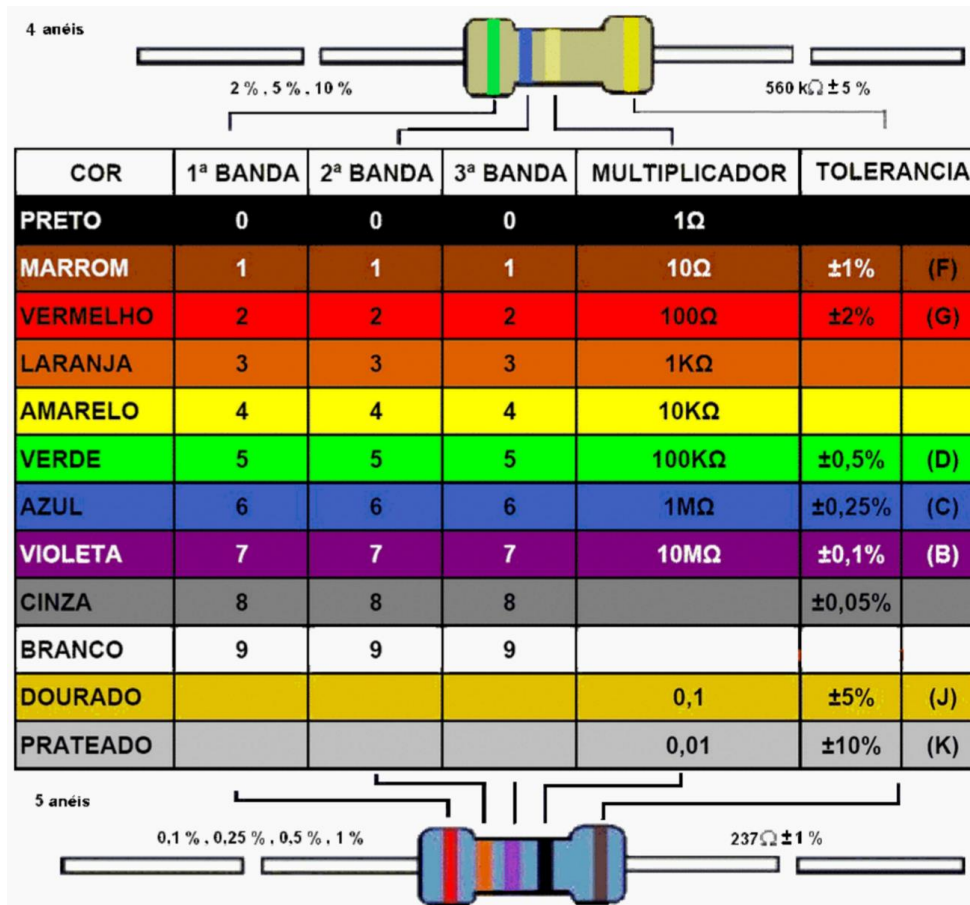
■ Tipos de Resistências



Reóstato bobinado (dispositivo e símbolo)

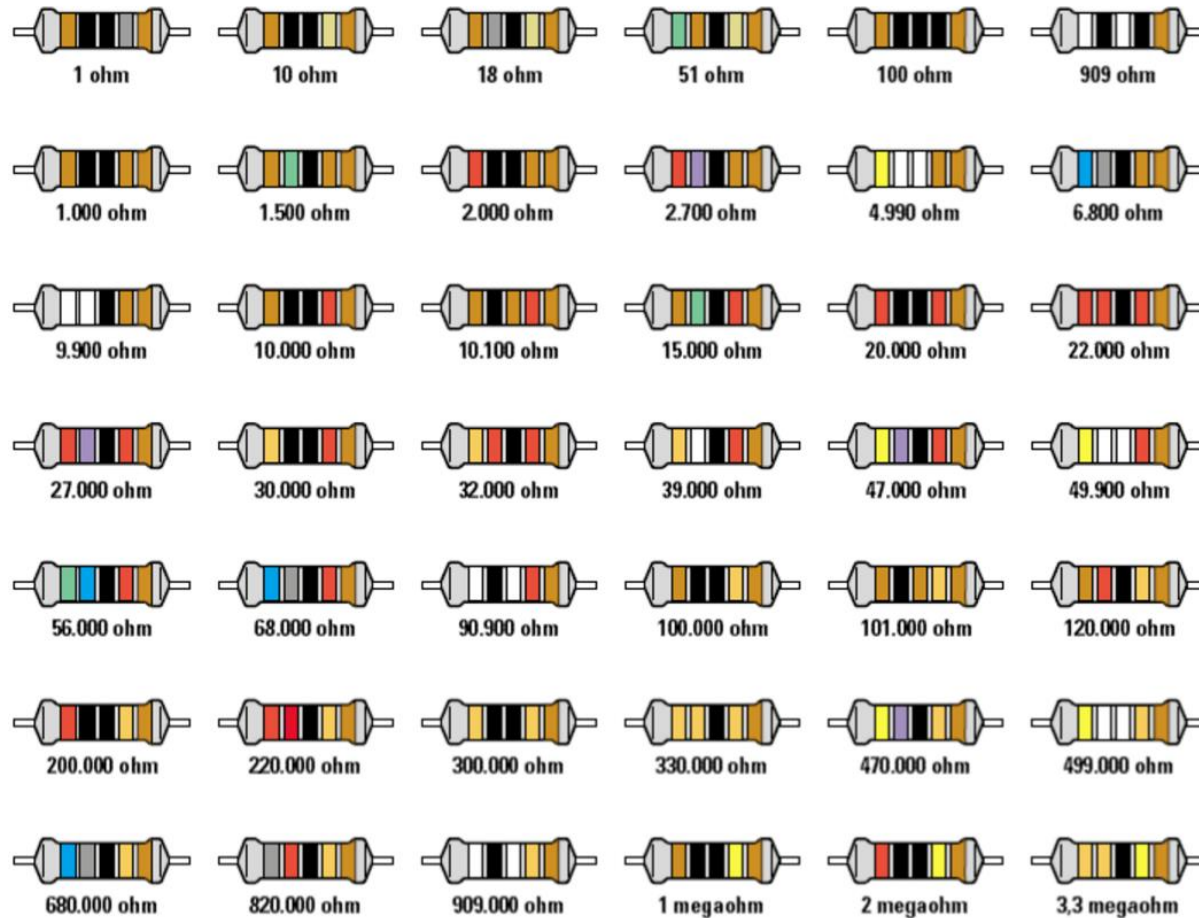
■ Rudimentos de Eletricidade

■ Medida/Especificação de resistências



Tópicos Preliminares

Exemplos



■ Rudimentos de Electricidade

■ Resistência. Lei de Ohm

... As duas grandezas eléctricas fundamentais – **tensão** e **corrente** – relacionam-se através de outra grandeza de igual importância: a **resistência** ...

... A relação entre as duas grandezas é descrita pela mais importante das leis dos circuitos eléctricos: a *lei de Ohm*:

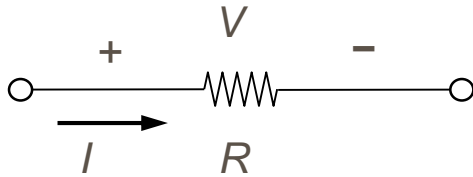
$$R = \frac{V}{I} \Omega \text{ (ohm)} \quad \rightarrow \quad I = \frac{V}{R}, \quad V = RI$$

A Lei de Ohm permite três interpretações distintas:

- i) para uma determinada tensão aplicada, a corrente é inversamente proporcional à resistência eléctrica do elemento;
- (ii) para uma determinada corrente aplicada, a tensão desenvolvida aos terminais do elemento é proporcional à resistência;
- (iii) a resistência de um elemento é dada pelo cociente entre a tensão e a corrente aos seus terminais

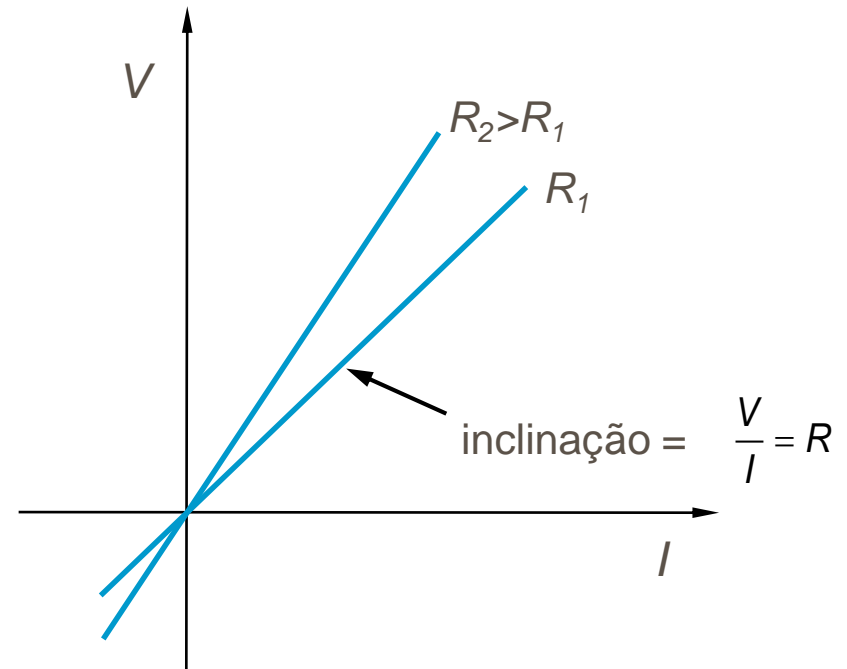
■ Rudimentos de Electricidade

■ Resistência. Lei de Ohm



Símbolo da resistência e polaridades

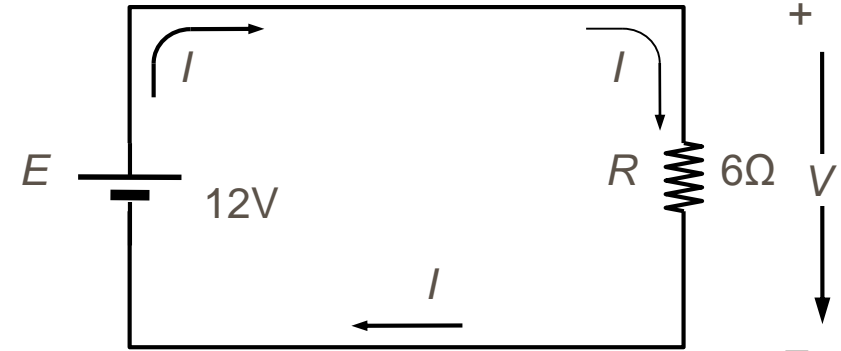
$$V = RI$$



■ Rudimentos de Electricidade

■ Resistência. Lei de Ohm

$$I = \frac{E}{R} = \frac{V}{R} = \frac{12\text{ V}}{6\ \Omega} = 2\text{ A}$$



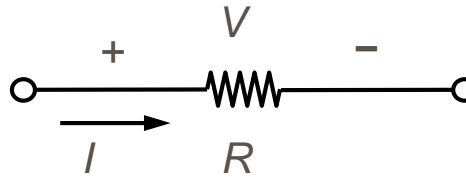
Circuito eléctrico simples



A corrente circula sempre
do potencial mais alto para o potencial mais baixo?

■ Rudimentos de Electricidade

■ Resistência. Lei de *Joule*



... a potência dissipada por *efeito de Joule* numa resistência é dada por:

$$P = V \times I = (R \times I) \times I = R \times I^2$$

Se a corrente triplicar, a potencia não aumenta 3 vezes!
A potência é proporcional ao quadrado da corrente.

$$P = V \times I = V \times \left(\frac{V}{R} \right) = \frac{V^2}{R}$$