



Universidade Federal do ABC

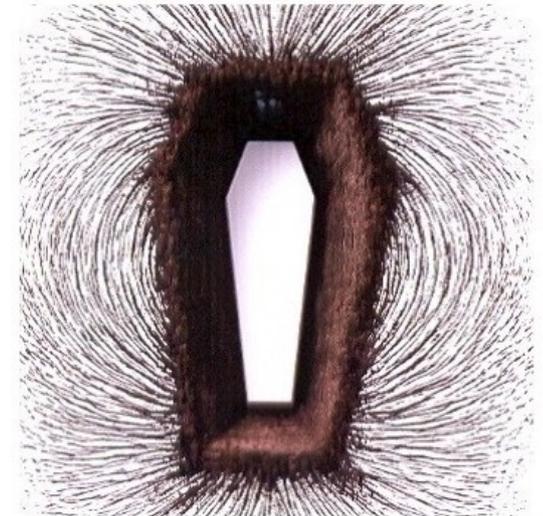
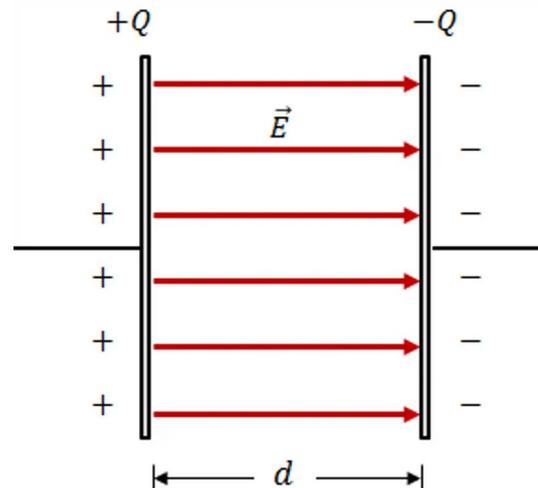
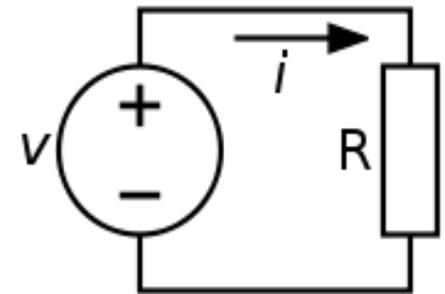
# Fenômenos Eletromagnéticos

09. Corrente elétrica, Resistência e Lei de Ohm, Supercondutores, Um modelo de condução elétrica, Energia e potência nos circuitos elétricos

Prof. Pieter Westera

[pieter.westera@ufabc.edu.br](mailto:pieter.westera@ufabc.edu.br)

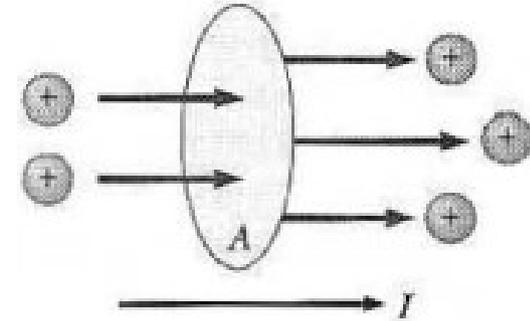
<http://professor.ufabc.edu.br/~pieter.westera/EM.html>



# Corrente Elétrica

## Carga em movimento

Def. **Corrente Elétrica através** de uma **área** (p. e. a seção transversal de um fio condutor) é o **montante de carga que atravessa** esta por **unidade de tempo**.



Em **média** em um **intervalo de tempo**  $\Delta t$ , naquele **atravessou** uma **carga**  $\Delta Q$ :

$$I_{\text{med}} = \Delta Q / \Delta t \quad [I] = \text{C/s} = \text{A (Ampère)}$$

**corrente instantânea**:  $I \equiv \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \Delta Q / \Delta t = dQ/dt$

# Corrente Elétrica

As “cargas” em movimento obviamente são **partículas carregadas**, **portadores de carga**, frequentemente **elétrons** em um **condutor**, **íons** positivos ou negativos em um **líquido** ou **gás**, **feixes de elétrons** ou **prótons** no vácuo, etc.

Definimos a direção do **fluxo de carga positiva** como **direção da corrente**. Se os portadores de carga forem **partículas com carga negativa** (p.e.  $e^-$ ), a direção da corrente é na **direção oposta** ao movimento destes.

Normalmente, um **campo elétrico** é responsável pelo **movimento das partículas**, a **corrente** indo no **direção do campo** (independente, se ela é constituída por portadores de carga positiva ou negativa).

# Corrente Elétrica

Relacionando o movimento dos portadores de carga com a corrente:

$q$ : carga de um portador  
(para um elétron,  $-e$ )

$n$ : densidade (no. por volume) dos portadores de carga

$v_d$ : velocidade de migração ou de deriva,

velocidade média dos portadores de carga

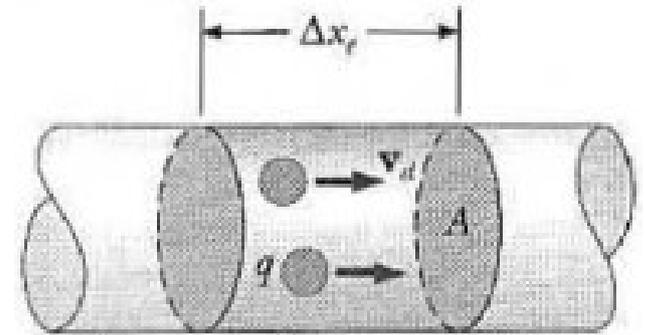
=> Carga que atravessa a área  $A$  no tempo  $\Delta t$ :

$\Delta Q = nA\Delta x_e q$ , onde  $\Delta x_e$  é a distância que os portadores

percorreram no tempo  $\Delta t$ ,  $\Delta x_e = v_d \Delta t$

=>  $\Delta Q = nAv_d \Delta t \cdot q$     =>  $I = \Delta Q / \Delta t = nAv_d q$

Densidade de corrente:  $J \equiv I/A = nv_d q$      $[J] = A/m^2$

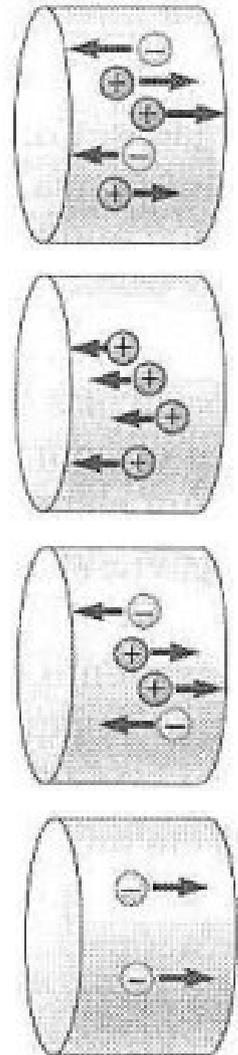


# Corrente Elétrica

## Enigma Rápido 21.1

Considere **cargas positivas** e **negativas** deslocando-se horizontalmente nas quatro regiões mostradas aqui.

**Ordene** as **correntes** nessas quatro regiões, da mais **baixa** à mais **alta**.

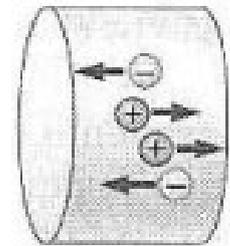
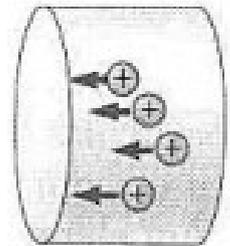
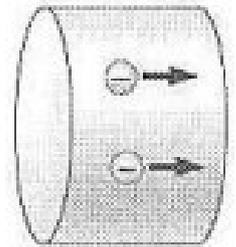


# Corrente Elétrica

## Enigma Rápido 21.1

Considere **cargas positivas** e **negativas** deslocando-se horizontalmente nas quatro regiões mostradas aqui.

**Ordene** as **correntes** nessas quatro regiões, da mais **baixa** à mais **alta**.

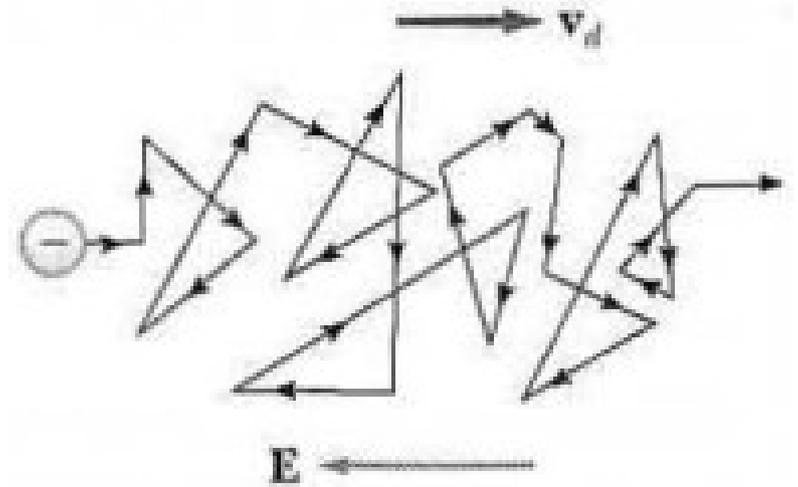


# Corrente Elétrica

Na verdade, no caso de **elétrons** num **metal**, as **cargas não se movimentam** todas na **direção oposta** do **campo**, mas em direções quase aleatórias, chocando-se constantemente com os átomos do metal.

É apenas um **pequeno componente** a mais na **direção contra** o **campo** que faz a **velocidade média  $v_d$**  deles.

Vide mais tarde na aula um modelo pra condução elétrica.



# Corrente Elétrica

## Pensando a Física 21.1

Suponha que um **fio** com **corrente** tem uma **área de seção transversal** que se torna gradualmente **menor** ao longo do fio, de modo que o fio tenha a forma de um cone muito longo.

Como a **velocidade de migração** dos elétrons varia ao longo do fio?

# Corrente Elétrica

## Pensando a Física 21.1

Suponha que um **fio** com **corrente** tem uma **área** de **seção transversal** que se torna gradualmente **menor** ao longo do fio, de modo que o fio tenha a forma de um cone muito longo.

Como a **velocidade de migração** dos elétrons varia ao longo do fio?

A **corrente** é **constante** ao longo do fio, senão surgiria ou sumiria carga no meio dele:

$$I = nAv_dq = \text{const.}$$

Se  $A$  diminui,  $v_d$  tem que **aumentar**.

# Corrente Elétrica

## Exemplo 21.1 Velocidade de Migração em um Fio de Cobre

Um fio de cobre, cuja **área transversal** é  $3.00 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$  tem uma **corrente** de 10.0 A. A **densidade** do cobre é  $\rho = 8.95 \text{ g/cm}^3$ , sua **massa molar**  $M = 63.5 \text{ g/mol}$ . Cada **átomo** de cobre contribui com **um elétron livre** pra corrente.

Encontre a **velocidade de migração** dos **elétrons** nesse fio.

# Corrente Elétrica

## Exemplo 21.1 Velocidade de Migração em um Fio de Cobre

Um fio de cobre, cuja **área transversal** é  $3.00 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$  tem uma **corrente** de 10.0 A. A **densidade** do cobre é  $\rho = 8.95 \text{ g/cm}^3$ , sua **massa molar**  $M = 63.5 \text{ g/mol}$ . Cada **átomo** de cobre contribui com **um elétron livre** pra corrente.

Encontre a **velocidade de migração** dos **elétrons** nesse fio.

**Solução:**

$$n = N_A / V_m = N_A \rho / M = 8.48 \cdot 10^{28} \text{ e}^- / \text{m}^3$$

$$\Rightarrow v_d = I / nqA = 2.46 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$$

Da ordem de um metro por hora!

# Corrente Elétrica

## Exercício

Um fio de alumínio que tem uma área de seção transversal de  $4.0 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$  conduz uma corrente de 5.0 A. Encontre a velocidade de migração dos elétrons no fio. A densidade do alumínio é  $2.7 \text{ g/cm}^3$ . (Suponha que um elétron é fornecido por cada átomo.)

# Corrente Elétrica

## Exercício

Um fio de alumínio que tem uma área de seção transversal de  $4.0 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$  conduz uma corrente de 5.0 A. Encontre a velocidade de migração dos elétrons no fio. A densidade do alumínio é  $2.7 \text{ g/cm}^3$ . (Suponha que um elétron é fornecido por cada átomo.)

Resposta:

$$v_d = IM/N_A \rho q A = 0.13 \text{ mm/s}$$

# Resistência e Lei de Ohm

Em muitos **dispositivos** e **materiais**, a **corrente** que flui por eles é **proporcional** à **diferença** de **potencial** aplicada neles:

$$I \propto \Delta V$$

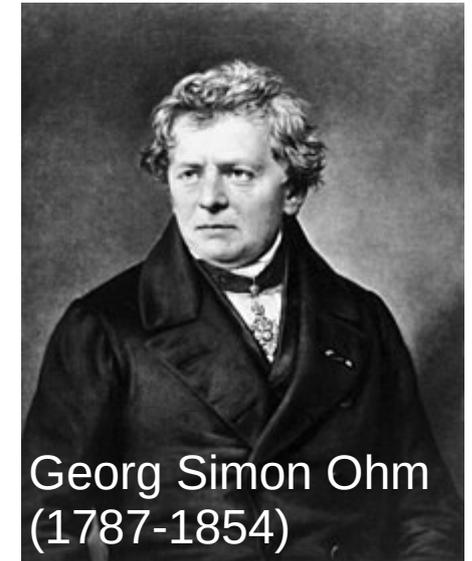
Se diz que o elemento tem comportamento **ôhmico**, e podemos escrever

$$\Delta V = RI \text{ ou } R \equiv \Delta V/I \quad (\text{Lei de } \mathbf{Ohm})$$

Chamamos  $R$  de **resistência elétrica** do **elemento**, com unidade

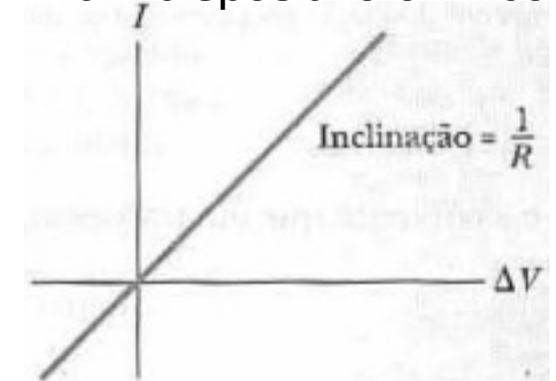
$$V/A = \text{Js}/\text{C}^2 = \Omega \text{ (Ohm)}$$

Mas nem todo elemento/material se comporta assim. Os que não chamamos de não-ôhmicos.



Georg Simon Ohm  
(1787-1854)

Corrente vs. voltagem de um dispositivo ôhmico

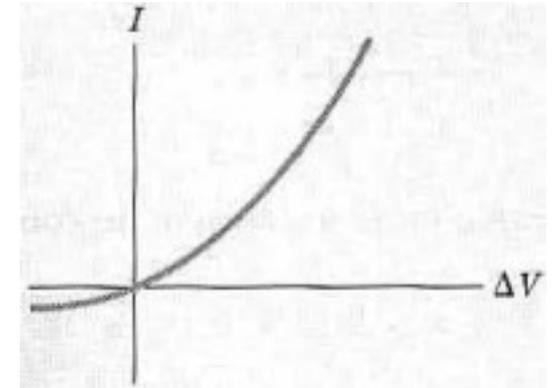


# Resistência e Lei de Ohm

## Enigma Rápido 21.2

Esta é a curva **corrente** em **função** da **voltagem** para um **diodo**, que é um dispositivo semicondutor **não-ôhmico**.

A **resistência aumenta** ou **diminui** quando a **voltagem positiva  $\Delta V$  aumenta?**



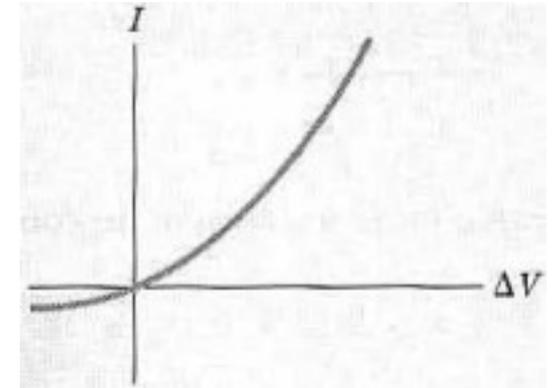
# Resistência e Lei de Ohm

## Enigma Rápido 21.2

Esta é a curva **corrente** em **função** da **voltagem** para um **diodo**, que é um dispositivo semicondutor **não-ôhmico**.

A **resistência aumenta** ou **diminui** quando a **voltagem positiva  $\Delta V$  aumenta**?

**Resposta:** **diminui**, já que  $I/\Delta V$  aumenta  
 $\Rightarrow \Delta V/I = R$  diminui.



# Resistência e Lei de Ohm

## Resistores

Um **resistor** é um **elemento** simples em um **circuito elétrico** que fornece uma **resistência especificada**, usado, entre outros, para **controlar níveis de corrente**.

Símbolo:  ou 

### Resistores comerciais



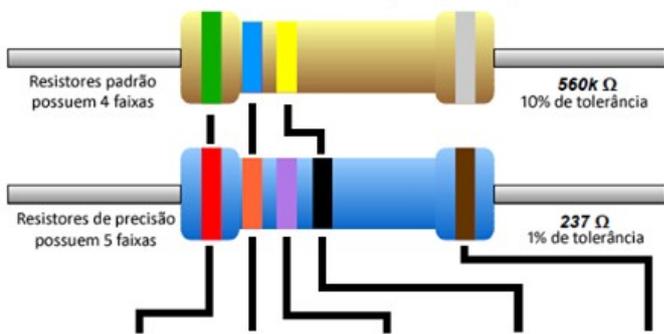
# Resistência e Lei de Ohm

## Resistores

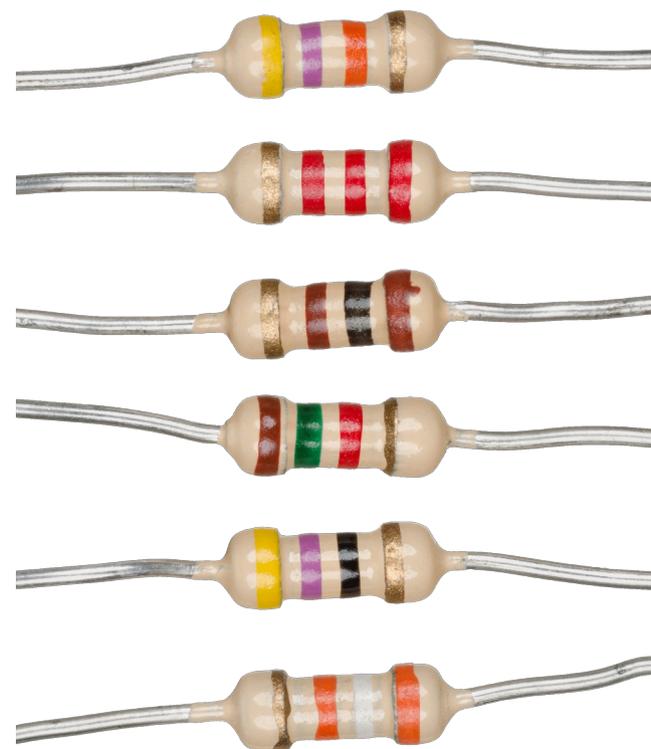
Resistores frequentemente têm um **código em cores** para **especificar** sua **resistência**.

### Código de Cores

A extremidade com mais faixas deve apontar para a esquerda



Cor	1ª Faixa	2ª Faixa	3ª Faixa	Multiplicador	Tolerância
Preto	0	0	0	x 1 $\Omega$	
Marron	1	1	1	x 10 $\Omega$	+/- 1%
Vermelho	2	2	2	x 100 $\Omega$	+/- 2%
Laranja	3	3	3	x 1K $\Omega$	
Amarelo	4	4	4	x 10K $\Omega$	
Verde	5	5	5	x 100K $\Omega$	+/- .5%
Azul	6	6	6	x 1M $\Omega$	+/- .25%
Violeta	7	7	7	x 10M $\Omega$	+/- .1%
Cinza	8	8	8		+/- .05%
Branco	9	9	9		
Dourado				x .1 $\Omega$	+/- 5%
Prateado				x .01 $\Omega$	+/- 10%



# Resistência e Lei de Ohm

## Resistividade

Descobre-se que a **resistência** de um fio-condutor **ôhmico** é **proporcional** ao seu **comprimento** e **inversamente proporcional** à sua **área de seção transversal**:

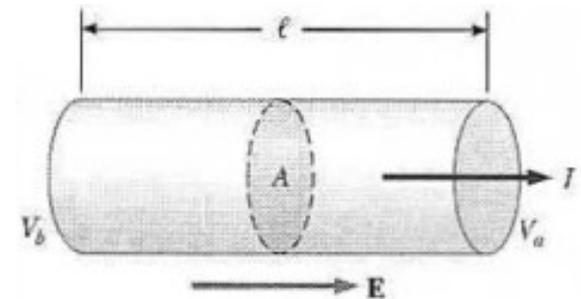
$$R = \rho \ell / A,$$

onde  $\rho$  é chamada **resistividade** do **material**,  $[\rho] = \Omega \cdot \text{m}$

O **inverso** da resistividade é chamada **condutividade**  $\sigma$ :

$$\sigma = 1/\rho, \text{ tal que } R = \ell/\sigma A \quad [\sigma] = (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$$

**Resistividade** e **condutividade** são **características** de um **material**.



# Resistência e Lei de Ohm

## Enigma Rápido 21.3

Os **aparelhos eletrodomésticos** são frequentemente **marcados** com uma **voltagem** e uma **corrente**, por exemplo 120 V e 5 A.

As **pilhas**, entretanto, são marcadas **apenas** com uma **voltagem**, como 1.5 V.

**Por que** a corrente não é colocada no rótulo de uma pilha?

# Resistência e Lei de Ohm

## Enigma Rápido 21.3

Os **aparelhos eletrodomésticos** são frequentemente **marcados** com uma **voltagem** e uma **corrente**, por exemplo 120 V e 5 A.

As **pilhas**, entretanto, são marcadas **apenas** com uma **voltagem**, como 1.5 V.

**Por que** a corrente não é colocada no rótulo de uma pilha?

**Resposta:** Por que a **corrente depende** d(a resistência d) o aparelho operado com a bateria.

# Resistência e Lei de Ohm

## Enigma Rápido 21.4

Os **artigos** de **jornais** têm frequentemente **indicações** tais como “10 000 **volts** de **eletricidade** atravessaram o **corpo** da vítima”.

**O que** há de **errado** nesta afirmação?

# Resistência e Lei de Ohm

## Enigma Rápido 21.4

Os **artigos** de **jornais** têm frequentemente **indicações** tais como “10 000 **volts** de **eletricidade** **atravessaram** o **corpo** da vítima”.

**O que** há de **errado** nesta afirmação?

**Resposta:** **Não** são **volts** (diferença de potencial) atravessando o corpo, mas **corrente** (ampères).

# Resistência e Lei de Ohm

## Exemplo 21.2 A Resistência de um Fio de Nicromo

- (a) Calcule a resistência por unidade de comprimento de um fio de nicromo, calibre 22 (resistividade  $1.5 \cdot 10^{-6} \Omega\text{m}$ ) que tenha um raio de 0.321 mm.
- (b) Se uma diferença de potencial de 10 V for mantida em 1.0 m de fio de nicromo, qual será a corrente no fio?

# Resistência e Lei de Ohm

## Exemplo 21.2 A Resistência de um Fio de Nicromo

(a) Calcule a resistência por unidade de comprimento de um fio de nicromo, calibre 22 (resistividade  $1.5 \cdot 10^{-6} \Omega\text{m}$ ) que tenha um raio de 0.321 mm.

(b) Se uma diferença de potencial de 10 V for mantida em 1.0 m de fio de nicromo, qual será a corrente no fio?

Solução:

$$(a) R/\ell = \rho/A = \rho/\pi r^2 = 4.6 \Omega/\text{m}$$

$$(b) I = \Delta V/R = \Delta V/\ell(R/\ell) = 2.2 \text{ A}$$

# Resistência e Lei de Ohm

## Exercício

Calcule a **densidade de corrente** e o **campo elétrico** no **fio**, considerando que este transporta uma **corrente** de **2.2 A**.

# Resistência e Lei de Ohm

## Exercício

Calcule a **densidade de corrente** e o **campo elétrico** no **fio**, considerando que este transporta uma **corrente** de **2.2 A**.

## Resposta:

$$J = I/A = I/\pi r^2 = 6.7 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$$

$$E = \Delta V/\ell = 10 \text{ N/C}$$

# Resistência e Lei de Ohm

## Exercício

Qual é a **resistência** de um fio de **6.0 m** de **comprimento** de **nicromo**, calibre 22?

**Quanta corrente** ele transporta quando é **conectado** a uma **fonte** de **120 V**?

# Resistência e Lei de Ohm

## Exercício

Qual é a **resistência** de um fio de **6.0 m** de **comprimento** de **nicromo**, calibre 22?

**Quanta corrente** ele transporta quando é **conectado** a uma **fonte** de **120 V**?

## Resposta:

$$R = \ell (R/\ell) = 28 \Omega$$

$$I = \Delta V/R = 4.3 \text{ A}$$

# Resistência e Lei de Ohm

## Exercício

Uma **diferença de potencial** de 0.90 V é mantida em um **fio de tungstênio** (resistividade  $5.6 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$ ) de 1.5 m de **comprimento** que tem uma **área de seção transversal** de  $0.6 \text{ mm}^2$ .

Qual é a **corrente** no fio?

# Resistência e Lei de Ohm

## Exercício

Uma **diferença de potencial** de 0.90 V é mantida em um **fio de tungstênio** (resistividade  $5.6 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$ ) de 1.5 m de **comprimento** que tem uma **área de seção transversal** de  $0.6 \text{ mm}^2$ .

Qual é a **corrente** no fio?

Resposta:

$$I = \Delta V/R = \Delta VA/\rho\ell = 6.4 \text{ A}$$

# Resistência e Lei de Ohm

## Variação na Resistividade com a Temperatura

Pra maioria dos **metais**, a **resistividade aumenta** aproximadamente **linearmente** com a **temperatura**  $T$ :

$$\rho = \rho_0[1 + \alpha(T - T_0)],$$

onde  $\rho_0$  é a **resistividade** à **temperatura** de **referência**  $T_0$  (geralmente 20 °C) e  $\alpha$ , o **coeficiente** de **temperatura** da **resistividade**.

=> Para uma **variação** de **temperatura**  $\Delta T$  vale

$$\alpha = 1/\rho_0 \cdot \Delta\rho/\Delta T$$

Já que, em um **resistor** de um **dado material**  $R \propto \rho$ , também vale  $R = R_0[1 + \alpha(T - T_0)]$ .

# Resistência e Lei de Ohm

## Resistividade

Aqui os **valores** de **resistividade** a 20 °C e **coeficiente** de **temperatura** da **resistividade** de **alguns materiais**.

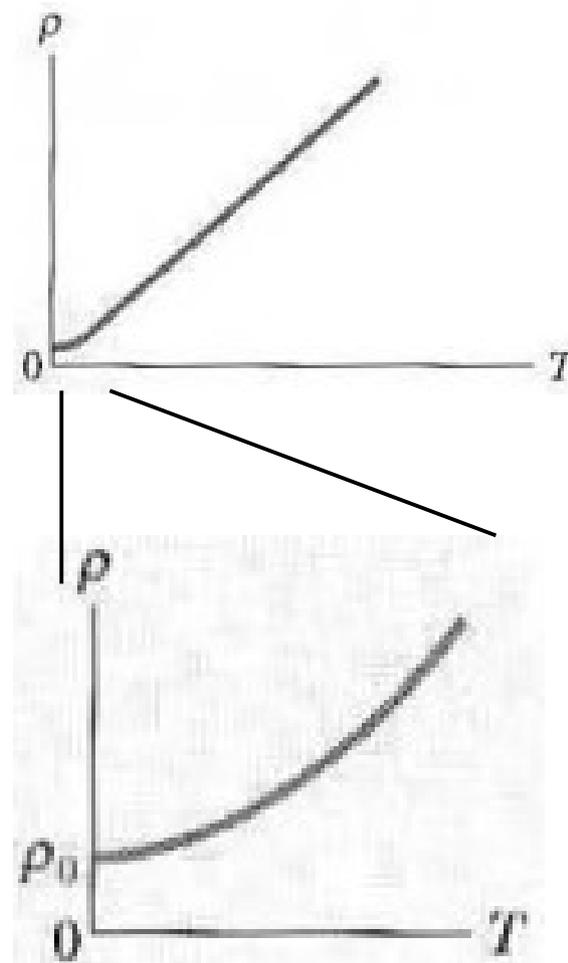
TABELA 21.1		Resistividades e Coeficientes de Temperatura da Resistividade para Vários Materiais	
Material	Resistividade <sup>a</sup> ( $\Omega \cdot m$ )	Coeficiente de Temperatura $\alpha [ (^{\circ}C)^{-1} ]$	
Prata	$1,59 \times 10^{-8}$	$3,8 \times 10^{-3}$	
Cobre	$1,7 \times 10^{-8}$	$3,9 \times 10^{-3}$	
Ouro	$2,44 \times 10^{-8}$	$3,4 \times 10^{-3}$	
Alumínio	$2,82 \times 10^{-8}$	$3,9 \times 10^{-3}$	
Tungstênio	$5,6 \times 10^{-8}$	$4,5 \times 10^{-3}$	
Ferro	$10 \times 10^{-8}$	$5,0 \times 10^{-3}$	
Platina	$11 \times 10^{-8}$	$3,92 \times 10^{-3}$	
Chumbo	$22 \times 10^{-8}$	$3,9 \times 10^{-3}$	
Nicromo <sup>b</sup>	$1,50 \times 10^{-6}$	$0,4 \times 10^{-3}$	
Carbono	$3,5 \times 10^{-5}$	$-0,5 \times 10^{-3}$	
Germânio	0,46	$-48 \times 10^{-3}$	
Silício	640	$-75 \times 10^{-3}$	
Vidro	$10^{10} - 10^{14}$		
Borracha dura	$\sim 10^{13}$		
Enxofre	$10^{15}$		
Quartzo (fundido)	$75 \times 10^{16}$		

<sup>a</sup> Todos os valores a 20 °C.  
<sup>b</sup> Uma liga de níquel-cromo usada comumente em calefadores.

# Resistência e Lei de Ohm

## Variação na Resistividade com a Temperatura

Para diversos materiais, a **resistividade parece ser proporcional à temperatura**. Mas **perto de zero absoluto**, esta proporcionalidade **falha** (a resistência não tende a zero), resultado de **colisões de elétrons com impurezas e imperfeições** no material.



# Resistência e Lei de Ohm

## Enigma Rápido 21.5

Alienígenos com poderes estranhos visitam a Terra e **duplicam** as **dimensões lineares** de **todo corpo** na superfície do planeta. O **fio elétrico** que vai da **tomada** na parede até a sua **luminária** de chão tem agora

(a) mais resistência do que antes,

(b) menos resistência ou

(c) a mesma resistência?

O **brilho** do **filamento** da **lâmpada** é

(d) maior do que antes,

(e) menor ou

(f) o mesmo?

(Suponha que as **resistividades** dos **materiais** permanecem **inalteradas** antes e depois da duplicação.)

# Resistência e Lei de Ohm

## Enigma Rápido 21.5

Alienígenos com poderes estranhos visitam a Terra e **duplicam** as **dimensões lineares** de **todo corpo** na superfície do planeta. O **fio elétrico** que vai da **tomada** na parede até a sua **luminária** de chão tem agora

(a) mais resistência do que antes,  $(R_{\text{depois}} = \rho 2\ell/4A)$

(b) **menos resistência** ou

(c) a mesma resistência?

O **brilho** do **filamento** da **lâmpada** é  $(I_{\text{depois}} = \Delta V/R_{\text{depois}})$

(d) **maior do que antes**,

(e) menor ou

(f) o mesmo?

(Suponha que as **resistividades** dos **materiais** permanecem **inalteradas** antes e depois da duplicação.)

# Resistência e Lei de Ohm

## Exemplo 21.3 Um Termômetro de Resistência de Platina

Um **termômetro de resistência**, que **mede a temperatura** pela **variação** na **resistência** de um **condutor**, é feito de platina (coeficiente de temperatura  $3.92 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ) e tem uma resistência de  $50.0 \text{ } \Omega$  a  $20.0 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

Quando **imerso** em um recipiente contendo **índio fundido**, sua **resistência aumenta** para  $76.8 \text{ } \Omega$ .

Supondo que a **resistência varia linearmente** com a **temperatura** no intervalo de temperatura em questão, qual é o **ponto de fusão** do **índio**?

# Resistência e Lei de Ohm

## Exemplo 21.3 Um Termômetro de Resistência de Platina

Um **termômetro de resistência**, que **mede a temperatura** pela **variação** na **resistência** de um **condutor**, é feito de platina (coeficiente de temperatura  $3.92 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ) e tem uma resistência de  $50.0 \text{ } \Omega$  a  $20.0 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Quando **imerso** em um recipiente contendo **índio fundido**, sua **resistência aumenta** para  $76.8 \text{ } \Omega$ .

Supondo que a **resistência varia linearmente** com a **temperatura** no intervalo de temperatura em questão, qual é o **ponto de fusão do índio**?

**Solução:** 
$$\Delta T = \frac{R - R_0}{\alpha R_0} = \frac{76,8 \text{ } \Omega - 50,0 \text{ } \Omega}{[3,92 \times 10^{-3} \text{ (}^\circ\text{C)}^{-1}](50,0 \text{ } \Omega)} = 137 \text{ }^\circ\text{C}$$

Como  $T_0 = 20,0 \text{ }^\circ\text{C}$ , descobrimos que  $T = 157 \text{ }^\circ\text{C}$ .

# Resistência e Lei de Ohm

## Exercício

Uma certa lâmpada tem um filamento de tungstênio (coeficiente de temperatura  $4.5 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ) com uma resistência de  $19.0 \text{ } \Omega$  quando está frio e  $140 \text{ } \Omega$  quando está quente. Suponha que a equação  $R = R_0[1 + \alpha(T - T_0)]$  pode ser usada sobre essa grande escala de temperatura envolvida aqui e encontre a temperatura do filamento quando estiver quente. Considere uma temperatura inicial de  $20.0 \text{ }^\circ\text{C}$ .

# Resistência e Lei de Ohm

## Exercício

Uma certa lâmpada tem um filamento de tungstênio (coeficiente de temperatura  $4.5 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ) com uma resistência de  $19.0 \text{ } \Omega$  quando está frio e  $140 \text{ } \Omega$  quando está quente. Suponha que a equação  $R = R_0[1 + \alpha(T - T_0)]$  pode ser usada sobre essa grande escala de temperatura envolvida aqui e encontre a temperatura do filamento quando estiver quente.

Considere uma temperatura inicial de  $20.0 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Resposta:  $T = T_0 + (R/R_0 - 1)/\alpha = 1\,440 \text{ }^\circ\text{C}$

# Supercondutores

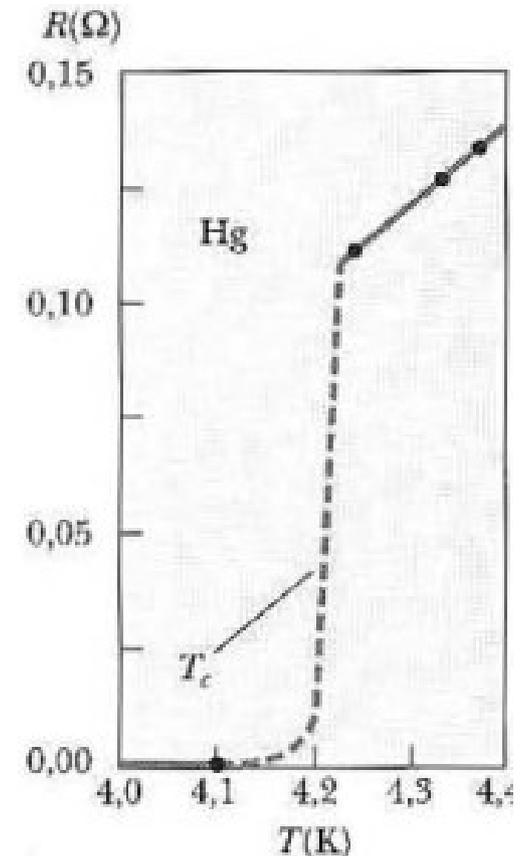
Materiais (metais ou compostos) com **resistividade zero**.

Fenômeno descoberto por **Heike Kamerlingh Onnes** em 1911.

Ocorre apenas **a baixo** de uma certa **temperatura, característica do material**, chamada **temperatura crítica  $T_c$** .

Se distingue entre **supercondutores de baixa temperatura** ( $T_c < 77$  K, o ponto de ebulição de nitrogênio líquido) e **de alta temperatura** ( $T_c > 77$  K).

O atual recorde é de 138 K (-135 °C).



Resistência em função da temperatura para uma amostra de mercúrio

# Supercondutores

Não necessariamente, um material supercondutor  $< T_c$  é um bom condutor a temperatura ambiente.

Por exemplo, cobre, prata e ouro, excelentes condutores a temperatura ambiente, não mostram supercondutividade, enquanto muitos dos supercondutores de alta temperatura são materiais cerâmicas, péssimas condutores a temperatura ambiente.

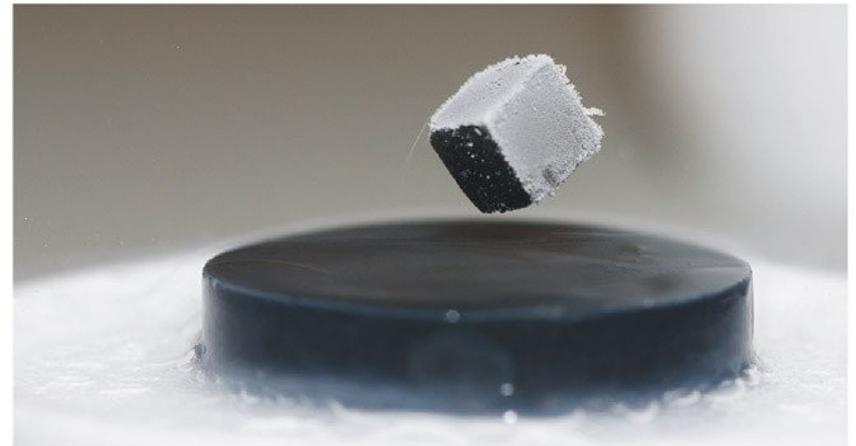
Material	$T_c$ (K)
HgBa <sub>2</sub> Ca <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	134
Tl-Ba-Ca-Cu-O	125
Bi-Sr-Ca-Cu-O	105
YBa <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>7</sub>	92
Nb <sub>3</sub> Ge	23,2
Nb <sub>3</sub> Sn	21,05
Nb	9,46
Pb	7,18
Hg	4,15
Sn	3,72
Al	1,19
Zn	0,88

# Supercondutores

Uma propriedade interessante de supercondutores é, que uma **corrente** criada neles **persiste** sem nenhuma **voltagem aplicada**.

Em **ímãs supercondutores**, os **campos magnéticos** podem chegar a valores 10 vezes **maiores** que os dos melhores **eletroímãs**.

**Aplicações** possíveis incluem **armazenamento de energia sem perdas**, **transmissão eficiente de energia**, **ímãs** em máquinas de **ressonância magnética** e **nuclear**, **magnetômetros** supersensíveis, dispositivos **eletrônicos**, etc., especialmente se forem descobertos materiais supercondutores a temperatura ambiente.



Um pequeno ímã levitando sobre um disco supercondutor.

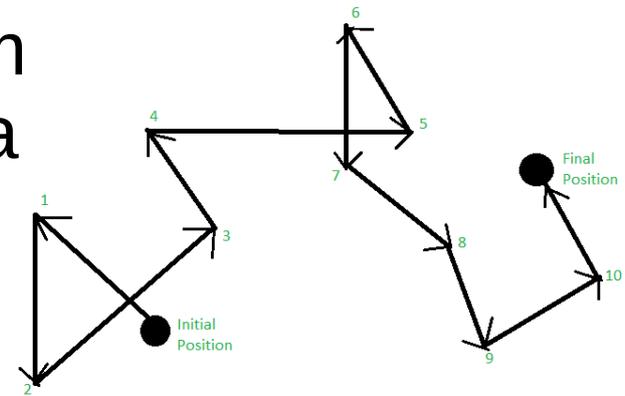
# Um Modelo para a Condução Elétrica

Considerando um **condutor** como uma **rede regular** de **átomos** que fornecem  **$e^-$  livres**, chamados **elétrons** de **condução**.

Estes se deslocam com **velocidades médias** da ordem de  $10^6$  m/s em **direções aleatóreas**. Às vezes, isto é chamado **gás de elétrons**.

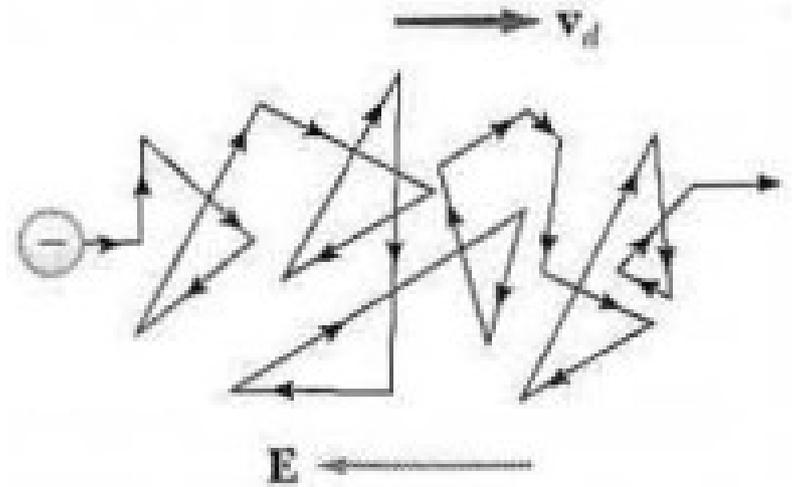
Eles se **chocam** frequentemente com os **átomos** e cada vez adquirem uma **velocidade** em **direção aleatória**.

**Sem campo elétrico** aplicado, as **velocidades** dos **elétrons** de **condução** se **cancelam**, e **não** há **fluxo líquido** de **carga**.



# Um Modelo para a Condução Elétrica

Com um **campo elétrico** aplicado, os **elétrons de condução** são **acelerados na direção oposta** do **campo entre choques**, mas em **cada choque** adquirem de novo uma **velocidade aleatória**.



Agora, há um **fluxo líquido de carga**, correspondendo à **diferença** entre o **movimento** que os **elétrons** fazem **com campo** e aquele que eles fariam **sem o campo**. Esta diferença é a **velocidade de migração**  $v_d$  mencionada no início da aula.

Vamos estimar esta velocidade.

# Um Modelo para a Condução Elétrica

Campo elétrico aplicado:  $\mathbf{E}$

Tempo médio entre dois choques:  $\tau = \bar{\ell}/\bar{v}$

onde  $\bar{\ell}$  é a distância média percorrida entre choques, chamada percurso livre médio, e  $\bar{v}$ , a velocidade média dos elétrons (em módulo)

Se o elétron adquire num choque a velocidade  $\mathbf{v}_0$ , ele terá a velocidade após um tempo  $t$  de (FeMec):

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_0 + \mathbf{a}t = \mathbf{v}_0 + \mathbf{F}_e/m_e \cdot t = \mathbf{v}_0 - e\mathbf{E}t/m_e$$

Diferença com o movimento sem campo:  $-e\mathbf{E}t/m_e$

Entre choques, isto se torna (em médio):  $\mathbf{v}_d = -e\mathbf{E}\tau/m_e$

# Um Modelo para a Condução Elétrica

Para um gás de  $e^-$  com densidade  $n$  atravessando uma área  $A$ , isto corresponde a uma corrente (em módulo) de

$$I = nev_d A = ne(eE\tau/m_e)A = ne^2 E\tau/m_e \cdot A$$

proporcional ao campo como esperado.

Mas a corrente também é:

$$I = \Delta V/R = \Delta V/(\rho\ell/A) = E/\rho \cdot A$$

Igualando os dois, obtemos pra resistividade:

$$\rho = m_e/ne^2\tau$$

Este modelinho simples consegue prever  $I \propto \Delta V$ ,  $R \propto \ell/A$ , e dar uma estimativa da resistividade a partir de propriedades básicas do material e de elétrons.

# Um Modelo para a Condução Elétrica

## Exemplo 21.4

(a) Usando os dados e os resultados do exemplo 21.1 (fio de cobre:  $n = 8.48 \cdot 10^{28} \text{ e}^-/\text{m}^3$ ,  $\rho = 1.7 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$ ) e o **modelo estrutural da condução pelos elétrons**, estime o **tempo médio entre colisões** para  $\text{e}^-$  no **cobre** a  $20^\circ\text{C}$ .

(b) Supondo que a **velocidade média por elétrons livres** no **cobre** é  $1.6 \cdot 10^6 \text{ m/s}$  e usando o resultado do item (a), calcule o **percurso livre médio** para os elétrons no cobre.

# Um Modelo para a Condução Elétrica

## Exemplo 21.4

(a) Usando os dados e os resultados do exemplo 21.1 (fio de cobre:  $n = 8.48 \cdot 10^{28} \text{ e}^-/\text{m}^3$ ,  $\rho = 1.7 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$ ) e o **modelo estrutural da condução** pelos **elétrons**, estime o **tempo médio** entre **colisões** para  $\text{e}^-$  no **cobre** a  $20^\circ\text{C}$ .

(b) Supondo que a **velocidade média** por **elétrons livres** no **cobre** é  $1.6 \cdot 10^6 \text{ m/s}$  e usando o resultado do item (a), calcule o **percurso livre médio** para os elétrons no cobre.

**Solução:**

$$(a) \tau = m_e / ne^2\rho = 2.5 \cdot 10^{-14} \text{ s}$$

$$(b) \bar{\ell} = \bar{v}\tau = 4.0 \cdot 10^{-8} \text{ m}$$

# Um Modelo para a Condução Elétrica

Apesar de ser **consistente** com a **lei de Ohm**, o modelo **não prevê** corretamente os valores da **resistividade** dos materiais, e também não o **comportamento** da **resistividade** com a **temperatura**.

Para prever melhor estas propriedades, é necessário fazer um tratamento levando em conta a **física quântica**, o que está fora do escopo desta disciplina.

# Energia Elétrica e Potência

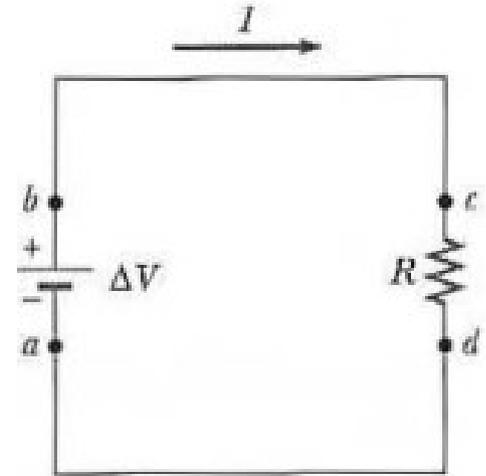
Considerando este **circuito**:

**Corrente** flui **constantemente** do **terminal positivo** da **bateria** até o **negativo**.

Neste processo, **energia** é **consumida** pelo **resistor**, esquentando este (e a bateria descarrega com o tempo).

Desprezando a resistência dos fios, a **diferença** de **potencial** entre ***d*** e ***c*** será a **mesma** que entre ***a*** e ***b***.

Desprezando também a resistência interna da bateria, **transferir** uma **carguinha**  $dq$  **através** do **resistor** custa  $dU = dq\Delta V$  de **energia**.



# Energia Elétrica e Potência

$$dU = dq\Delta V$$

A **potência** desta “queima” de energia é

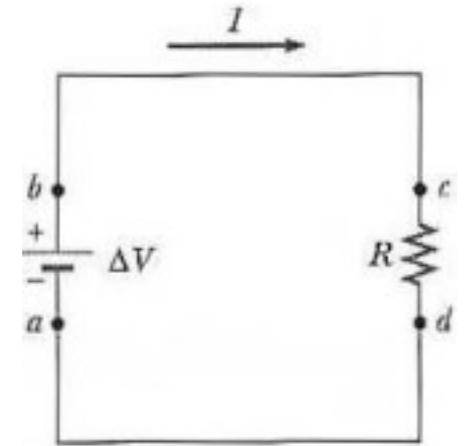
$$\mathcal{P} = dU/dt = dq\Delta V/dt = dq/dt \Delta V = I\Delta V$$

Usando que, para um **resistor**,  $\Delta V = IR$ , podemos escrever esta **potência** também como

$$\mathcal{P} = I\Delta V = I^2R = (\Delta V)^2/R$$

lembrete: A unidade da potência é  $W = J/s$ .

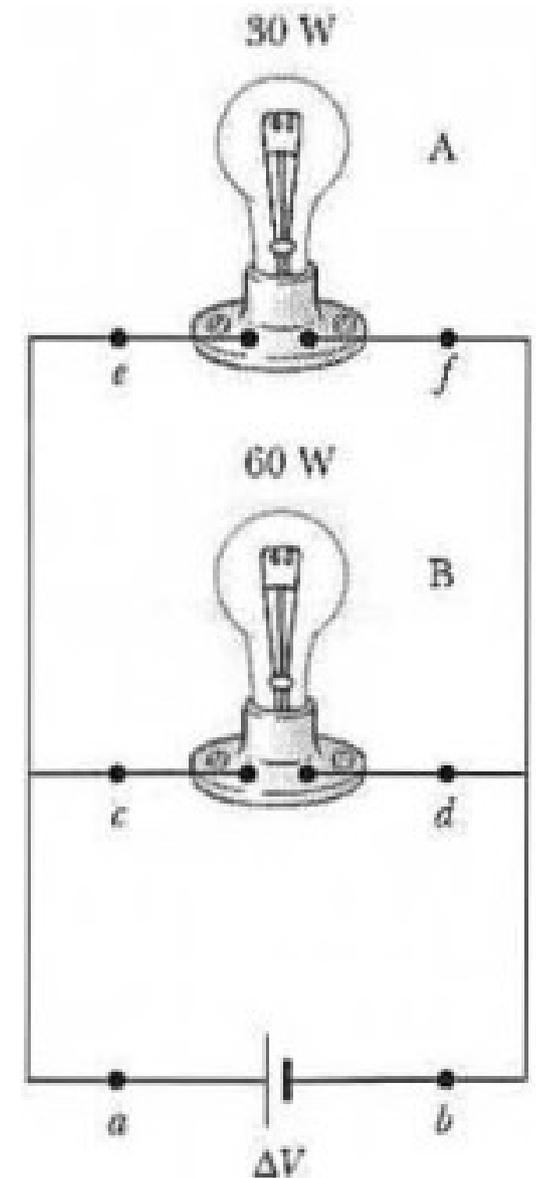
Bom exercício: Confira, que  $A \cdot V = A^2\Omega = V^2/\Omega = W$ .



# Energia Elétrica e Potência

## Enigma Rápido 21.6

Para as duas lâmpadas nesta figura, ordene as correntes nos pontos *a* a *f*, da maior para a menor.



# Energia Elétrica e Potência

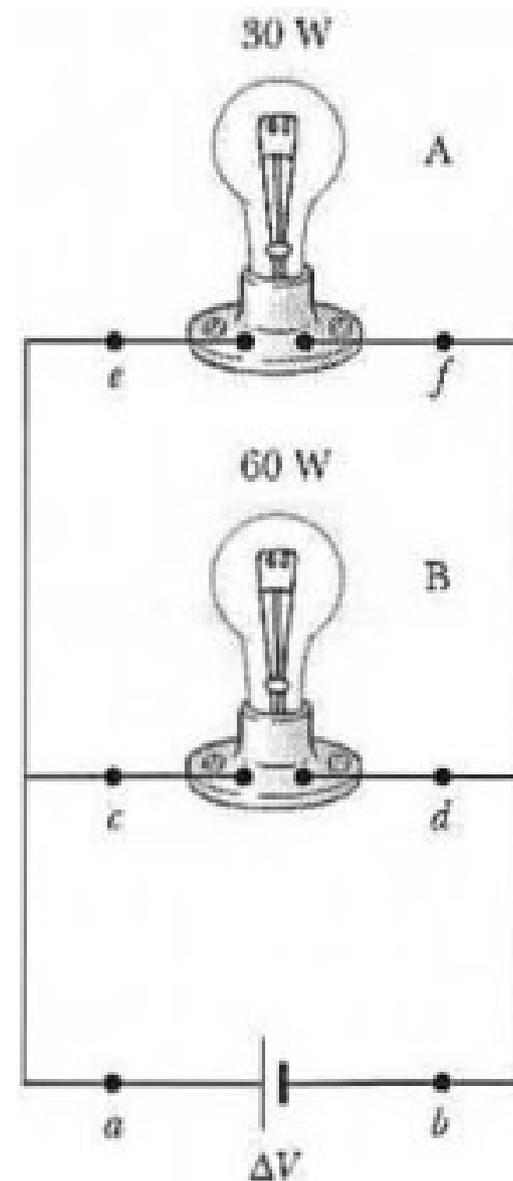
## Enigma Rápido 21.6

Para as duas lâmpadas nesta figura, ordene as correntes nos pontos *a* a *f*, da maior para a menor.

Resposta:

Já que  $I = \mathcal{P}/\Delta V$ :

$$I_a = I_b > I_c = I_d > I_e = I_f$$

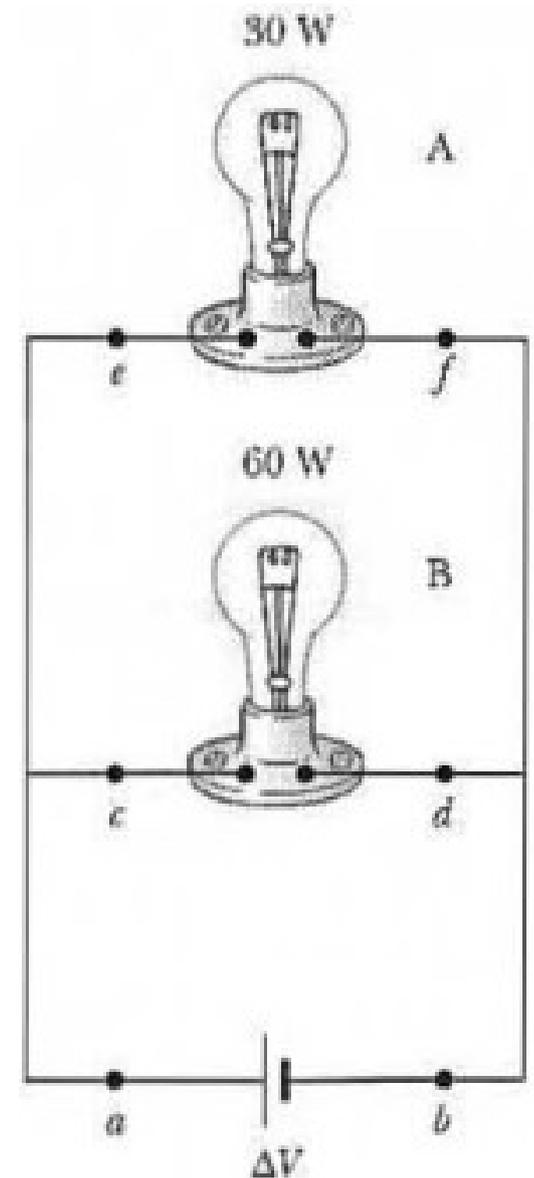


# Energia Elétrica e Potência

## Pensando a Física 21.2

Duas lâmpadas A e B estão conectadas na mesma diferença de potencial como nesta figura. São mostrados na figura os fornecimentos de potência elétrica para as lâmpadas.

Qual lâmpada tem a maior resistência?  
Qual transporta a maior corrente?



# Energia Elétrica e Potência

## Pensando a Física 21.2

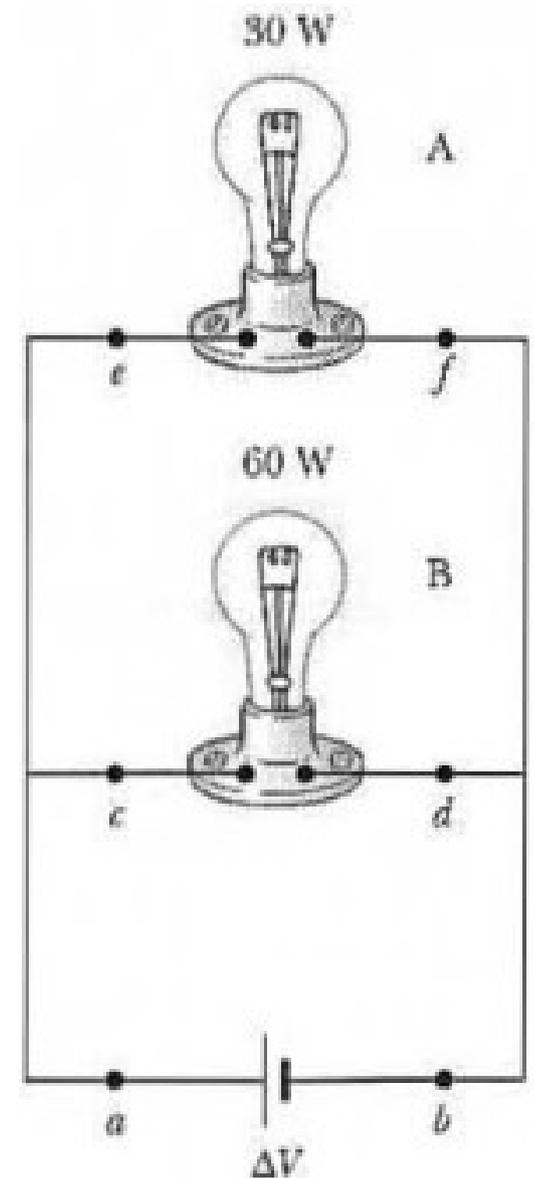
Duas lâmpadas A e B estão conectadas na mesma diferença de potencial como nesta figura. São mostrados na figura os fornecimentos de potência elétrica para as lâmpadas.

Qual lâmpada tem a maior resistência?  
Qual transporta a maior corrente?

Resposta:

$$R = (\Delta V)^2 / \mathcal{P} \Rightarrow R_A > R_B$$

$$I = \mathcal{P} / \Delta V \Rightarrow I_B > I_A$$



# Energia Elétrica e Potência

## Pensando a Física 21.3

Quando é maior a taxa a que a energia está fornecida para uma lâmpada - imediatamente após ela ser ligada, quando o brilho do filamento estiver aumentando, ou depois que já estiver ligada por alguns segundos, quando o brilho for estável?

# Energia Elétrica e Potência

## Pensando a Física 21.3

Quando é maior a taxa a que a energia está fornecida para uma lâmpada - imediatamente após ela ser ligada, quando o brilho do filamento estiver aumentando, ou depois que já estiver ligada por alguns segundos, quando o brilho for estável?

Resposta:

Já que  $\mathcal{P} = (\Delta V)^2/R$  e a resistência aumenta ao se aquecer ( $\Rightarrow$  mais cedo nesta aula),

$\mathcal{P}$  é maior imediatamente após a lâmpada ser ligada, o que explica, por que isto é o momento de maior risco de queimar a lâmpada.

# Energia Elétrica e Potência

## Exemplo 21.5 Potência Nominal de uma Lâmpada

Uma lâmpada é classificada como sendo 120 V / 75 W, o que significa que, em sua voltagem de funcionamento pretendida de 120 V, ela tem potência de 75.0 W.

A lâmpada é alimentada por uma fonte de potência de 120 V em corrente contínua.

Encontre a corrente na lâmpada e a sua resistência.

# Energia Elétrica e Potência

## Exemplo 21.5 Potência Nominal de uma Lâmpada

Uma lâmpada é classificada como sendo 120 V / 75 W, o que significa que, em sua voltagem de funcionamento pretendida de 120 V, ela tem potência de 75.0 W.

A lâmpada é alimentada por uma fonte de potência de 120 V em corrente contínua.

Encontre a corrente na lâmpada e a sua resistência.

**Solução:**

$$I = \mathcal{P} / \Delta V = 75.0 / 120 \text{ W/V} = 0.625 \text{ A}$$

$$R = (\Delta V)^2 / \mathcal{P} = 120^2 / 75 \text{ V}^2/\text{W} = 192 \text{ } \Omega$$

# Energia Elétrica e Potência

## Exercício

Qual é a **resistência** de uma **lâmpada classificada** como 120 V e 100 W?

# Energia Elétrica e Potência

## Exercício

Qual é a **resistência** de uma **lâmpada classificada** como 120 V e 100 W?

Resposta:

$$R = (\Delta V)^2 / \mathcal{P} = 120^2 / 100 \text{ V}^2/\text{W} = 144 \Omega$$

# Energia Elétrica e Potência

## Exemplo 21.6 O Custo do Funcionamento de uma Lâmpada

Quanto **custa** para **manter acesa** uma **lâmpada** de 100 W durante 24 h se a **eletricidade custar** 12 ¢/kWh?

# Energia Elétrica e Potência

## Exemplo 21.6 O Custo do Funcionamento de uma Lâmpada

Quanto **custa** para **manter acesa** uma **lâmpada** de 100 W durante 24 h se a **eletricidade custar** 12 ¢/kWh?

**Solução:**

$$\text{"taxa"} = 12 \text{ ¢/kWh} = 0.12 \text{ \$/kWh}$$

$$\mathcal{P} = 100 \text{ W} = 0.1 \text{ kW}$$

$$\text{Custo} = \Delta t \cdot \mathcal{P} \cdot \text{"taxa"} = 24 \cdot 0.1 \cdot 0.12 \text{ h kW \$/kWh} = 0.29 \text{ \$}$$

# Energia Elétrica e Potência

## Exercício

Se a **eletricidade** custar 12.0 ¢/kWh, **quanto** custará para **operar** um **forno elétrico** que **funciona** a 20.0 A e 220 V, durante 5.00 h?

# Energia Elétrica e Potência

## Exercício

Se a **eletricidade** custar 12.0 ¢/kWh, **quanto** custará para **operar** um **forno elétrico** que **funciona** a 20.0 A e 220 V, durante 5.00 h?

## Solução:

$$\text{"taxa"} = 12 \text{ ¢/kWh} = 1.2 \cdot 10^{-4} \text{ \$/Wh}$$

$$\text{Custo} = \Delta t \cdot \mathcal{P} \cdot \text{"taxa"} = \Delta t \cdot I \cdot \Delta V \cdot \text{"taxa"}$$

$$= 5.00 \cdot 20.0 \cdot 220 \cdot 1.2 \cdot 10^{-4} \text{ hAV\$/Wh} = 2.64 \text{ \$}$$

# Energia Elétrica e Potência

## Exemplo 21.7 Conectando a Eletricidade e a Termodinâmica

Qual é a **resistência** de um **aquecedor de imersão** que **aumentará a temperatura** de 1.50 kg de **água** ( $c = 4186 \text{ J/kg}\cdot^{\circ}\text{C}$ ) de  $10.0^{\circ}\text{C}$  para  $50.0^{\circ}\text{C}$  em 10.0 min **operando** a 110 V?

# Energia Elétrica e Potência

## Exemplo 21.7 Conectando a Eletricidade e a Termodinâmica

Qual é a **resistência** de um **aquecedor** de **imersão** que **aumentará** a **temperatura** de 1.50 kg de **água** ( $c = 4\,186 \text{ J/kg}\cdot^\circ\text{C}$ ) de  $10.0^\circ\text{C}$  para  $50.0^\circ\text{C}$  em 10.0 min **operando** a 110 V?

**Solução:**

$$\Delta t = 10.0 \text{ min} = 600 \text{ s}$$

$$\begin{aligned} R &= (\Delta V)^2 / \mathcal{P} = (\Delta V)^2 \Delta t / Q = (\Delta V)^2 \Delta t / mc \Delta T \\ &= 110^2 \cdot 600 / 1.5 \cdot 4\,186 \cdot (50.0 - 10.0) \text{ V}^2 \text{s} / \text{kg} (\text{J} / \text{kg} \cdot ^\circ\text{C}) ^\circ\text{C} \\ &= 28.9 \, \Omega \end{aligned}$$



Universidade Federal do ABC

# Fenômenos Eletromagnéticos

## FIM PRA HOJE

