



Universidade Federal do ABC

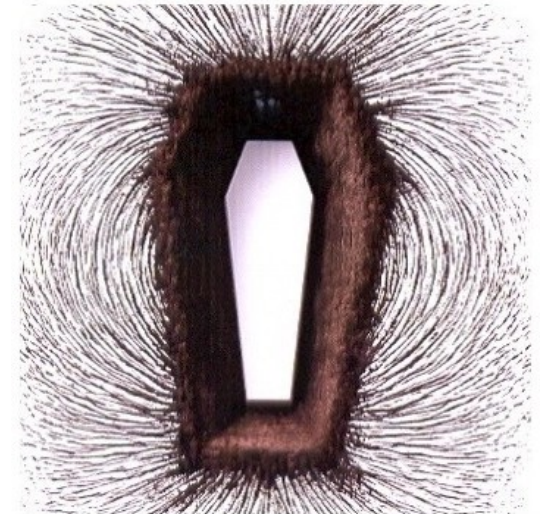
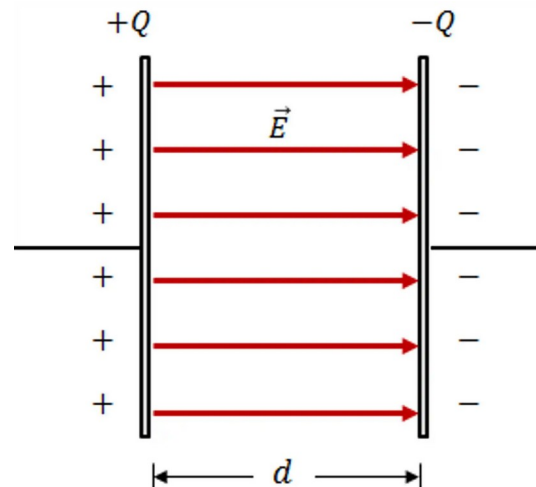
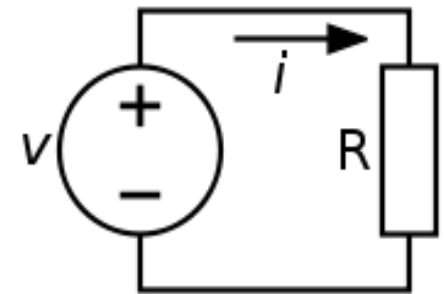
Fenômenos Eletromagnéticos

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

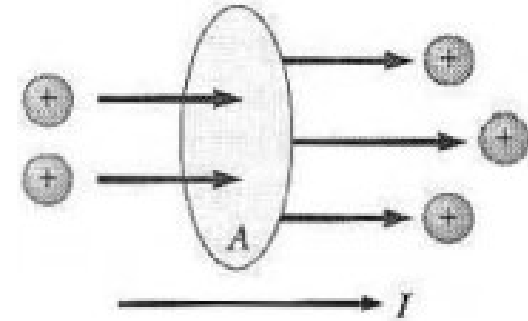
<http://professor.ufabc.edu.br/~pieter.westera/EM.html>



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** Δt , naquele **atravessou** uma **carga** ΔQ :

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

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

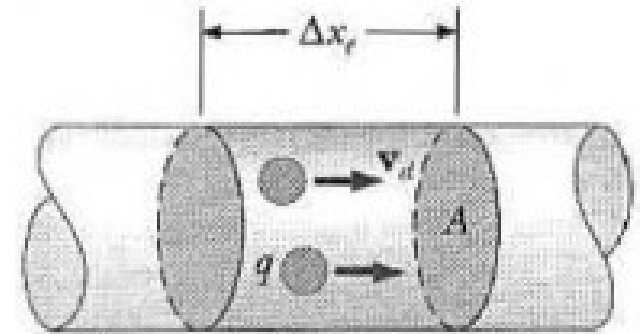
=> Carga que atravessa a área A no tempo Δt :

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

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

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

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

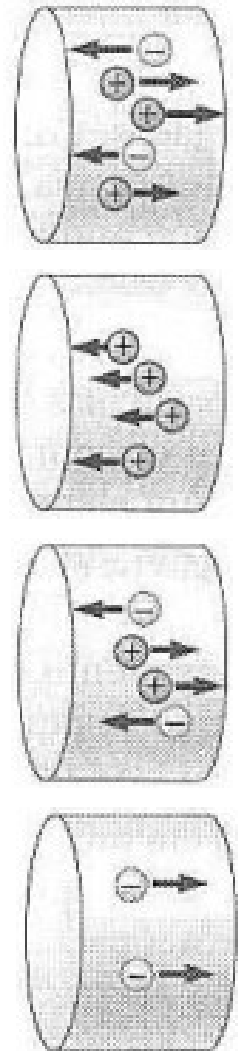


Corrente Elétrica

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**.

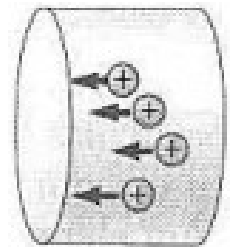
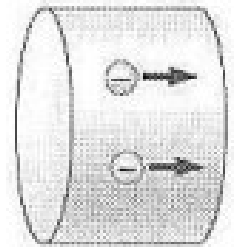


Corrente Elétrica

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**.

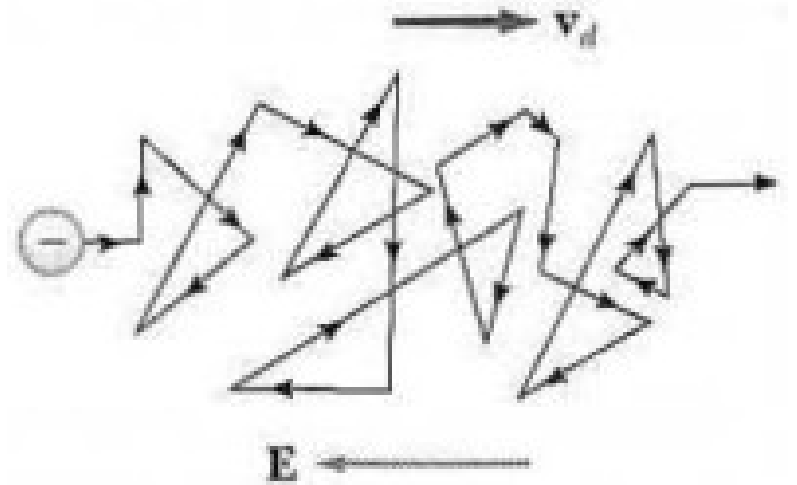


Corrente Elétrica

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, do 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, do 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 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 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:

$$I \propto \Delta V$$

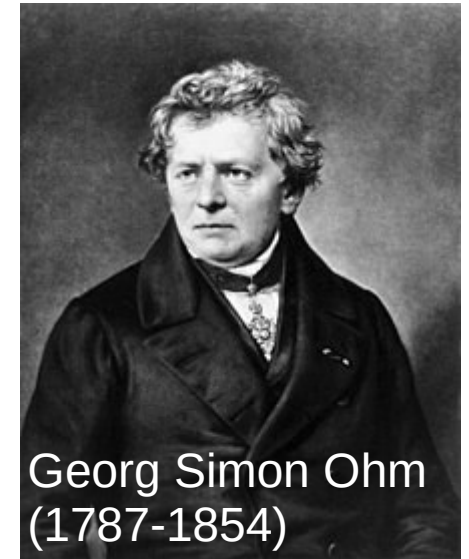
Se diz que o elemento tem comportamento **ôhmico**, e podemos escrever

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

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

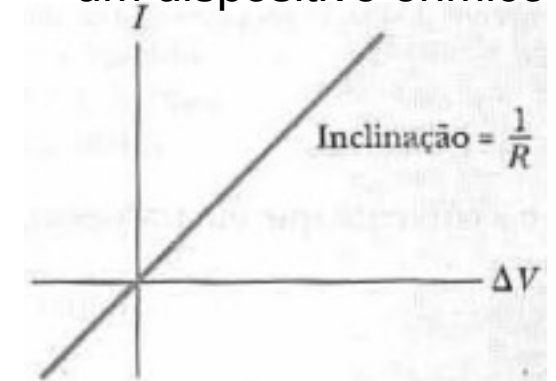
$$V/A = \text{Js}/\text{C}^2 = \Omega \text{ (Ohm)}$$

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

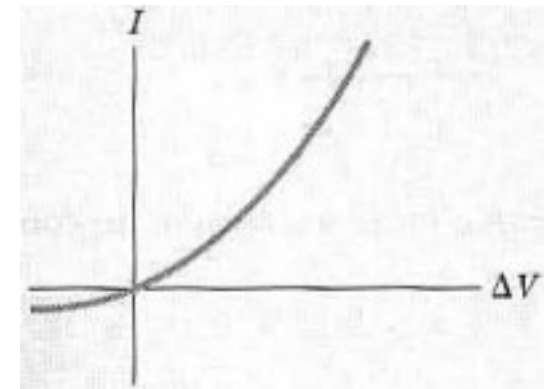


Resistência e Lei de Ohm

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 ΔV aumenta?**



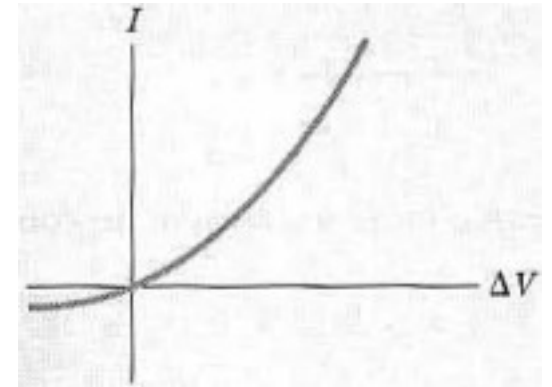
Resistência e Lei de Ohm

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 ΔV aumenta?**

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



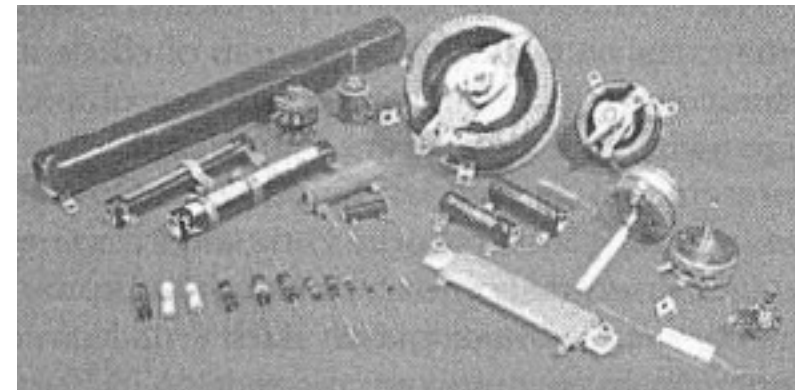
Resistência e Lei de Ohm

Resistores

Um **resistor** é um **elemento** simples em um **circuito elétrico** que fornece uma **resistância especificada**, usados, 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**.

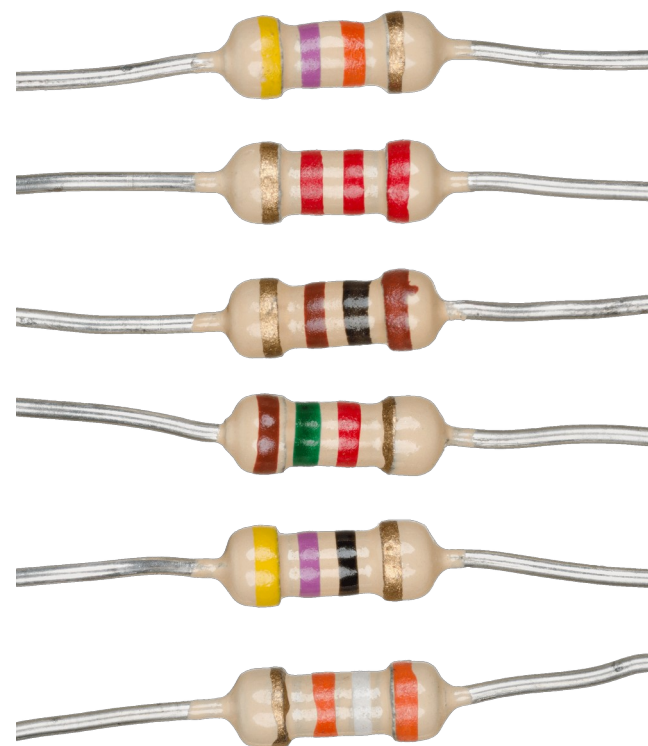
Código de Cores

A extremidade com mais faixas deve apontar para a esquerda

Resistores padrão possuem 4 faixas

Resistores de precisão possuem 5 faixas

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

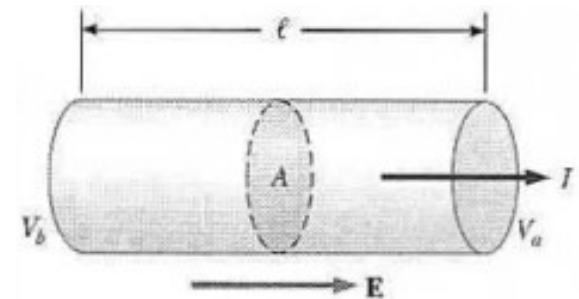
$$R = \rho \ell / A,$$

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

O **inverso** da resistividade é chamada **condutividade** σ :

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

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 uma 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 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 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 ρ_0 é a **resistividade** à **temperatura** de **referência** (geralmente 20 °C) e α , o **coeficiente** de **temperatura** da **resistividade**.

=> Para uma **variação** de **temperatura** ΔT 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** de **alguns materiais**.

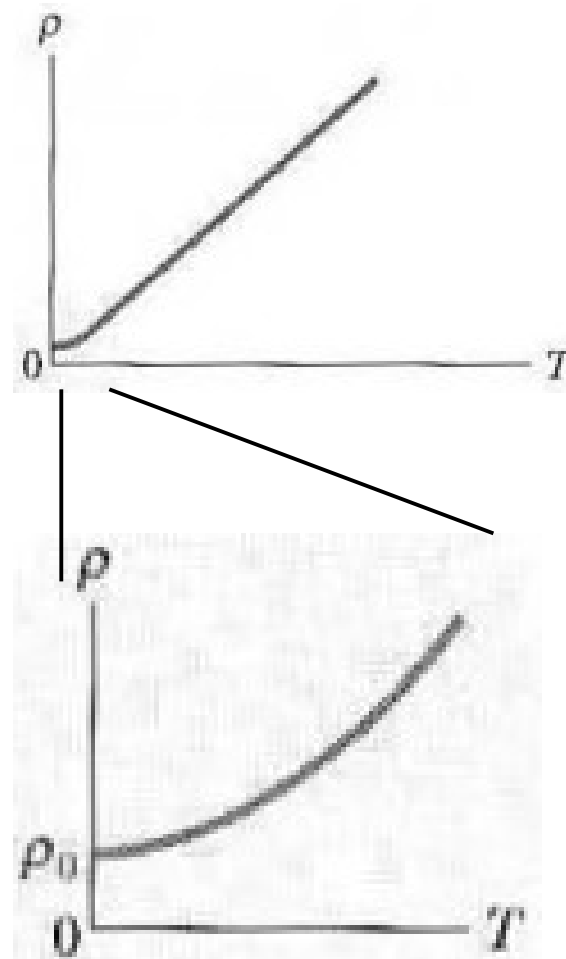
TABELA 21.1		Resistividades e Coeficientes de Temperatura da Resistividade para Vários Materiais	
Material	Resistividade ^a ($\Omega \cdot m$)	Coeficiente de Temperatura $\alpha [(^{\circ}C)^{-1}]$	
Prata	$1,59 \times 10^{-8}$	$3,8 \times 10^{-3}$	
Cobre	$1,7 \times 10^{-8}$	$3,9 \times 10^{-3}$	
Ouro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

^a Todos os valores a 20 °C.
^b 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 $(P_{\text{depois}} = \Delta V^2/R_{\text{depois}})$

(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: $T = T_0 + (R/R_0 - 1)/\alpha = 1.44 \cdot 10^3 \text{ } ^\circ\text{C}$

Supercondutores

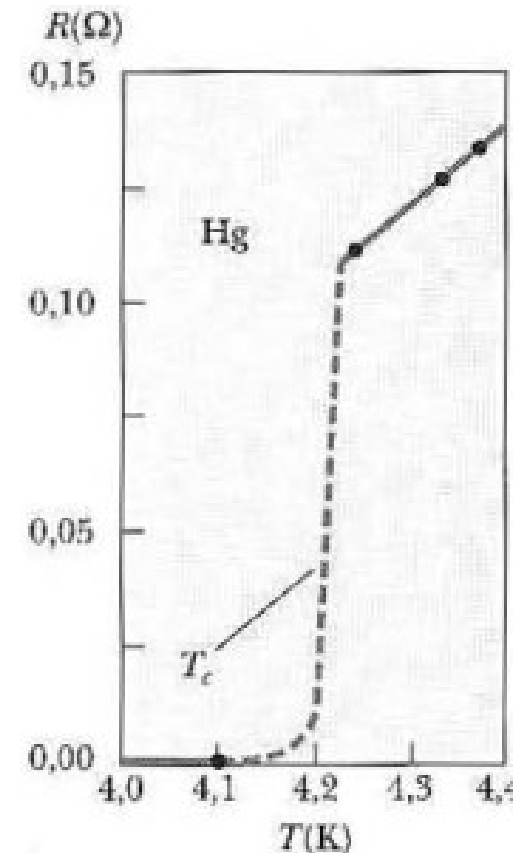
Materiais (metais ou compostos) com **resistividade zero**.

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, péssimos condutores a temperatura ambiente.

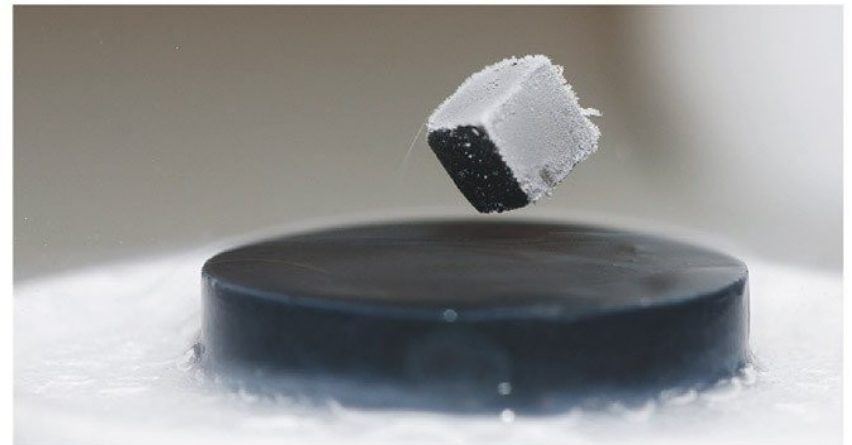
Material	T_c (K)
HgBa ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₈	134
Tl-Ba-Ca-Cu-O	125
Bi-Sr-Ca-Cu-O	105
YBa ₂ Cu ₃ O ₇	92
Nb ₃ Ge	23,2
Nb ₃ Sn	21,05
Nb	9,46
Pb	7,18
Hg	4,15
Sn	3,72
Al	1,19
Zn	0,88

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.

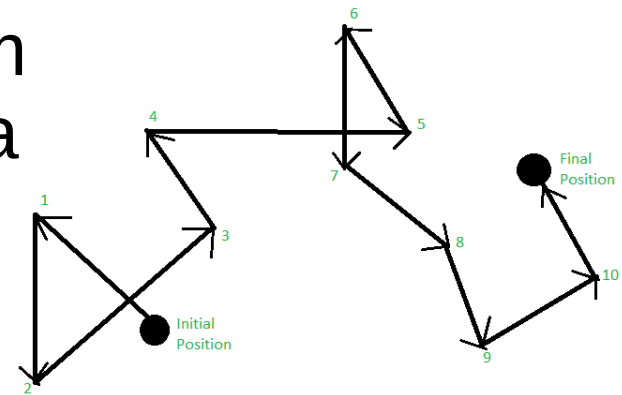
Um Modelo para a Condução Elétrica

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**.

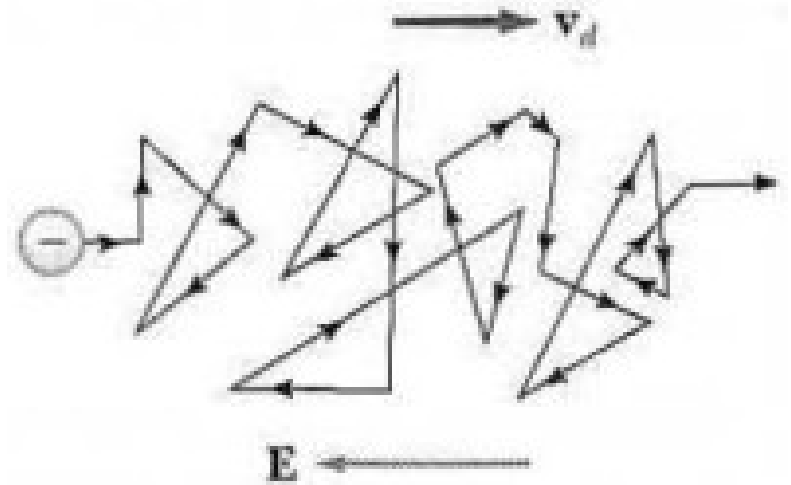
Eles se **chocam** frequentemente com os **átomos** e cada vez adquirem uma **velocidade** em **direção aleatória**.

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

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

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 e^- no **cobre** a 20°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 e^- no **cobre** a 20°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

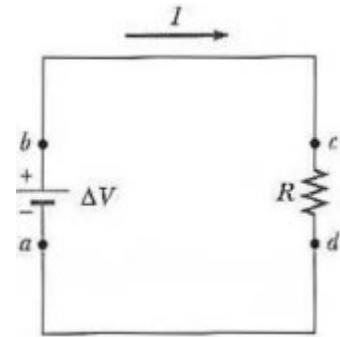
Apesar de ser **consistente** com a **lei de Ohm**, o modelo **não prevê** corretamente os valores da **resistividade** dos materiais, e também não o **comportamento** da **resistividade** com a **temperatura**.

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

Energia Elétrica e Potência

Um Universo só de Matéria

Em Universos **abertos**,
 $k < 0$, $\Leftrightarrow \rho(t) < \rho_c(t) \Leftrightarrow \Omega(t) < 1$,
a solução é



e a idade do Universo

$> 2/3$

Estes Universos **expandem** por sempre, e suas **idades** são **maiores** que as de Universos **planos**.

Infelizmente, nos casos com $k \neq 0$ não existe uma expressão simples para $R(t)$.

Energia Elétrica e Potência

Enigma Rápido 21.6

Em Universos **abertos**,
 $k < 0$, $\Leftrightarrow \rho(t) < \rho_c(t) \Leftrightarrow \Omega(t) < 1$,
a solução é

e a idade do Universo

$> 2/3$

Estes Universos **expandem** por sempre, e suas **idades** são **maiores** que as de Universos **planos**.

Infelizmente, nos casos com $k \neq 0$ não existe uma expressão simples para $R(t)$.

Energia Elétrica e Potência

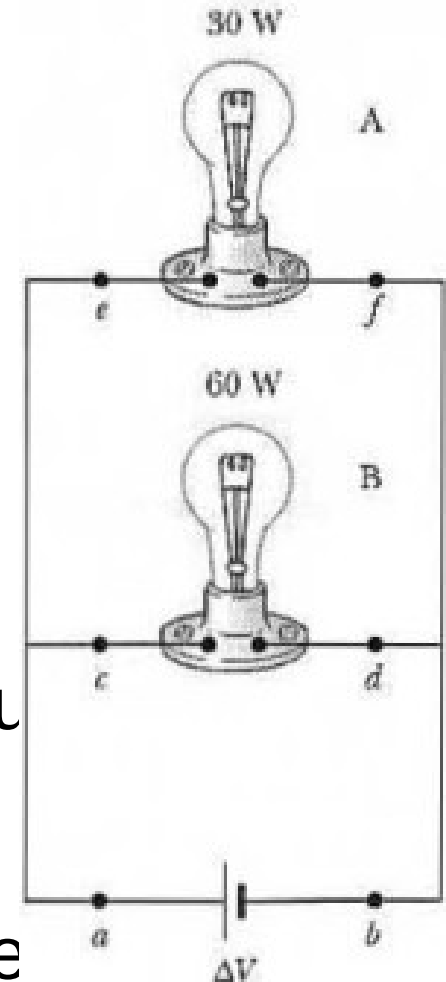
Enigma Rápido 21.6

Em Universos **abertos**,
 $k < 0$, $\Leftrightarrow \rho(t) < \rho_c(t) \Leftrightarrow \Omega(t) < 1$,
a solução é

e a idade do Universo

Estes Universos **expandem** por sempre, e são **maiores** que as de Universos **planos**.

Infelizmente, nos casos com $k \neq 0$ não existe expressão simples para $R(t)$.



Energia Elétrica e Potência

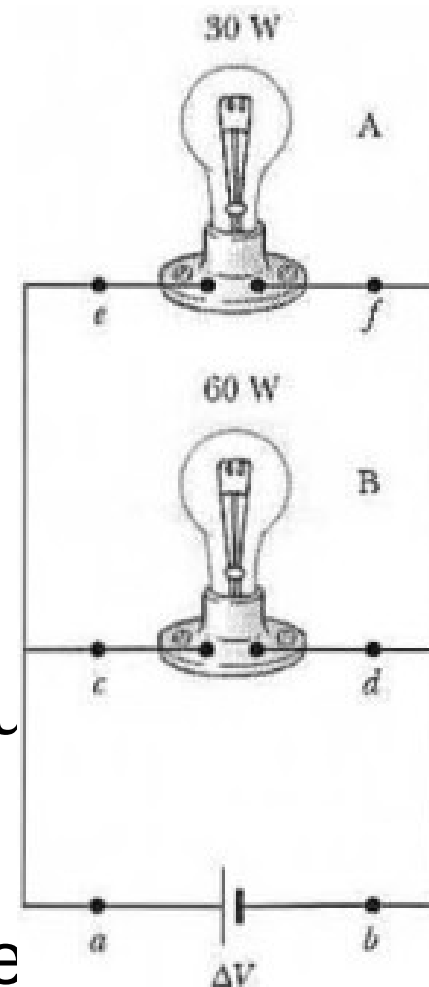
Pensando a Física 21.2

Em Universos **abertos**,
 $k < 0$, $\Leftrightarrow \rho(t) < \rho_c(t) \Leftrightarrow \Omega(t) < 1$,
a solução é

e a idade do Universo

Estes Universos **expandem** por sempre, e são **maiores** que as de Universos **planos**.

Infelizmente, nos casos com $k \neq 0$ não existe expressão simples para $R(t)$.



Energia Elétrica e Potência

Pensando a Física 21.3

Em Universos **abertos**,

$$k < 0, \Leftrightarrow \rho(t) < \rho_c(t) \Leftrightarrow \Omega(t) < 1,$$

a solução é

e a idade do Universo

$> 2/3$

Estes Universos **expandem** por sempre, e suas **idades** são **maiores** que as de Universos **planos**.

Infelizmente, nos casos com $k \neq 0$ não existe uma expressão simples para $R(t)$.

Energia Elétrica e Potência

Exemplo 21.5

Em Universos **abertos**,
 $k < 0$, $\Leftrightarrow \rho(t) < \rho_c(t) \Leftrightarrow \Omega(t) < 1$,
a solução é

e a idade do Universo $> 2/3$

Estes Universos **expandem** por sempre, e suas **idades** são **maiores** que as de Universos **planos**.

Infelizmente, nos casos com $k \neq 0$ não existe uma expressão simples para $R(t)$.

Energia Elétrica e Potência

Exercício

Em Universos **abertos**,
 $k < 0$, $\Leftrightarrow \rho(t) < \rho_c(t) \Leftrightarrow \Omega(t) < 1$,
a solução é

e a idade do Universo $> 2/3$

Estes Universos **expandem** por sempre, e suas **idades** são **maiores** que as de Universos **planos**.

Infelizmente, nos casos com $k \neq 0$ não existe uma expressão simples para $R(t)$.

Energia Elétrica e Potência

Exemplo 21.6

Em Universos **abertos**,
 $k < 0$, $\Leftrightarrow \rho(t) < \rho_c(t) \Leftrightarrow \Omega(t) < 1$,
a solução é

e a idade do Universo $> 2/3$

Estes Universos **expandem** por sempre, e suas **idades** são **maiores** que as de Universos **planos**.

Infelizmente, nos casos com $k \neq 0$ não existe uma expressão simples para $R(t)$.

Energia Elétrica e Potência

Exercício

Em Universos **abertos**,
 $k < 0$, $\Leftrightarrow \rho(t) < \rho_c(t) \Leftrightarrow \Omega(t) < 1$,
a solução é

e a idade do Universo $> 2/3$

Estes Universos **expandem** por sempre, e suas **idades** são **maiores** que as de Universos **planos**.

Infelizmente, nos casos com $k \neq 0$ não existe uma expressão simples para $R(t)$.

Energia Elétrica e Potência

Exemplo 21.7

Em Universos **abertos**,
 $k < 0$, $\Leftrightarrow \rho(t) < \rho_c(t) \Leftrightarrow \Omega(t) < 1$,
a solução é

e a idade do Universo $> 2/3$

Estes Universos **expandem** por sempre, e suas **idades** são **maiores** que as de Universos **planos**.

Infelizmente, nos casos com $k \neq 0$ não existe uma expressão simples para $R(t)$.



Universidade Federal do ABC

Fenômenos Eletromagnéticos

FIM PRA HOJE

