6. Corrente e Resistência (baseado no Halliday, 4ª edição)

Cargas Elétricas em Movimento e Corrente Elétrica

Correntes elétricas: geralmente conceituamos corrente elétrica como cargas elétricas em movimento.

Ex.: relâmpagos, correntes elétricas que permitem a atividade muscular, corrente na fiação elétrica (nas lâmpadas elétricas, eletrodomésticos, etc.), partículas aprisionadas no Cinturão de van Allen (oscilam entre os pólos norte e sul da Terra), vento solar (enormes correntes de prótons, elétrons e íons), raios cósmicos (prótons altamente energéticos que fluem pela Via Láctea), etc.

Problema com o Conceito Acima

1) Embora a corrente elétrica represente um fluxo de cargas em movimento, nem todas as cargas em movimento constituem uma corrente elétrica.

2) Quando dizemos que uma corrente elétrica passa através de uma determinada superfície é porque deve existir um fluxo líquido de cargas através daquela superfície.

Esclarecendo o Problema

1º) Conceito de corrente elétrica = cargas em movimento

a) Os elétrons de condução num condutor isolado, estão em movimento caótico, com velocidades escalares da ordem de 10^6 m/s.

b) Se colocamos um plano hipotético através do fio, os elétrons passam em ambos os sentidos numa taxa de muitos bilhões por segundo.

c) Então não há transporte líquido de carga elétrica $\rightarrow$ corrente elétrica zero.

d) Se ligamos o fio, acima exposto, a uma bateria, conduzimos o fluxo (muito ligeiramente) em um sentido $\rightarrow$ corrente elétrica.

2º) Conceito de corrente elétrica = movimento ordenado de cargas elétricas

a) Em um fluxo de água, temos um movimento de cargas elétricas positivas e negativas no mesmo sentido, logo não temos transporte líquido de cargas (cargas elétricas positivas e negativas fluindo no mesmo sentido).

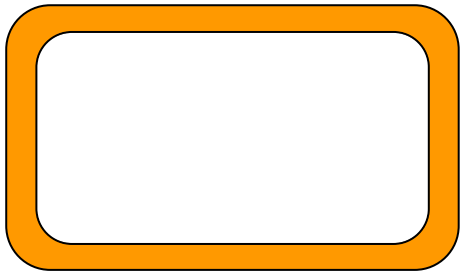
b) Este concito será melhorado na seqüência.

Nos limitaremos a estudar:

1) O eletromagnetismo dentro do limite da física clássica.

2) Correntes constantes de elétrons de condução que movem através de condutores metálicos (ex.: cobre) $\rightarrow$ regime estacionário ou corrente estacionária ou corrente contínua.

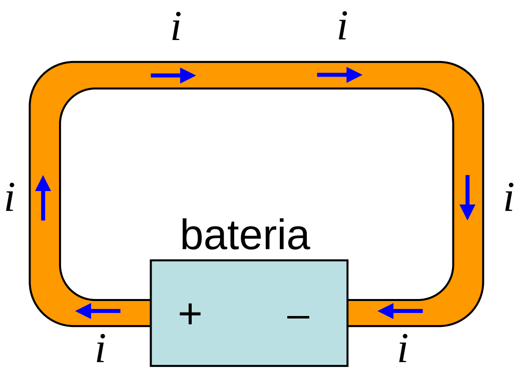
Corrente Elétrica



Espira condutora isolada que se encontra inteiramente sob o mesmo potencial (estando carregada ou não).

a) Nenhum campo elétrico pode existir dentro dela ou paralelo à superfície do condutor.

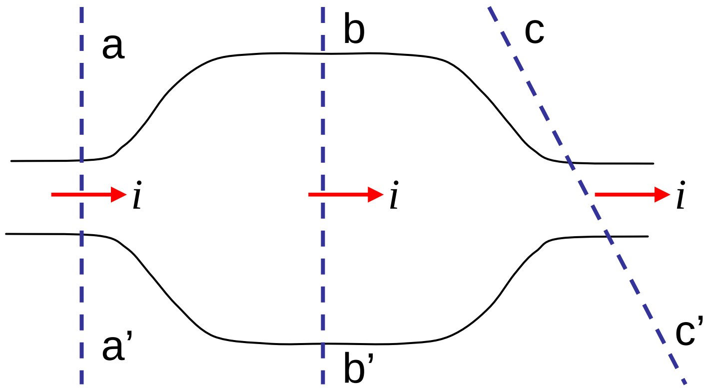
b) Nenhuma força líquida atua nos elétrons livres → não há corrente elétrica.



Quando colocamos uma bateria, a espira não fica mais sob o mesmo potencial.

a) Os campos elétricos atuam no interior do condutor, exercendo força sob os elétrons de condução e estabelecendo uma corrente elétrica.

b) Após um curto tempo os elétrons atingem um estado estacionário.



Seções de um condutor (a, a’; b, b’ e c, c’) em que flui uma corrente estacionária.

A corrente elétrica é então conceituada como:

“Quantidade de carga elétrica, dq, que passa por uma seção transversal do condutor em um certo tempo, dt.”

$$\boxed{i \overset{def.}{=} \frac{dq}{dt}}$$ $\rightarrow$ equação definidora de Corrente Elétrica.

A carga total que passa pelo condutor de $t = 0$ s até $t = t$

$$q = \int dq = \int_0^t i(t)\,dt$$

onde a corrente elétrica i pode ser uma função do tempo.

Sob estado estacionário ($q \neq q(t)$), a corrente é a mesma para todos os planos bb' e cc', e para todo plano que cortar o condutor (a carga deve ser conservada).

"Cada elétron que entrar, outro deve sair."

Unidade (i):

a) $[i] = [q] / [t]$ $\rightarrow$ no S. I. $\rightarrow$ **C / s** $\rightarrow$ recebe o nome de Ampère (**A**).

b) Valor unitário

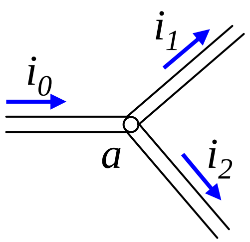
$$\boxed{1A = \frac{1\,C}{1\,s}}$$

O ampère é uma unidade básica do Sistema Internacional de Unidades, e o coulomb é definido através dele.

Obs.: 1) A corrente elétrica é um escalar (tanto carga como tempo são escalares). Isto pode causar confusão pois representamos a corrente num fio por uma seta para indicar o sentido do movimento de cargas.

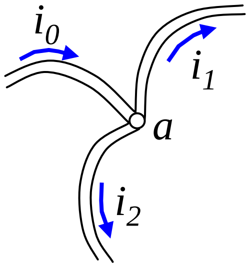
2) As setas não são vetores pois não obedecem as leis vetoriais

Ex. a da adição vetorial.



Como a carga deve se conservar → a quantidade de carga elétrica que entra na junção a deve sair

$$i_0 = i_1 + i_2$$



A equação acima continua sendo válida mesmo quando encurvamos ou reorientamos os fios no espaço.

"As setas não são vetores, mostram somente o sentido do fluxo de cargas elétricas ao longo do condutor."

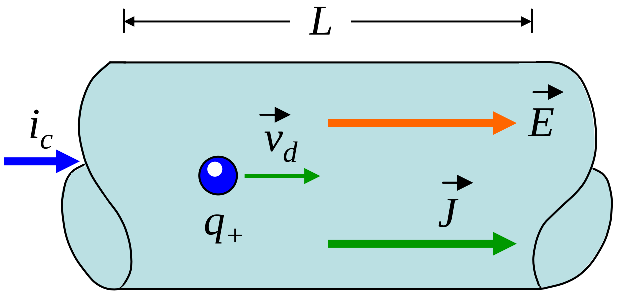
Os Sentidos das Correntes Elétricas

Sentido Real: "os portadores de carga numa corrente elétrica, são os elétrons, e eles circulam no sentido oposto ao da corrente convencional."

Sentido Convencional: "a seta da corrente é desenhada no sentido em que se moveriam os portadores de carga positivos, mesmo que os portadores reais seja negativos."

Densidade de Corrente (J)

Algumas vezes podemos estar interessados em analisar o fluxo de portadores de carga elétrica em um ponto particular no interior de um condutor. Um portador de carga positiva, fluirá no sentido do campo elétrico naquele ponto.



L $\rightarrow$ comprimento do condutor.

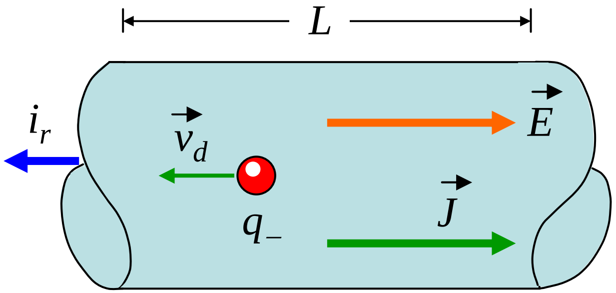
i_c $\rightarrow$ corrente convencional.

q_+ $\rightarrow$ portador de carga positivo.

$\vec{E}$ $\rightarrow$ campo elétrico no interior do condutor.

$\vec{v}_d$ $\rightarrow$ velocidade de deriva da carga sob efeito do campo $\vec{E}$.

$\vec{J}$ $\rightarrow$ densidade de corrente.



i_r $\rightarrow$ corrente real.

q_- $\rightarrow$ portador de carga negativo.

$$\boxed{J \overset{def.}{=} \frac{i}{A}}$$

Em ambos os casos, a corrente elétrica está distribuída uniformemente pelo seção transversal do condutor (área A).

$J = C\underline{te}$ em todos os pontos.

Unidade (J):

a) [J] = [i] / [A] $\rightarrow$ no S. I. $\rightarrow$ **A / m²**.

b) Valor unitário

$$\boxed{1\,{}^{A}\!/_{m^2} = \frac{1\,A}{1\,m^2}}$$

Obs.: o sentido e a direção de $\vec{J}$, são idênticos aos do campo elétrico $\vec{E}$ (independentemente do sinal do portador de carga).

$$\boxed{i = \int \vec{J} \cdot d\vec{A}}$$

onde $d\vec{A}$ é o vetor de área perpendicular a dA.

Se $\vec{J} = \mathrm{C\underline{te}}$ em módulo e paralelo a $d\vec{A}$

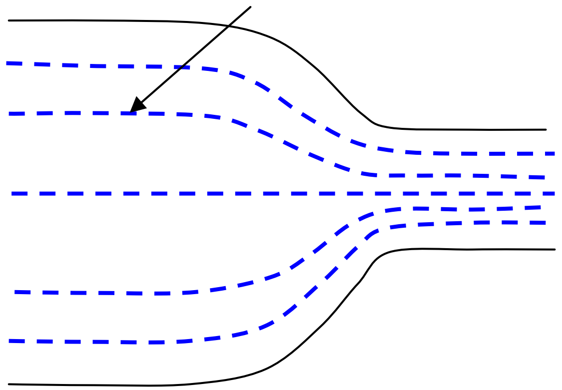
Cte em A **1(θ = 0⁰)**

$$i = \int \vec{J} \cdot d\vec{A} = \int J\, dA \cos\theta = J\, A$$

$$\boxed{J = \frac{i}{A}}$$

Analogamente às linhas de corrente (para fluxo de fluído o campo vetorial representado pelo arranjo dos vetores velocidade das partículas de fluído), o campo vetorial representado pelo arranjo dos vetores $\vec{J}$ dentro de um condutor pode ser representado da mesma maneira.

linhas de corrente (de campo)



a) Analogamente, podemos fazer o mesmo para $\vec{J}$.

b) Fluxo de fluído (densidade de corrente) através de um tubo (condutor) com estreitamento.

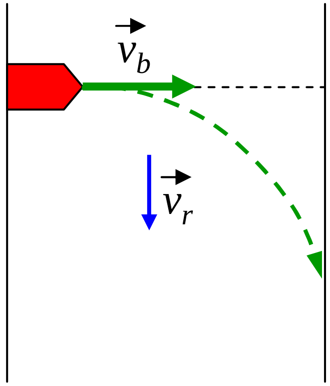
Cálculo da Velocidade de Deriva

Os elétrons de condução num condutor (ex.: cobre) tem velocidade orientadas aleatoriamente (v $O(10^6$ m/s$)$) $\rightarrow$ agitação térmica ou movimento caótico ou movimento browniano.

Velocidade de Deriva

Fluxo direto de portadores de carga (ex. elétrons, $v_d \cong O(10^{-3}$ m/s$)$ na fiação elétrica).

Ex.: 1) considere uma multidão de pessoas correndo em direções arbitrárias e empurrando umas as outras constantemente. Se esta multidão está sob uma superfície que se inclina ligeiramente numa dada direção, esta multidão prosseguirá lentamente nesta direção (velocidade de deriva).



2) Na tentativa de um barco atravessar um rio (v_b) perpendicularmente às suas margens sofre um desvio, correnteza abaixo, devido a velocidade de movimento (v_r) das águas do rio. A velocidade que provoca este desvio é chamada de velocidade de deriva ($v_d = v_r$).

"A velocidade de deriva é que determina a corrente elétrica."

Estimativa da Velocidade de Deriva para um Fio Uniforme

1) Para um portador de carga (ex.: elétron) $\vec{v} = \vec{v}_{a.t.} + \vec{v}_d$. Onde

$\vec{v}$ $\rightarrow$ velocidade do portador de carga.

$\vec{v}_{a.t.}$ $\rightarrow$ velocidade de agitação térmica.

$\vec{v}_d$ $\rightarrow$ velocidade de deriva.

2) Para N portadores de carga

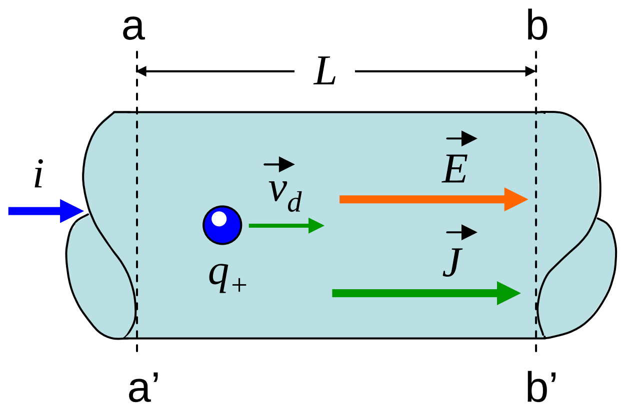
$$\frac{\sum_{i=1}^{N} v_i}{N} = \frac{\sum_{i=1}^{N} v_{a.t.,i}}{N} + \frac{\sum_{i=1}^{N} v_{d,i}}{N}$$

ou $\bar{v} = \cancelto{0}{\bar{v}_{a.t.}} + \bar{v}_d$. Então $\bar{v} = \bar{v}_d = v_d = Cte$.

$\bar{v}$ $\rightarrow$ velocidade média.

$\bar{v}_{a.t.}$ $\rightarrow$ velocidade de agitação térmica média (não provoca deslocamento líquido = zero).

$\bar{v}_d$ $\rightarrow$ velocidade de deriva média.



a) v = Cte o portador de carga executa um M.R.U.

b) Usaremos a convenção de portadores de carga positivos.

O número de portadores de carga em L, $N = n\,A\,L$ onde

n → densidade de número ($n = N / V_{ol.}$).
A → área da seção transversal do condutor.
L → comprimento do condutor.

Para usarmos $i = \dfrac{\Delta q}{\Delta t}$ temos de encontrar Δq e Δt.

1º) Cálculo de Δq. $\Delta q = N\,e = (n\,A\,L)\,e$

2º) Cálculo de Δt. De $x = x_0 + vt$ (MRU) aplicando ao problema $L = v_d\,\Delta t$ ou $\Delta t = L / v_d$

Podemos escrever i como

$$i = \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{n\,A\,\cancel{L}\,e}{\cancel{L}/v_d} = n\,A\,e\,v_d \quad \text{usando } J = \frac{i}{A} = (n\,e)\,v_d$$

$$\boxed{\vec{J} = (n\,e)\,\vec{v}_d}$$

onde $(n\,e)$ = densidade de carga portadora.

Obs.: como os portadores são positivos (por convenção), $\vec{J}$ é paralelo a $\vec{v}_d$.

Resistência e Resistividade

Quando aplicamos uma d. d. p. entre os extremos de duas barras geometricamente iguais e de materiais diferentes (ex.: cobre e vidro) vemos que as correntes resultantes são muito diferentes $\rightarrow$ resistência.

Resistência (R)

Determinamos a resistência de um condutor, entre dois pontos quaisquer, aplicando uma d. d. p., V, entre estes dois pontos e medindo a corrente i.

$$\boxed{R \overset{def.}{=} \frac{V}{i}}$$ (definição de R).

Unidade (R):

a) $[R] = [V] / [i]$ $\rightarrow$ no S. I. $\rightarrow$ **V / A** $\rightarrow$ recebe o nome de *ohm* (Ω).

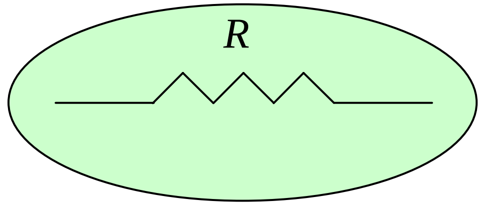
b) Valor unitário

$$\boxed{1\Omega = \frac{1\,V}{1\,A}}$$

Resistor

Conceito: um condutor cuja função no circuito é fornecer uma resistência elétrica.

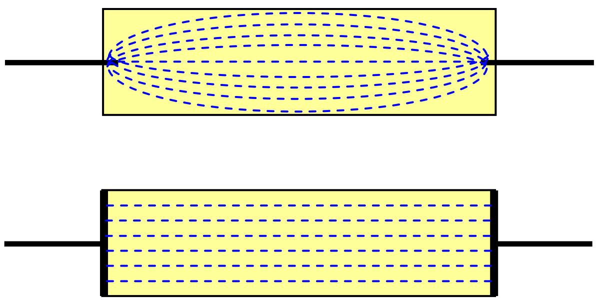
Símbolo:



→ para qualquer tipo de resistor.

Da definição $R = V / i$, temos que para $V = \mathrm{C\underline{te}}$, se R aumenta, i diminui, e vice-versa, então:

"Resistência é então um nome bastante adequado."



a) A resistência depende do modo como aplicamos a d. d. p.

b) A mesma d. d. p. é aplicada a ambos resistores ao lado, por observação fica claro que o comportamento da resistência em ambos será diferente.

"Como as linhas de corrente mostram, a corrente os percorre de modos diferentes. Logo a resistência será diferente."

Em vez de tratarmos particularmente a resistência, vamos generalizar e tratar como substância (resistividade).

Macroscópico		Microscópico	
d. d. p.	V	Campo elétrico	E
Corrente elétrica	i	Densidade de corrente	J
Resistência elétrica	R	Resistividade elétrica	ρ
Definição de R	$R \overset{def.}{=} \dfrac{V}{i}$	Definição de ρ	$\rho \overset{def.}{=} \dfrac{E}{J}$

Resistividade (ρ)

A equação que define a resistividade do material é dada por

$$\boxed{\rho \overset{def.}{=} \frac{E}{J}}$$ (definição de ρ).

Unidade (ρ):

a) $[\rho] = [E] / [J]$ $\rightarrow$ no S. I. $\rightarrow$ **(N/C) / (A/m^2)** $\rightarrow$ **Ω m** (lê-se "*ohm-metro*").

b) Valor unitário

$$\boxed{1\Omega m = \frac{1\,V/m}{1\,A/m^2}}$$

Reescrevendo a definição de ρ na forma vetorial

$$\boxed{\vec{E} = \rho\,\vec{J}}$$

Obs.: as duas equações para ρ, desta página, são válidas somente para materiais isotrópicos (materiais cujas propriedades elétricas são as mesmas em todas as direções)

Condutividade Elétrica (σ)

1) É o inverso da resistividade do material.

2) A equação definidora de condutividade elétrica

$$\boxed{\sigma \overset{def.}{=} \frac{1}{\rho}}$$ (definição de σ).

3) E podemos escrever para o material

$$\boxed{\vec{J} = \sigma \vec{E}}$$

Obs.: 1) novamente esta equação precisa que o material seja no mínimo ***isotrópico*** para satisfazê-la.

2) Pode ser visto pela representação matricial que a equação acima necessita que σ leve a uma solução isotrópica:

$$\begin{bmatrix} J_x \\ J_y \\ J_z \end{bmatrix}_{3\times1} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix}_{3\times3} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{bmatrix}_{3\times1}$$

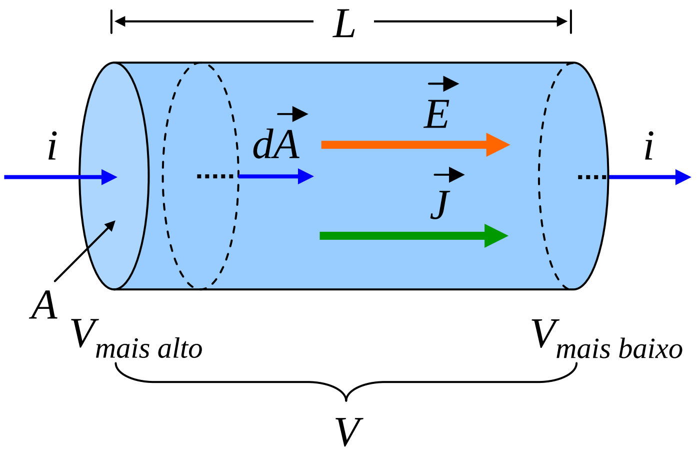
Unidade (σ):

a) [σ] = 1 / [ρ] $\rightarrow$ no S. I. $\rightarrow$ **1 / (Ω m) = (Ω m)$^{-1}$** (lê-se “*o inverso do ohm-metro*”)

b) Valor unitário

$$\boxed{1(\Omega m)^{-1} = \frac{1}{\Omega\, m} = \frac{1\, A/m^2}{1 V/m}}$$

Cálculo da Resistência



Conhecendo-se ρ da substância (ex.: cobre) podemos calcular R para o fio (dados L e ϕ - diâmetro do fio)

A $\rightarrow$ área da seção transversal do fio.
L $\rightarrow$ comprimento do fio.
V $\rightarrow$ d. d. p. entre suas extremidades.

Se as linhas de corrente forem uniformes ($|\vec{J}| = \text{C}\underline{\text{te}}$), o campo elétrico também é uniforme ($|\vec{E}| = \text{C}\underline{\text{te}}$):

1º) Do fluxo de $\vec{J}$, $i = \int \vec{J} \cdot d\vec{A} = \int J \, dA \underbrace{\cos\theta}_{1(\theta = 0^0)}$, pois $\vec{J}$ é uniforme ($\text{C}\underline{\text{te}}$) e paralelo a $d\vec{A}$. Então podemos usar $i = J\,A$.

2º) Da resistividade ρ, $\vec{E} = \rho\,\vec{J}$, como o condutor é isotrópico, e o campo elétrico e a densidade de corrente são uniformes ($\text{C}\underline{\text{tes}}$), podemos escrever $E = \rho\,J$.

3º) A d. d. p. é então dada como $\Delta V = V_f - V_i = V = -\int_i^f \vec{E} \cdot d\vec{s}$, tomando $i \rightarrow V_{\text{mais alto}}$ e $f \rightarrow V_{\text{mais baixo}}$, como $\vec{E}$ é paralelo a $d\vec{s}$ e constante em $d\vec{s}$, temos $V = E\,L$.

3º) Calculando $E = \rho J$, $\dfrac{V}{L} = \rho \dfrac{i}{A}$ e $\dfrac{V}{i} = \rho \dfrac{L}{A}$,

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

Obs.: esta equação só pode ser usada para condutores isotrópicos, de seção transversal constante e com d. d. p., V, aplicada conforme a figura da página anterior.

a) Grandezas Macroscópicas:

V, i, $R \rightarrow$ de interesse quando fazemos as medições elétricas em condutores específicos.

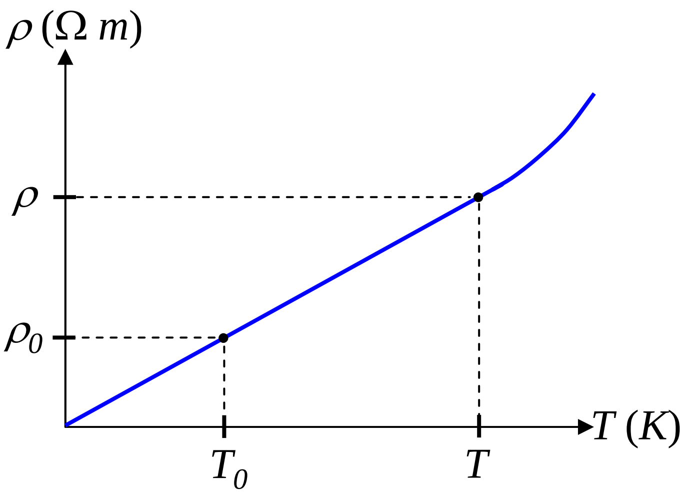
b) Grandezas Microscópicas:

E, J, $\rho \rightarrow$ de interesse quando buscamos pelo comportamento elétrico fundamental da matéria.

Ex.: usado em física do estado sólido e materiais líquidos.

Variação da Resistividade com a Temperatura

O valor da maioria das propriedades físicas variam com a temperatura.



Ex.: para o cobre $\rho_0 = 1{,}6 \times 10^{-8}\ \Omega m$ e $T_0 = 293\ \mathrm{K} \cong 273{,}15 + 20^0\ \mathrm{C}$

A curva é aproximadamente linear para uma grande faixa de temperaturas para a grande maioria dos materiais.

Como aproximação empírica, podemos usar a equação da reta que passa por dois pontos, $y - y_0 = m\,(x - x_0)$.

$$\boxed{\rho - \rho_0 = \rho_0\, \alpha\, (T - T_0)}$$

T_0 → temperatura de referência.
ρ_0 → resistividade do material para a temperatura T_0.
α → coeficiente de temperatura da resistividade.

Ex.: para o cobre $T_0 = 293$ K (temperatura ambiente $\cong 20^0$ C) e $\rho_0 = 1{,}69\ \mu\,\Omega cm$ (como foi visto acima).

Obs.: 1) como usamos $\Delta T = T - T_0$, não importa a escala, se Celsius ou se Kelvin, pois ambas apresentam a mesma diferença de temperatura ($\Delta\theta_C = \Delta T$).

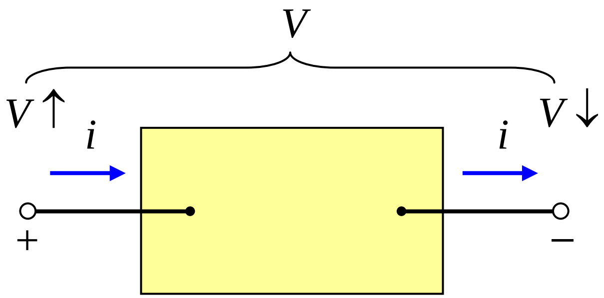
2) O α é escolhido de forma que a equação se aproxime ao máximo do valor experimental.

3) A variação da resistência com a temperatura é bastante precisa.

Ex.: termômetro de resistência de platina (usado com padrão termométrico secundário) para medir temperatura de 14 K a 900 K, na escala internacional de temperatura.

4) A equação pode se tornar mais precisa quando adicionamos os termos $(T - T_0)^2$ e $(T - T_0)^3$, no lado esquerdo $\rightarrow$ expansão em série.

Lei de Ohm



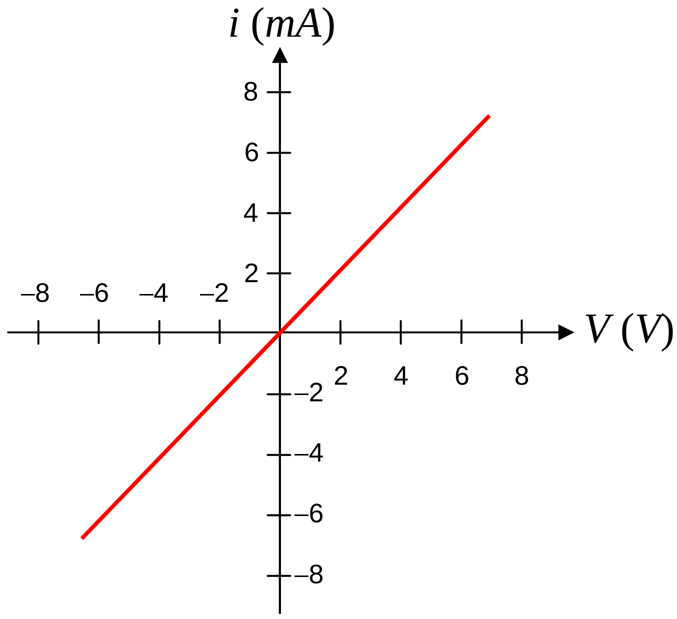
a) Um resistor é um condutor com um resistência específica.

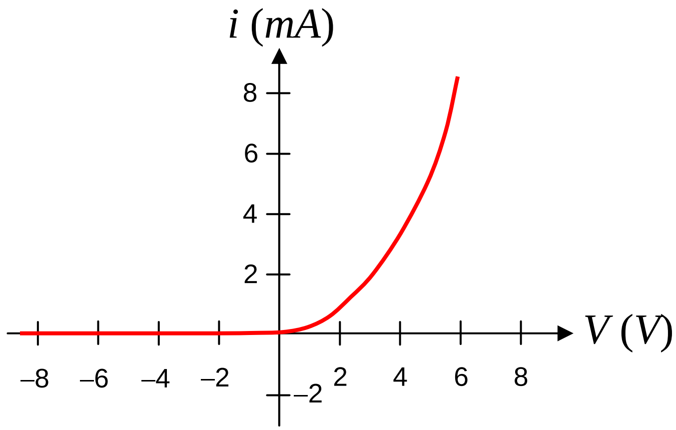
b) Ele deve ter a mesma resistência, ainda que o valor e a polaridade da d. d. p. variem.

c) Outros dispositivos condutores podem ter resistência que dependem da d. d. p. aplicada.

Como distinguir um dispositivo que dependa da d. d. p. e outro que não?

R.: 1º) usamos uma d. d. p., V, e ela está sendo aplicada através do dispositivo que está sendo testado e a corrente resultante, i, através dele, é medida enquanto variamos o valor e a polaridade de V.





dispositivo A

dispositivo B

2º) Traçamos os gráficos de i versus V para os dispositivos A e B.

3º) A polaridade de V é considerada arbitrariamente (de V+ a V–).

4º) A corrente tem sentido arbitrário para a direita (corrente em sentido contrário é negativa).

Dispositivo A

a) Uma linha que passa pela origem de modo que a razão V / i (a inclinação da reta) é a mesma para todo V.

b) $R = V / i$ é independente do valor e da polaridade da d. d. p. aplicada.

Dispositivo B

a) Outro dispositivo condutor, onde a corrente flui através do dispositivo somente quando a polaridade de V é positiva e a d. d. p. é aproximadamente maior ou igual a $1{,}5\ \mathrm{V}$.

b) A relação entre i e V não é linear.

"A Lei de Ohm afirma que a corrente fluindo através de um dispositivo é diretamente proporcional à d. d. p. aplicada ao dispositivo."

Dizemos:

a) O dispositivo A (que vem a ser um resistor de $1.000\ \Omega$) obedece a Lei de Ohm.

b) O dispositivo B (que vem a ser um diodo de junção pn) não obedece a Lei de Ohm.

Forma Fraca da Lei de Ohm

"Um dispositivo condutor obedece à Lei de Ohm quando a sua resistência é independente do valor e da polaridade da d. d. p. aplicada sobre ele."

Obs.: 1) A microeletrônica moderna depende de muitos dispositivos que não obedecem a Lei de Ohm (dispositivos não lineares).

2) É um erro dizer que $V = R\, i$ é a Lei de Ohm. **Esta não é a Lei de Ohm**. Ela é simplesmente a equação de definição para a resistência e se aplica a todos os dispositivos condutores, quer eles obedeçam a Lei de Ohm ou não.

Ex.: a) a curva da resistência do diodo pn não obedece à Lei de Ohm, no entanto, podemos calcular o valor da resistência em qualquer ponto da curva usando $V = R\,i$.

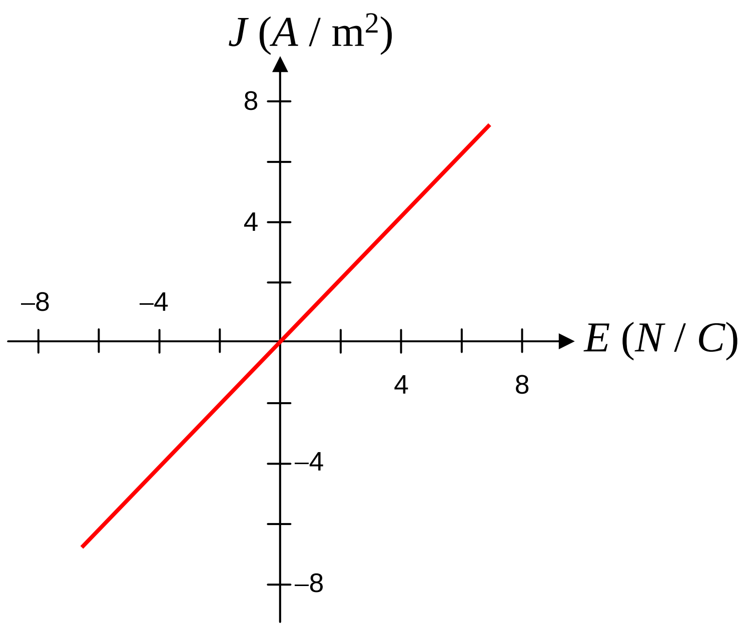
b) se tivermos os valores de corrente e d. d. p. consumidos por uma cidade durante um dia, teremos uma curva que não obedece a Lei de Ohm, no entanto, podemos calcular o valor da resistência em todos os pontos da curva usando $V = R\,i$.

3) A característica mais importante da Lei de Ohm é que o gráfico i versus V é linear, isto é, R independe de V.

Forma Geral da Lei de Ohm (ou Forma Forte da Lei de Ohm)

Nos concentraremos em materiais condutores e não em dispositivos condutores.

Neste caso, a relação relevante é $\vec{E} = \rho\,\vec{J}$ e não $V = R\,i$.



“Um material condutor obedece a Lei de Ohm quando a sua resistividade é independente do módulo, da direção e do sentido do campo elétrico aplicado.”

Obs.: 1) Todos os materiais homogêneos (ex.: condutores – cobre, semicondutores – silício dopado ou puro) obedecem a Lei de Ohm em algumas faixas de valores do campo elétrico.

2) Quando o campo elétrico é muito forte, existem em todos os casos, desvios da Lei de Ohm.

Uma Visão Microscópica da Lei da Ohm

Para entendermos porque alguns materiais obedecem a Lei de Ohm, outros não, devemos proceder a análise microscópica $\rightarrow$ processo de condução a nível atômico.

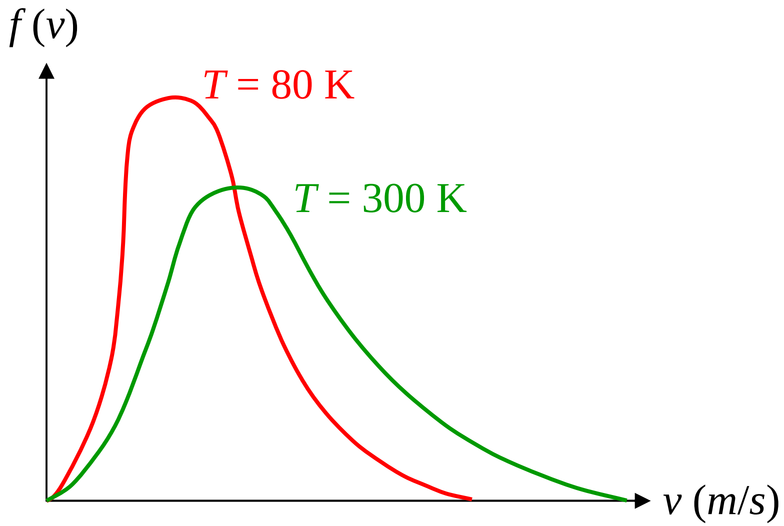
Trataremos os metais como sendo condutores (ex. cobre).

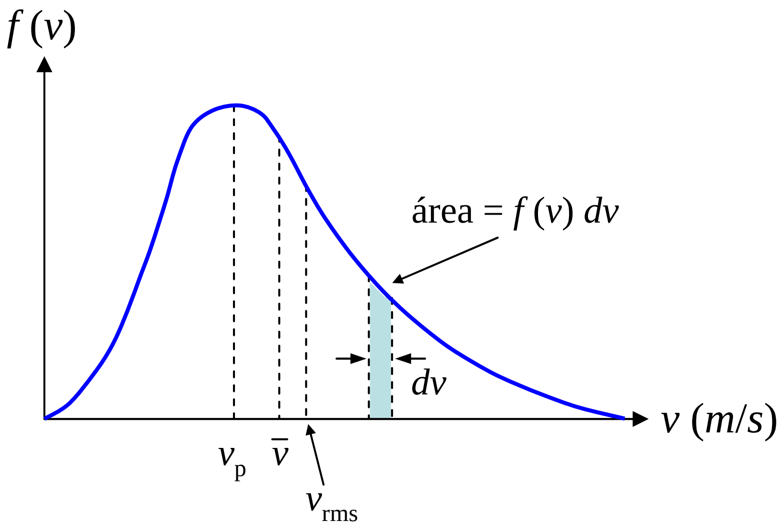
Modelo de Elétrons Livres (ou Modelo de Gás de Elétrons)

1) Os elétrons de condução no metal, podem mover-se livremente através do volume da amostra, como moléculas de um gás confinado em um recipiente.

2) Supomos também que os elétrons não colidem com outros elétrons, mas somente com os átomos do metal.

3) De acordo com a física clássica, os elétrons possuem uma distribuição de velocidades maxweliana, semelhante às moléculas de um gás.





Parâmetro	Fórmula	p/ O_2 a 300 K
$v_p \rightarrow$ velocidade mais provável	$\sqrt{3RT/M}$	395 m/s
$\overline{v} \rightarrow$ velocidade média	$\sqrt{8RT/\pi M}$	445 m/s
$v_{rms} \rightarrow$ velocidade média quadrática	$\sqrt{3RT/M}$	483 m/s

$f(v)\,dv$ $\rightarrow$ é a fração de partículas com velocidade entre v e $v + dv$.
v_{rms} $\rightarrow$ desvio padrão médio (ou erro médio quadrático ou desvio médio quadrático).

A velocidade escalar média ($\bar{v}$) do elétron, então, é proporcional à raiz quadrada da Temperatura Absoluta (Kelvin).

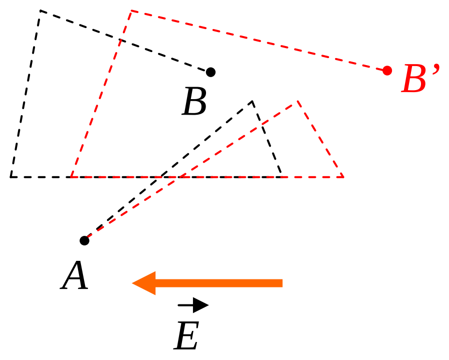
Obs.: 1) os movimentos dos elétrons não são governados pelas leis da física clássica e sim pelas da física quântica.

2) Considerando o fato acima, fazemos a suposição, muito próxima da realidade quântica, de que os elétrons movem-se com uma velocidade escalar efetiva única v_{ef}, independente de T.

Ex.: cobre $v_{ef} \cong 1{,}6 \times 10^{6}$ m/s (velocidade de agitação térmica).

Quando o campo elétrico é aplicado a um metal, os elétrons alteram ligeiramente o seu movimento caótico (de agitação térmica ou movimento browniano), deslocando-se lentamente (no sentido oposto ao do campo elétrico) com uma velocidade escalar média de deriva (v_d).

Ex.: para o cobre $v_d \cong 4 \times 10^{-5}$ m/s e $v_{ef} \cong 1{,}6 \times 10^{6}$ m/s.



Elétron movendo-se na presença de um campo elétrico $\vec{E}$:

$A \rightarrow B$ (trajetória na ausência de $\vec{E}$).

$A \rightarrow B'$ (trajetória na presença de $\vec{E}$).

O movimento dos elétrons num campo elétrico ($\vec{E}$) é uma combinação do movimento devido às colisões caóticas e do movimento devido à $\vec{E}$.

Para 1 Elétron:

$\vec{v} = \vec{v}_{\text{caótico}} + \vec{v}_{\text{E}}$, onde $\vec{v}_{\text{caótico}} = \vec{v}_{\text{ef}}$ e $\bar{v} = v_{\text{d}}$.

Para *N* Elétrons

$$\frac{\sum_{i=1}^{N} v_i}{N} = \overbrace{\cancel{\frac{\sum_{i=1}^{N} v_{caótico,i}}{N}}}^{\mathbf{0}\ \text{(deslocamento médio nulo)}} + \frac{\sum_{i=1}^{N} v_{E,i}}{N}$$, então $\bar{v} = \bar{v}_E = v_d = Cte$.

Obs.: para N elétrons o movimento caótico leva $\bar{v} = v_{\text{d}}$, então a velocidade de deriva decorre apenas do efeito do campo elétrico sobre os elétrons.

Para um Elétron Entre 2 Colisões Consecutivas

Se um elétron de massa m for colocado num campo elétrico $\vec{E}$, experimentará uma aceleração dada pelo resultado da 2ª Lei de Newton

$$a = \frac{F}{m} = \frac{e\,E}{m}$$

Obs.: 1) a natureza das colisões experimentadas pelos elétrons é tal que depois de uma colisão típica, ele "esquecerá" completamente a sua velocidade de deriva anterior.

2) Portanto, após cada colisão, o elétron começará a mover-se caoticamente.

Para N Elétrons Entre 2 Colisões Consecutivas

Usando o fato de que entre colisões os elétrons sofrem a aceleração devido ao campo elétrico $\rightarrow$ MRUV entre colisões.

Como $v = v_0 + a\,t$, entre colisões para um elétron, e considerando $v_0 = 0$ m/s para os N elétrons, temos:

$$\frac{\sum_{i=1}^{N} v_i}{N} = \frac{\sum_{i=1}^{N} a_i\, t_i}{N}, \text{ então } \bar{v} = a\,\tau = v_d, \text{ onde } \tau = \frac{\sum_{i=1}^{N} t_i}{N},$$

que é o tempo médio entre colisões.

Se medimos as velocidades escalares de deriva de todos os elétrons, em qualquer instante, percebemos que a velocidade escalar média é $a\,\tau$. Então, em qualquer instante, os elétrons terão a velocidade escalar de deriva $v_d = a\,\tau$.

$$v_d = a\,\tau = \frac{e\,E}{m}\tau \text{ , como } J = (n\,e)\,v_d \text{ então } v_d = \frac{J}{n\,e} = \frac{e\,E}{m}\tau \text{ e } E = \left(\frac{m}{e^2\,n\,\tau}\right)J\,.$$

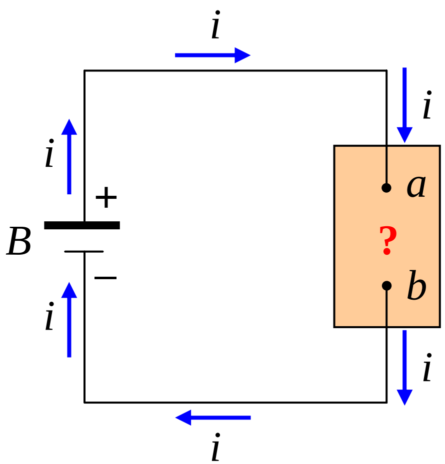
Comparando esta equação com $E = \rho\,J$

$$\boxed{\rho = \frac{m}{e^2\,n\,\tau}}$$

Obs.: 1) os metais obedecem a Lei de Ohm desde que possamos mostrar que ρ = C<u>te</u>, independente da intensidade, da direção e sentido do campo elétrico.

2) De fato, como e, n e m são constantes, resta que $\tau \neq \tau(E)$ (deve ser uma constante também). Isto pode ser considerado com verdadeiro para os metais, uma vez que $v_d << v_{ef}$.

Energia e Potência em Circuitos



B → bateria.
? → dispositivo condutor não especificado.

Ex.: resistor, um acumulador (bateria recarregável), um motor, etc..

A bateria mantém V entre a e b ($V_a > V_b$).

1º) Como a bateria mantém V = C$\underline{\text{te}}$, temos uma corrente de $a \rightarrow b$, que também é constante (i = C$\underline{\text{te}}$).

2º) A carga dq que se move através dos terminais (a e b) num tempo dt, $dq = i\ dt$.

3º) A carga dq passa por um decréscimo de potencia de módulo V e a sua energia potencial passa por um decréscimo $V = U / q$, dado por

$$dU = q\,\overset{\mathbf{0}\ (V = \mathrm{C\underline{te}})}{\cancel{dV}} + V\,dq\,, \quad dU = V\,dq \quad \text{ou} \quad dU = V\,i\,dt\,.\ \text{Então}\ P \overset{def.}{=} \frac{dU}{dt} = \frac{V\,i\,\cancel{dt}}{\cancel{dt}}$$

$$\boxed{P = \frac{dU}{dt} = V\,i}$$ (taxa de transferência de energia elétrica)

"Taxa de transferência de energia da bateria para o dispositivo desconhecido."

Ex.: 1) Se o dispositivo é um motor ligado a uma carga mecânica, a energia é transferida como trabalho realizado sobre esta carga.

2) Se o dispositivo é um acumulador que está sendo carregado, a energia é transferida sob a forma de energia química armazenada no acumulador.

3) Se o dispositivo é um resistor, a energia é transferida sob a forma de energia térmica interna, revelando-se com um aumento de temperatura.

Unidade (P):

a) $[P] = [i] / [V]$ $\rightarrow$ no S. I. $\rightarrow$ **A V** $\rightarrow$ $1A1V = \frac{1C}{1s}\frac{1J}{1C} = \frac{1J}{1s}$ conhecido como *watt* (**W**).

b) Valor unitário

$$\boxed{1V\,1A = 1W}$$

Obs.: 1) podemos fazer uma paralelo entre "o elétron se movimentando através de um resistor, com *velocidade escalar de deriva* constante e uma pedra caindo através da água com *velocidade escalar limite* constante".

2) A energia cinética média do elétron, durante o seu movimento, permanece constante e a energia potencial elétrica perdida por ele aparece como energia térmica no resistor.

3) Microscopicamente: esta transferência de energia é uma conseqüência das colisões entre os elétrons e a rede cristalina do resistor (aumento de temperatura).

4) A energia é dissipativo, pois a transferência de energia é irreversível.

Formas Alternativas para Potência P

Aplicando para um resistor, temos de $V = R\,i$ e $P = V\,i$

$$\boxed{P = R\,i^2} \quad \text{ou} \quad \boxed{P = \frac{V^2}{R}}\,.$$

Obs.: embora $P = V\,i$ se aplique a todas as espécies de transferências de energia elétrica, as fórmulas acima se aplicam apenas a transferência de energia elétrica em energia térmica em um resistor.

Condutores, Não-Condutores (Isolantes) e Semicondutores

Os semicondutores são considerados a peça mais importante na revolução da microeletrônica.

Algumas propriedades elétricas do Cobre e do Silício			
Propriedade	Unidade	Cobre	Silício
Tipo de material		Metal	Semicondutor
Densidade dos portadores de carga	m^3	9×10^{28}	1×10^{16}
Resistividade	$\Omega\ m$	2×10^{-8}	3×10^{3}
Coeficiente de temperatura da resistividade	K^{-1}	$+ 4 \times 10^{-3}$	$- 70 \times 10^{-3}$

Comparando as propriedades do silício (semicondutor típico) com as do cobre (condutor metálico típico):

1) O silício tem muito menos portadores de carga.

2) O silício tem uma resistividade muito alta.

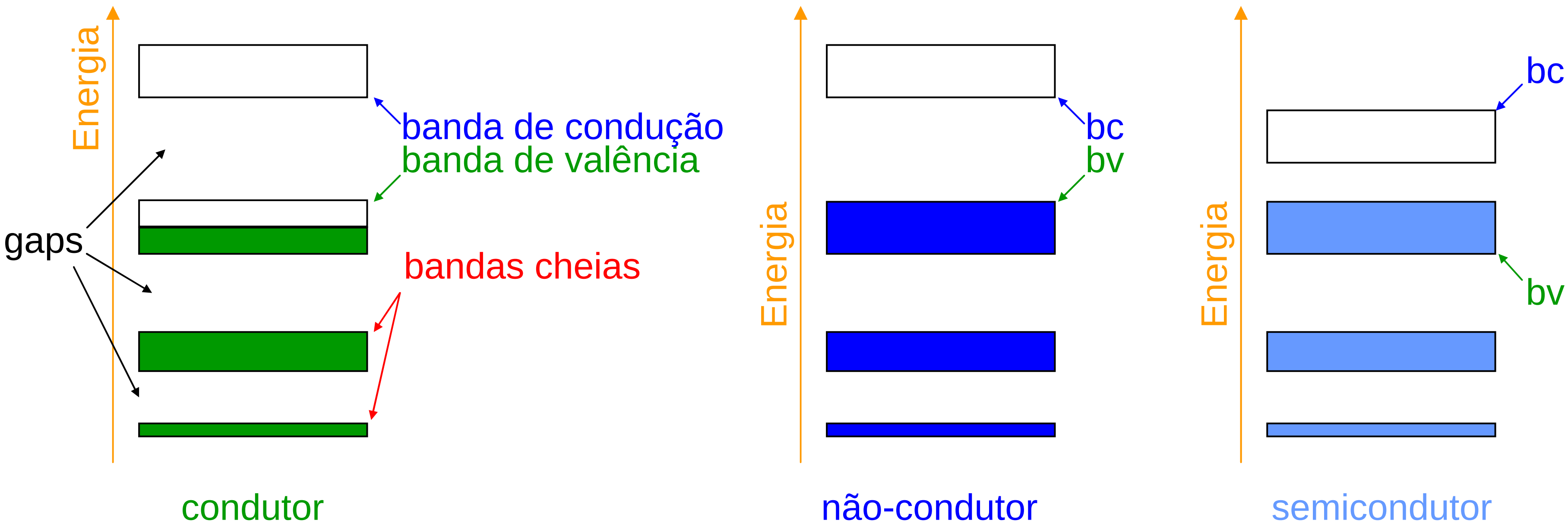
3) O silício tem um coeficiente de temperatura da resistividade muito grande, e negativo, quando comparado com ao cobre. Quando a resistividade do cobre aumenta com a temperatura, a resistividade do silício puro diminui com a temperatura.

O silício puro é considerado, praticamente, como um isolante (resistividade muito alta). Então, o silício só se torna útil quando "dopado", isto é, quando adicionamos de modo controlado, uma certa quantidade de "impureza" $\rightarrow$ átomos diferentes dos constituintes do silício.

Como as propriedades elétricas do silício são diferentes dos condutores comuns (ex.: cobre), o processo de condução no silício deve ser diferente.

Os elétrons em átomos isolados: ocupam níveis de energia quantizados, cada nível contendo um único elétron → Princípio da Exclusão de Pauli.

Os elétrons nos sólidos: também ocupam níveis de energia quantizados. Mas, tais níveis, em número muito grande, estão cerradamente comprimidos em “bandas” permitidas de níveis muito próximos. As bandas são separadas por “lacunas” (bandas proibidas ou *gaps*) que representam faixas de energias proibidas para os elétrons.



Condutor: (ex.: cobre) a banda mais alta de energia, banda de valência, contém alguns elétrons e está parcialmente preenchida. Quando aplicamos um campo elétrico para formar a corrente, a energia destes elétrons aumenta, como existem níveis desocupados na banda de valência, temos condução de corrente → condução na banda de valência.

Não-Condutor: (ex.: vidro) a banda de valência está completamente preenchida, os níveis mais altos de energia se encontram numa banda vazia, banda de condução, separada por uma lacuna de energia considerável. Quando aplicamos o campo elétrico não ocorre nenhuma corrente, porque não existe nenhum mecanismo pelo qual um elétron possa aumentar a sua energia, saltando para o nível de energia vago mais próximo que é muito grande. Somente quando aplicamos um campo elétrico muito intenso (altos valores de tensão), é que conseguimos promover elétrons para a banda de condução $\rightarrow$ se conduzir, conduz somente na banda de condução.

Semicondutor: (ex.: silício) semelhante ao isolante, exceto que a lacuna entre as bandas de condução e valência é pequena, de modo que a probabilidade dos elétrons poderem "pular sobre a lacuna" (tunelamento) por agitação térmica não é nula. Mais importante é o fato de que impurezas controladas podem contribuir com portadores de carga para a banda de condução $\rightarrow$ conduz na banda de condução.

Ex.: dispositivos semicondutores $\rightarrow$ transistor, diodos de junção, etc. (são fabricados pela dopagem seletiva de diferentes regiões do silício com diferentes espécies de átomos de impurezas).

Resistividade (usando Teoria de Bandas)

Usando a equação para resistividade da pág. 26

$$\boxed{\rho = \frac{m}{e^2 n \tau}}$$

1) Num condutor: n é grande mas praticamente constante (seu valor não varia apreciavelmente com a temperatura). Para metais, o aumento da resistividade com a temperatura é causada por um aumento na taxa de colisão dos portadores de carga, que é indicado pelo decréscimo de τ.

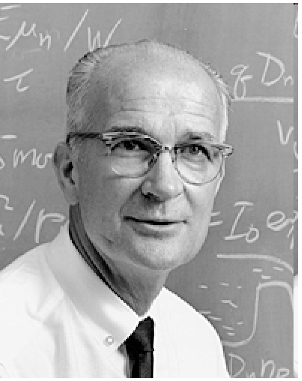
"efeito do aumento da taxa de colisão implica em decréscimo em τ."

2) Num semicondutor: n é pequeno mas aumenta rapidamente com a temperatura, quando o aumento da agitação térmica coloca mais portadores de carga disponíveis para condução. Tal fato provoca um decréscimo da resistividade com o aumento da temperatura (coeficiente de temperatura da resistividade negativo). O mesmo aumento de colisão que observamos nos metais, também ocorre para os semicondutores, mas o seu efeito é rapidamente encoberto pelo número de portadores de carga.

"efeito do aumento da taxa de colisão < efeito de aumento do número dos portadores de carga."

Obs.: 1) o quadro banca-lacuna (Teoria de Bandas) está fortemente baseado na Física Quântica. Este modelo pode explicar as propriedades dos semicondutores.

2) Willian Shockley, John Bardeen e Walter Brattain, ganharam o Prêmio Nobel de 1956 pela descoberta do transistor, como uma aplicação específica da Física Quântica aos materiais sólidos.



William Bradford Shockley (13 de fevereiro de 1910, Londres, Inglaterra – 12 de agosto de 1989, Stanford USA) foi um físico norte-americano e inventor.

Juntamente com John Bardeen e Walter Houser Brattain, co-inventou o transistor, pelo qual receberam o Prêmio Nobel de Física de 1956.

John Bardeen (23 de maio de 1908, Madison – 30 de janeiro de 1991, Boston – EUA) foi um físico norte-americano e engenheiro elétrico.

Foi a primeira pessoa que ganhou o Premio Nobel em Física duas vezes: a primeira em 1956 com William Shockley e Walter Brattain pela invenção do transistor; e novamente em 1972 com Leon Neil Cooper e John Robert Schrieffer pela fundamentação da teoria da supercondutividade convencional (Teoria BCS).

Walter Houser Brattain (10 de fevereiro de 1902, Amoy, China – 13 de outubro de 1987, Seattle, USA) foi um físico norte-americano que trabalhou na Bell Labs.

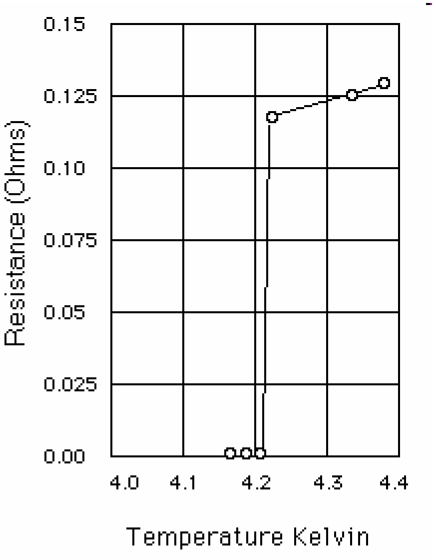
Juntamente com John Bardeen e William Shockley, inventaram o transistor. Eles dividiram o Prêmio Nobel de Física de 1956 pela sua invenção. Ele devotou toda a sua vida para pesquisar Estados de Superfície.

Supercondutores

Heike Kamerlingh Onnes (21 de setembro de 1853, Groningen – 21 de fevereiro de 1926, Leiden, Holanda) foi um físico holandês.

Ele foi pioneiro das técnicas de refrigeração e explorou o comportamento dos materiais quando resfriados a aproximadamente zero absoluto. Isto o levou a descoberta da supercondutividade: propriedade de certos materiais, cuja resistência elétrica desaparece abruptamente quando atinge baixíssimas temperaturas. Recebeu em 1913 o Nobel de Física, por pesquisas sobre as propriedades da matéria a baixas temperaturas e pela produção do hélio líquido.

Em 1911, Onnes descobriu que a resistividade do mercúrio desaparecia completamente para temperaturas abaixo de, aproximadamente, 4 K. (≅ 4,2 K)



Onnes produziu Hélio Líquido pela primeira vez em 1908, o que permitiu que estudasse a propriedade dos materiais a baixas temperaturas (temperaturas do hélio líquido).

A resistência do mercúrio cai a zero na temperatura de aproximadamente 4 K.

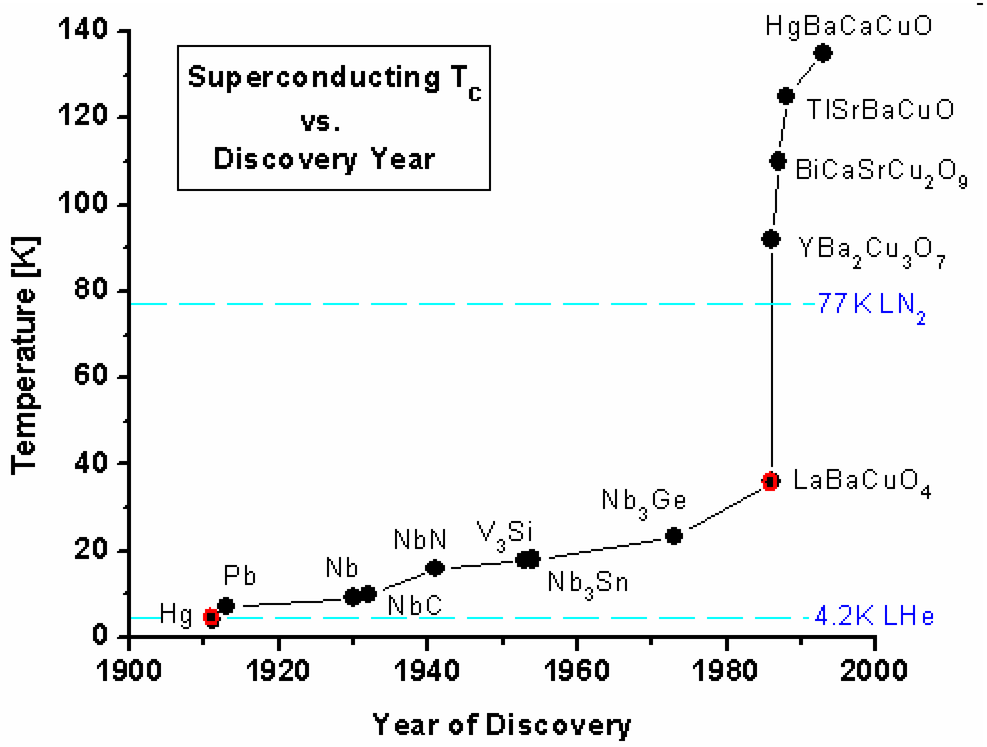
O mercúrio é sólido nesta temperatura.

Onnes usou Hélio Líquido para resfriar o mercúrio (metálico).

Supercondutividade: as cargas (portadores de cargas) podem fluir através de um supercondutor sem haver perdas de calor (energia).

Ex.: 1) as correntes induzidas num anel supercondutor persistem por muitos anos sem diminuírem, mesmo sem haver nenhuma bateria no circuito.

2) “Em 16 de fevereiro de 1983, uma unidade de armazenamento de energia magnética supercondutora foi ativado em Tacoma, Washington, EUA, para armazenar energia elétrica. Ela armazenava energia elétrica durante os picos de fornecimento e libera energia durante os picos de demanda. Funcionou durante um ano antes de ser desativado.”



Obs.: o problema tecnológico → baixas temperaturas necessárias para manter o supercondutor.

Ex.: os ímãs, do grande acelerador Fermilab, são energizados por meio de correntes em bobinas supercondutoras, que devem ser mantidas sob temperaturas de aproximadamente igual a $4\ \mathrm{K}$ (“aproximadamente igual” a temperatura do hélio líquido).

Em 1986, foram descobertos novos materiais cerâmicos que se tornavam supercondutores à temperaturas consideravelmente mais altas

Ex.: aproximadamente $125\ \mathrm{K}$.

Objetivo final → obter supercondutores à temperatura ambiente.

Obs.: os melhores condutores normais, como prata e cobre, não se tornam supercondutores; por outro lado alguns supercondutores, recentemente descobertos são materiais cerâmicos que normalmente são isolantes.

Mecanismo da Supercondutividade

1) Permaneceu inexplicado durante 60 anos após a sua descoberta.

2) John **B**ardeen, Leon **C**ooper e Robert **S**chrieffer (1972) receberam o Premio Nobel pela explicação teórica (Teoria BCS – iniciais).

Leon Neil Cooper (28 de fevereiro de 1930, Nova York, USA) é um físico norte-americano.

Pelo seu papel no desenvolvimento da Teoria BCS da supercondutividade, ele dividiu o Premio Nobel de 1972 com John Bardeen e Robert Schrieffer. Sua principal contribuição para a teoria foi a sua descoberta do par de elétrons chamados de Par de Cooper (em 1956), elétrons que se repelem sob condições normais são atraídos um com o outro em materiais supercondutores.

John Robert Schrieffer (31 de maio de 1931, Oak Park, EUA) é um físico norte-americano.

Juntamente com John Bardeen e Leon Cooper, receberam o Premio Nobel de Física de 1972 pelo desenvolvimento da Teoria BCS, a primeira teoria microscópica bem sucedida para explicar a supercondutividade.

Teoria BCS: os portadores de carga num supercondutor não são elétrons individuais, mas pares de elétrons chamados de Pares de Cooper, comportando-se como partículas individuais, com propriedades totalmente diferentes das de um elétron.

"Como elétrons repelem-se mutuamente, é necessário algum mecanismo especial para induzí-los a formar um par."

A descrição semi-clássica que ajuda na compreensão deste fenômeno quântico é a Teoria BCS:

"Um elétron avançando através de uma rede atômica, distorce ligeiramente a rede que, por sua vez cria uma concentração, de curta duração, de acentuada carga positiva. Se um segundo elétron estiver próximo, no momento certo, ele será atraído para esta região de carga positiva, formando um par com o primeiro elétron."

Obs.: até agora, os supercondutores operam por meio de pares de Cooper, mas, não existe concordância universal sobre o mecanismo pelo qual estes pares são formados.

Lista de Exercícios Complementar 6

3P)	pág. 129
7E)	pág. 129
10E)	pág. 129
11P)	pág. 129
18E)	pág. 130
19E)	pág. 130
23E)	pág. 130
38P)	pág. 130
51E)	pág. 131
57P)	pág. 131