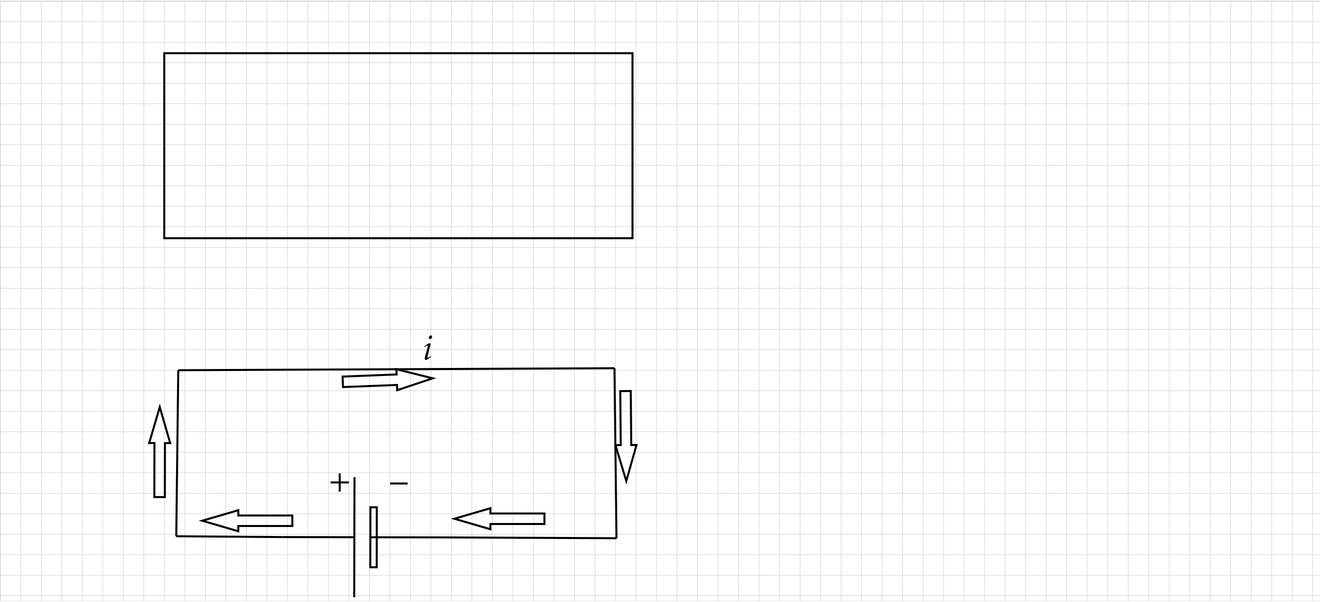
1. Corrente Elétrica

- Fluxo "Líquido" (resultante total) de cargas elétricas.
  - Elétrons de condução (livres) num fio de cobre
    - * movem-se em direções aleatórias (com $v \approx 10^6$m/s), não há corrente total.
    - * Colocando-se uma bateria: Cria-se um campo elétrico que orienta o movimento dos elétrons de condução ao longo das linhas de campo, criando uma corrente não nula.



  - Fluxo de água numa mangueira
    - * Cada molécula de água tem 10 elétrons, então ocorre uma imensa transferência de elétrons junto com a água. Mas também há 10 prótons. Logo a corrente total é nula.
  - Se por uma seção passa uma carga Δq, durante o tempo Δt, define-se a corrente (média) como:

$$i_m = \frac{\Delta q}{\Delta t}, \text{ ou instantânea: } i = \frac{dq}{dt}. \tag{1}$$

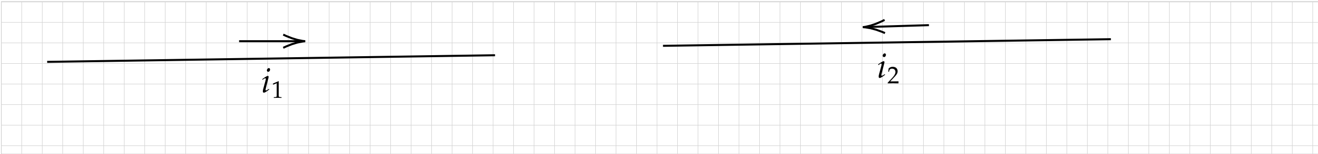
  - E, dada uma corrente $i(t)$, a carga que passa durante um intervalo Δt, será:

$$q = \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} i(t)dt,$$

ou se i for constante

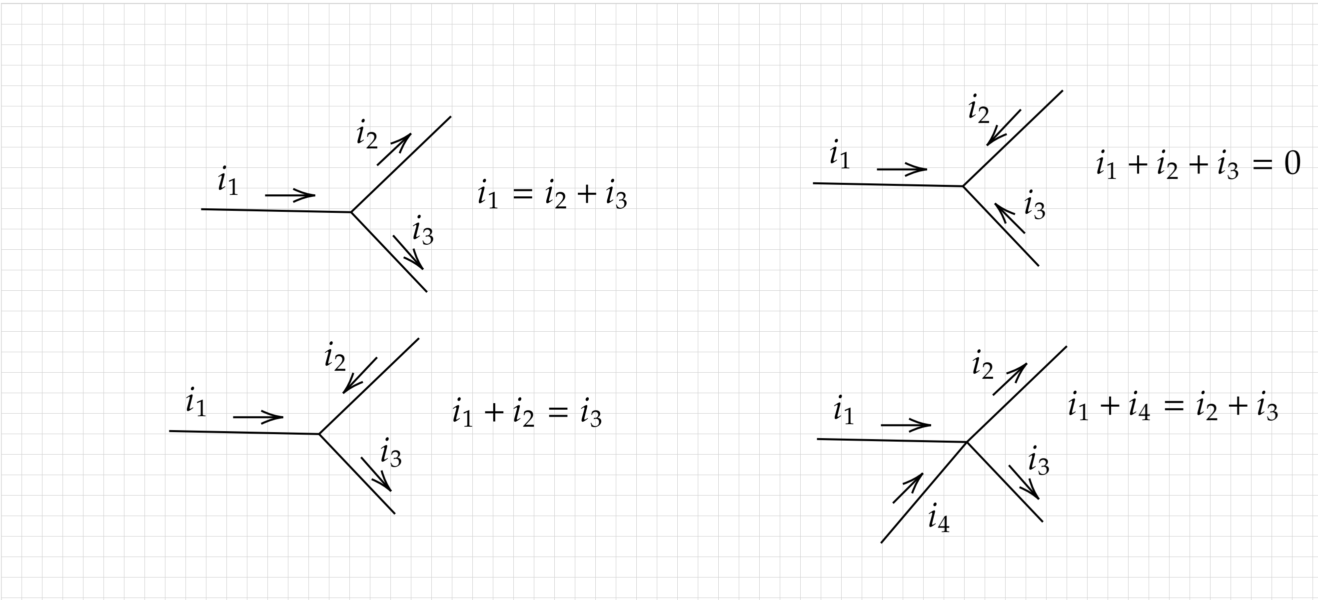
$$q = i\Delta t.$$

- A corrente é um escalar, mas com SENTIDO:



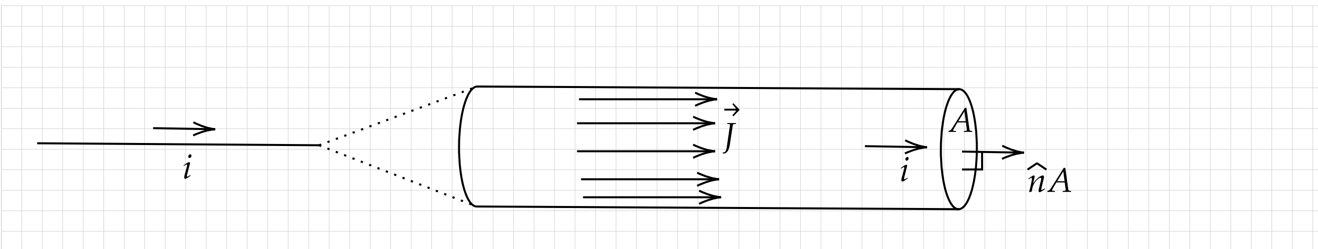
1.1. Conservação da corrente

- Quando a corrente se divide em uma bifurcação: a corrente total que entra é igual a corrente total que sai:



2. Densidade de Corrente

- Corrente é uma grandeza total (com a vazão de água por um cano), onde a espessura do fio não importa.
- Se o condutor tiver espessura (calibre, largura, diâmetro, ...) a corrente vai andar ***dentro*** dele.



- A densidade de corrente é uma grandeza vetorial que aponta na direção do movimento das cargas elétricas, e é definido em todo o corpo do condutor, e é definada por

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

- Se $\vec{J}$ for constante e tiver direção normal à área ($\vec{J}$ e $d\vec{A}$) forem paralelos,

$$i = JA.$$

- Defini-se o módulo da Densidade de Corrente (média), como sendo a "corrente dividida pela área da sessão transversal do condutor":

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

em A/m².

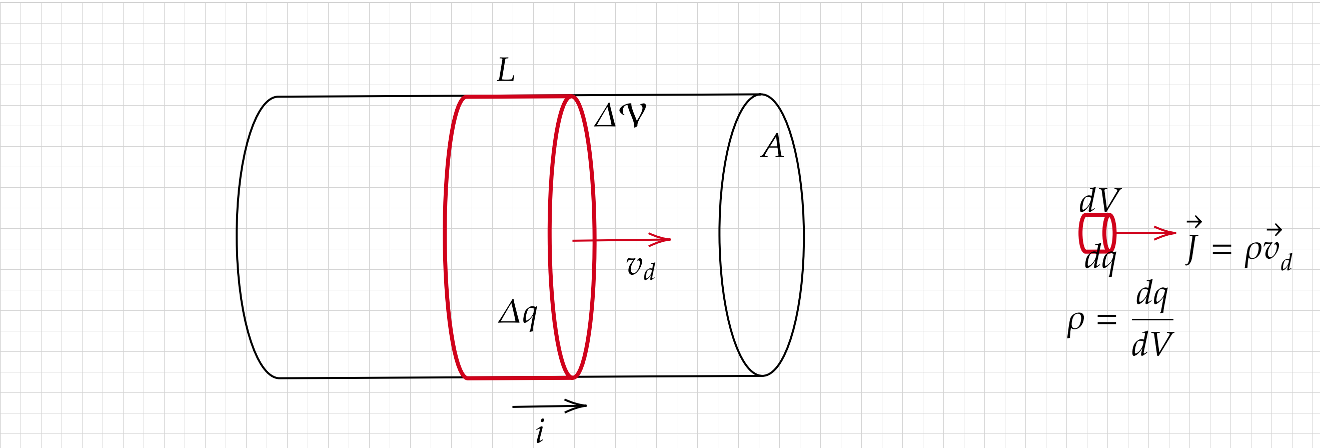
Exemplo:
Se i=1A, e o fio tiver diâmetro de 4mm de diâmetro, qual é a densidade de corrente?

$$A = \pi r^2 = \pi\left(2 \times 10^{-3}\right)^2 = 3.14 \times 4 \times 10^{-6} = 12.5 \times 10^{-6} m^2$$
$$J = i / A = (1/12.5) \times 10^6 = 0.080 \times 10^6 = 8.0 \times 10^4 A/m^2$$

2.1. Velocidade de Deriva

- Quando direcionados por um campo elétrico, os elétrons se movem em um sentido preferencial e aceleram.
- Logo eles atingem uma velocidade constante, chamada ***velocidade de deriva***.
- Esta velocidade é bem pequena $v_d \approx 10^{-7}$m/s, bem menor que a velocidade térmica ($v_t \approx 10^6$m/s).

2.1.1. Relação entre v_d e $\vec{J}$:



A carga Δq (positiva) move-se para a direita, e atravessa a área A, formando uma corrente i. Ela move-se com velocidade de deriva v_d para a direita.

O tempo que demora para esta carga passar por A será

$$\Delta t = \frac{L}{v_d},$$

que está relacionado com a corrente i,

$$i = \frac{\Delta q}{\Delta t},$$

assim, vamos tentar relacionar v_d com J:

$$v_d = \frac{L}{\Delta t} = \frac{L}{\Delta q / i} = \frac{Li}{\Delta q}\frac{A}{A} = \frac{J \Delta \mathcal{V}}{\Delta q},$$

ou

$$J = \frac{\Delta q}{\Delta \mathcal{V}} v_d \; = \; \rho v_d,$$

ou vetorialmente

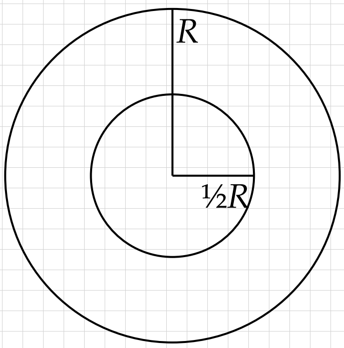
$$\vec{J} = \rho \vec{v}_d,$$

onde ρ é a densidade de carga (C/m³).

Para um fluido de elétrons, a densidade de carga será igual a densidade de elétrons (elétrons por m³) vezes a carga do elétron e, então:

$$\vec{J} = (ne)\vec{v}_d.$$

Exemplo 26.02
Condutor cilíndrico R=2,0mm, J=2,0e5 A/m². Qual á corrente na parte externa, entre R/2 e R?



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

Se J for constante e ortogonal à superfície:

$$i = JA,$$

$$i = 2.0 \times 10^5 \times \left(\pi R^2 - \pi (R/2)^2\right) =$$

$$= \; 6.28 \times 10^5 \times R^2 (3/4) =$$

$$= \; 6.28 \times 10^5 \times 4 \times 10^{-6} \times 3/4 =$$

$$= \; 18.84 \times 10^{-1} = 1.88 A.$$

3. Resistência elétrica

- Coloque uma diferença de potencia (d.d.p.) V nas extremidades de
  - Uma barra de ferro: MUITA corrente elétrica (físcas, esquenta)?
  - Uma barra de borracha: Nenhuma corrente (nada acontece)?

- A corrente i depende das propriedades do material.

- Resistência - quanto maior a resistência R menor será a corrente i (inversamente proporcionais):

$$i = \frac{V}{R},\ R = \frac{V}{i}$$

em V/A = Ohm (Ω). $1\Omega = 1$V/A.

- Símbolo:

- A Resistência é uma propriedade do OBJETO FÍSICO, não do material.

- Imagine a resistência como a situação de uma estrada: quanto mais estreita (largura, área da seção transversal), mais lento é o tráfego, quanto mais comprida (distância total), mais demorado é o tráfego, e quanto mais esburacada, mais lento é o tráfego!
  - Desses, apenas "os buracos" são uma propriedade do "material da estrada".

- Resistividade (ρ) - Propriedade do material: dado um campo elétrico, este gera uma densidade de corrente. Quanto **maior** ρ, **menor** será esta densidade de corrente:

$$J = \frac{E}{\rho},\ \rho = \frac{E}{J}$$

ou vetorialmente

$$\vec{E} = \rho\vec{J}.$$

Note que ρ é medido em (V/m)/(A/m²) = V.m/A = $\Omega \cdot \mathrm{m}$.

- O inverso da resistividade é a condutividade:

$$\sigma = \frac{1}{\rho}.$$

e assim:

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

3.1. Relação entre Resistência e Resistividade

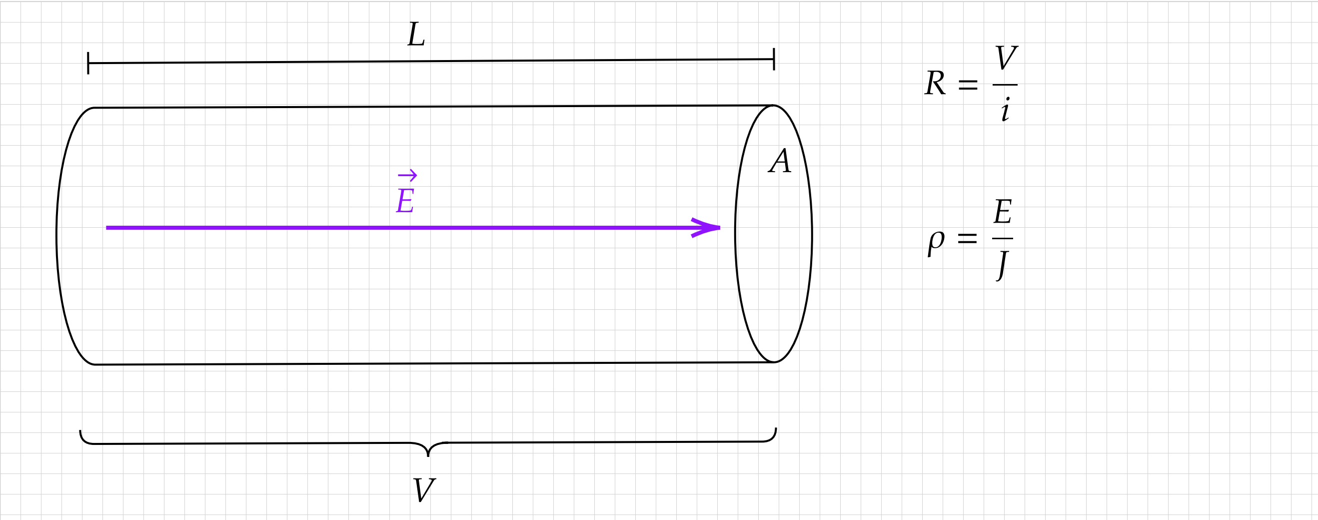
Considere um material de resistividade ρ. Vamos construir um resistor cilíndrico, e vamos aplicar uma DDP V nas estremidades do condutor.

Vamos relacionar:

$$R = \frac{V}{i},$$

com

$$\rho = \frac{E}{J}.$$



Note que: $E = V/L$, e assim:

$$\rho = \frac{E}{J} = \frac{V}{LJ},$$

e $V = Ri$,

$$\rho = \frac{V}{LJ} = \frac{Ri}{LJ},$$

e como $J = i/A$, temos

$$\rho = \frac{Ri}{LJ} = \frac{Ri}{Li/A} = R\frac{A}{L},$$

ou

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

lembre da analogia da estrada.

Exemplo:

Se um componente tem L=1cm, r=4mm, e resistência elétrica de 1kΩ, qual é a resistividade do material?

$$R = \rho\frac{L}{A} \rightarrow \rho = R\frac{A}{L} \rightarrow 1000 \times \frac{\pi r^2}{10^{-2}} = 10^5\pi\left(4 \times 10^{-3}\right)^2 = 50 \times 10^5 \times 10^{-6} = 5\Omega m$$

3.2. Resistividade e Temperatura

Sua dependênicia com a temperatura é similar ao efeito da dilatação térmica: a mudança ***relativa*** de resistividade é proporcional a mudança de temperatura, ou seja:

$$\frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} = \alpha \Delta T,$$
$$\rho = \rho_0 + \rho_0 \alpha \Delta T \ .$$

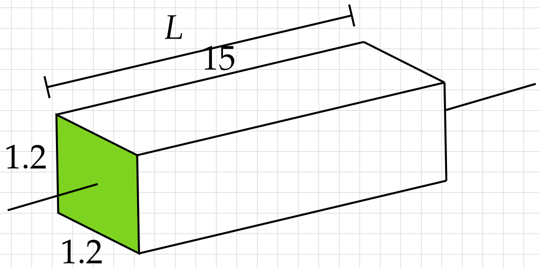
Onde ρ_0 é a resistividade em uma temperatura de referência T_0, e $\Delta T = T - T_0$.
Exemplo, Cobre:
$\rho_{20°C} = 1.69 \times 10^{-8} \ \Omega m$, $\alpha = 4.3 \times 10^{-3} \ K^{-1}$
Calcule ρ à $100°C$.

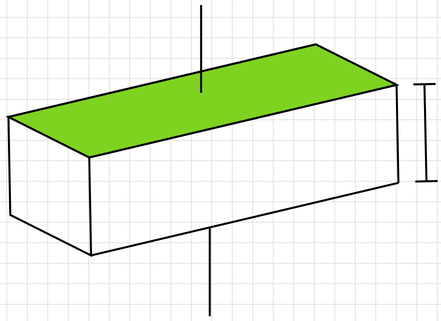
$$\frac{\rho_{100°C} - \rho_{20°C}}{\rho_{20°C}} = \alpha \Delta T = 4.3 \times 10^{-3} \times 80 = 0.34 \ \rightarrow$$

$$\rho_{100°C} = \rho_{20°C} + \rho_{20°C} \alpha \Delta T = 1.69 \times 10^{-8} + 1.69 \times 10^{-8} \times 0.34 = 2.26 \times 10^{-8}$$

Exemplo 26.04

Bloco de Fe: (1,2x1,2x15)cm. Calcule R se a d.d.p. V for aplicada nas faces (1) paralelas quadradas, e se V for aplicada nas faces (2) paralelas retangulares.





$$R_1 = \rho_{Fe}\frac{L}{A} = \rho_{Fe}\frac{0.15}{1.2^2 10^{-4}} = \rho_{Fe}0.10\times 10^4 = 1000\rho_{Fe}.$$

$$R_2 = \rho_{Fe}\frac{L}{A} = \rho_{Fe}\frac{1.2\times 10^{-2}}{(1.2\times 15)\times 10^{-4}} = \rho_{Fe}0.067\times 10^2 = 6.7\rho_{Fe}.$$

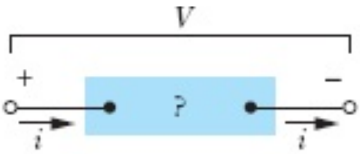
$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{1000\rho}{6.7\rho} = 150.$$

4. Lei de Ohm

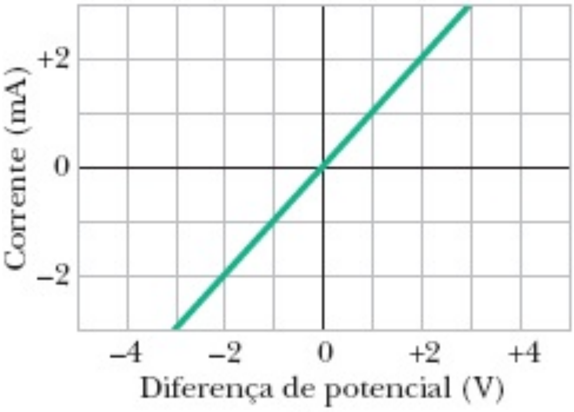
Por definição, a relação entre Corrente, voltagem e resistência é sempre:

$$R(V) = \frac{V}{i} \;\text{ ou }\; V = R(V)i \;\text{ ou }\; i = \frac{V}{R(V)}$$

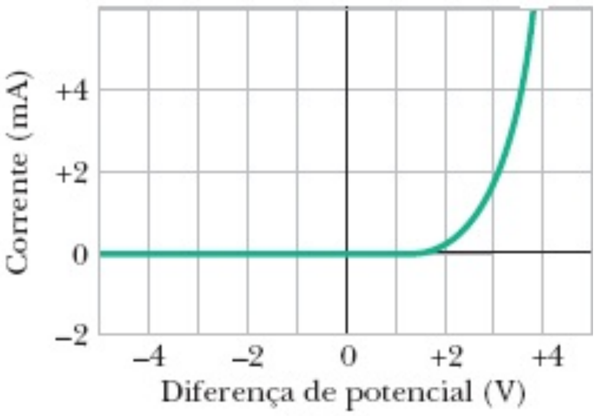
onde, em geral, R pode depender da voltagem aplicada.
Por exemplo:



(a)



(b)



(c)

- Um material é "Ohmico", ou obedece a Lei de Ohm, se R for **constante** para qualquer valor de V aplicado, ou seja

$$V = Ri,$$

  onde R **é constante.**
- A lei de Ohm implica tambem a constância da resistividade:
  - A resistividade ρ não depende do módulo do Campo Elétrico aplicado:

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

  onde ρ é constante!

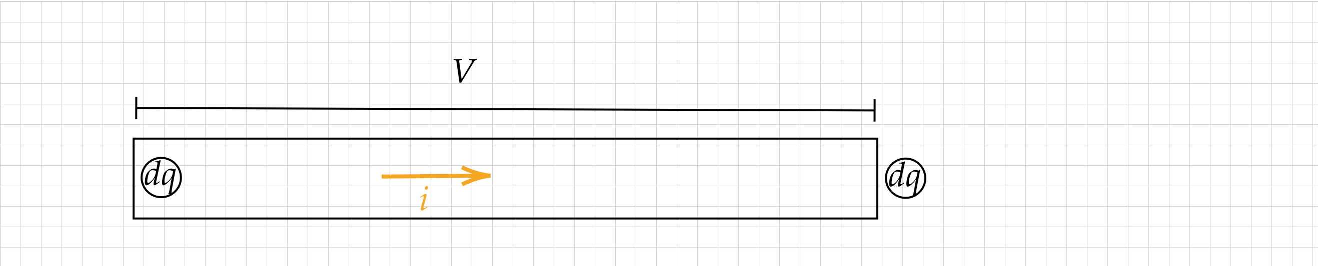
4.1. Visão microscópica da lei de Ohm

O movimento dos elétrons é, em realidade, dominado pela velocidade térmica.
A presença do campo elétrico causa uma mudança tão pequena no movimento dos elétrons que praticamente nada muda no material.

5. Energia e Potência

Considere uma corrente i que passa por um resistor R, sob diferença de potencial V.

Vamos calcular a energia necessária para mover uma pequena carga dq, de uma extremidade à outra do resistor.



Como a diferença de potencial é V, temos que:

$$dU = dqV,$$

e como $i = \frac{dq}{dt}$, temos que

$$dU = i\,dt\,V.$$

A energia depende do tempo que a carga demora para atravessar o resistor: a cada intervalo de tempo dt usa-se a energia dU, ou seja a energia usada por segundo, a potência, é

$$P = \frac{dU}{dt} = iV.$$

Esta é a "taxa de transferência de Energia Elétrica" (***da bateria para o meio***).
Esta espressão é geral.

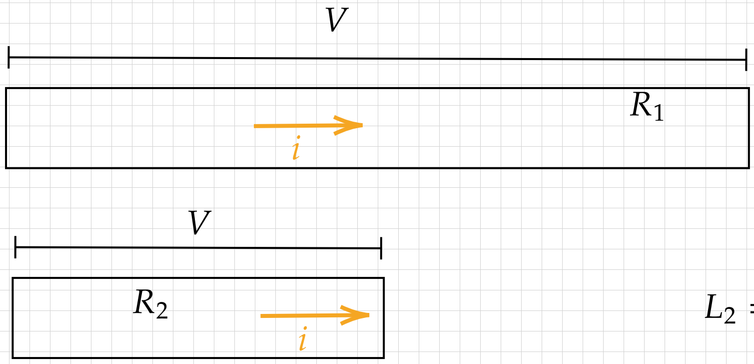
Note que P é medido em, Watts (W), e que iV é A.V=(C/s).J/C=J/s.

Note também que, ***para resistores***, usando $V = Ri$, temos que:

$$P = iV = i^2 R,$$

$$P = \frac{V^2}{R}.$$

Exemplo 26.06
Considere um fio com
R=72 Ohm.
Se V=120V,
(1) calcule P.
(2) Se o fio é cortado ao meio, recalcule P.



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

$$L_2 = \frac{1}{2} L_1 \rightarrow R_2 = \frac{1}{2} R_1$$

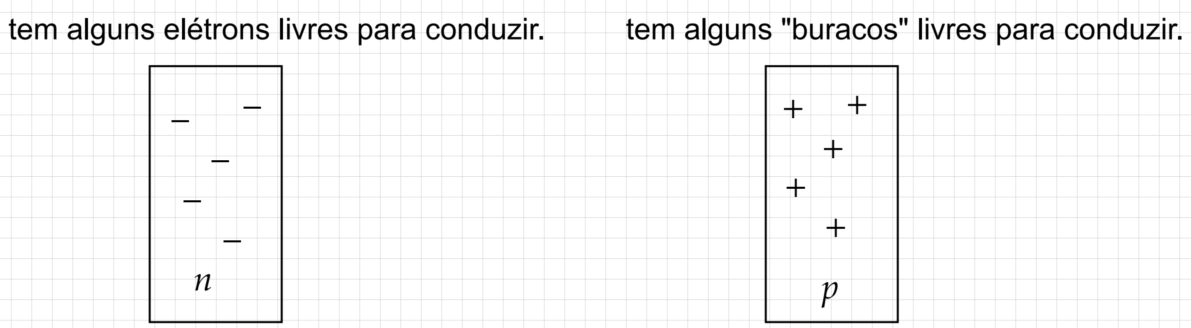
(1) $P = iV = (V/R)V = V^2/R = (120)^2/72 = 200\ W.$

(2) ao cortar ao meio, a resistência cai pela metade. R'=36 Ohm.
$P = iV = V^2/R = 14400/36 = 400W$

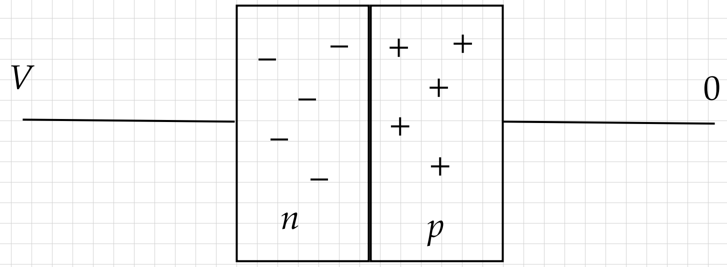
6. Semicondutores e Supercondutores

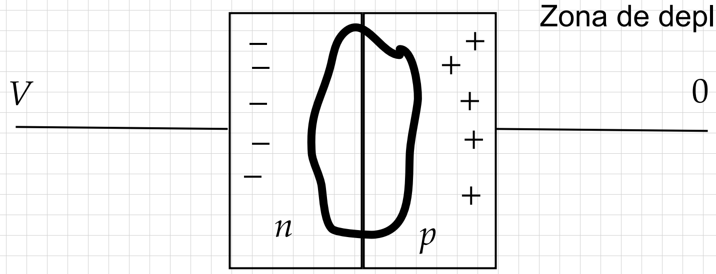
Semicondutores são materias que, em sua forma natural são quase que **isolantes**, mas quando ***contaminados*** (**dopados**) com outros elementos tornam-se relativamente bons condutores.
E isso pode ser feito de forma controlada. Toda a microeletrônica é devido aos semicondutores.
Silício (Si) e Germânio (Ge) são os mais famosos.

Existem dois tipos de dopagens:
o tipo **n** (dopado negativamente, onde há **elétrons livres**) e
o tipo **p** (dopado positivamente, onde há **"buracos" livres**).
Imagine os buracos com se fosse cargas positivas que se movem!



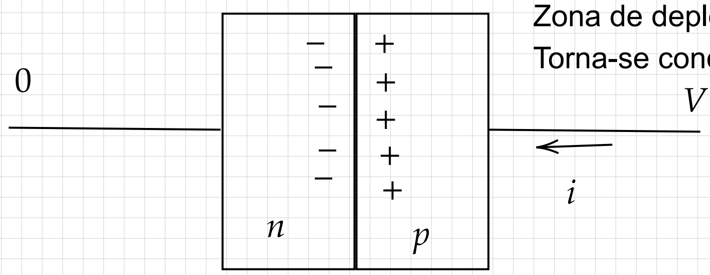
Vamos construir um DIODO. Este é um componente que conduz eletricidade APENAS em uma direção. Este é o componente que aparece na penúltima figura.





Zona de depleção - torna-se isolante!

Zona de depleção desapareçe
Torna-se condutor!



Supercondutores:
São materiais que apresentam resistencia ZERO. $R = 0$.
Normamlente ocorrem a temperaturas baixíssimas (poucos K).
Ressonância magnética usa supercondutores.

Exercícios:
26-1: 1,3,
26-2: 5, 7, 9, **11, **12
26-3: 14, 15, 16, 18, **24, **27
26-4: **37,
26-5: 38, 39, 41, 42, 45, **48, **49, **51