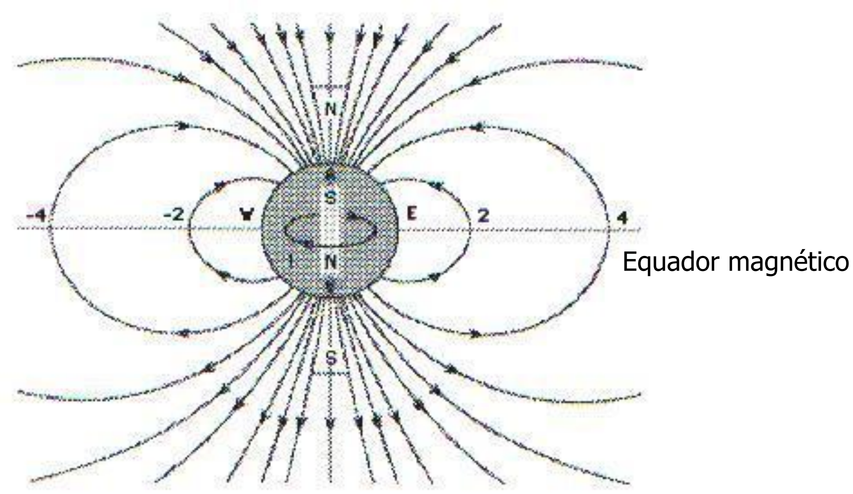
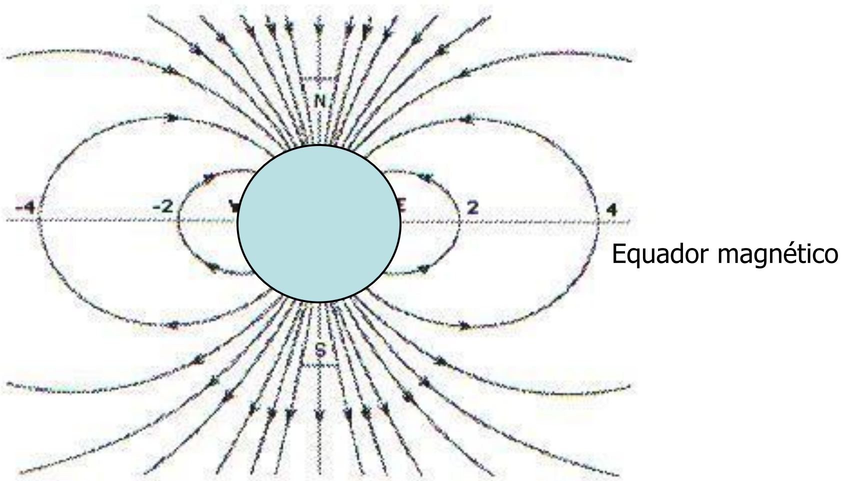
Neste módulo vamos estudar a magnetostática, isto é, as leis que permitem determinar campos magnéticos estáticos.



Linhas de campo magnético da Terra (aproximadamente).

Os fenômenos magnéticos são conhecidos pela humanidade, desde a civilização chinesa, por mais de três mil anos. Foi na Grécia antiga (≈ 2500 anos), na região da Magnésia, que se estabeleceu o termo *magnetita* – hoje conhecido como Fe_3O_4 ; um pedaço de magnetita é um imã permanente que atrai pequenos fragmentos de ferro.

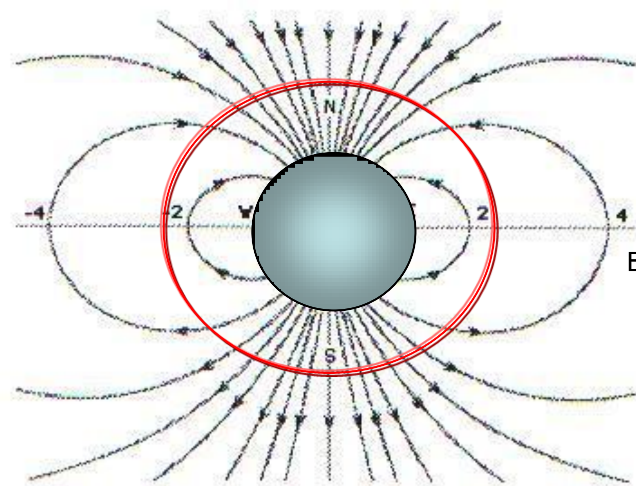
Verifica-se que um imã permanente tem dois pólos: um pólo norte (N) e um pólo sul (S) e é fácil verificar com dois imãs que pólos de mesmo nome (N e N ou S e S) se repelem, e que pólos de nomes contrários se atraem. Verifica-se, também, que estes pólos jamais podem ser separados. Ou seja, um pólo magnético (ou monopolo) isolado jamais foi encontrado, apesar de inúmeras tentativas. A figura ilustra, também, as linhas de campo de uma pequena barra imantada.



Se cobrirmos a região central da figura, o que estas linhas lembram?
As linhas de campo elétrico de um dipolo elétrico!
Na região superior teríamos a carga negativa, com as linhas de campo 'entranto' e na região inferior a carga positiva, com as linhas de campo 'saindo'. A analogia entre cargas e pólos é clara.

Verifica-se que um imã permanente tem dois pólos: um pólo norte (N) e um pólo sul (S) e é fácil verificar com dois imãs que pólos de mesmo nome (N e N ou S e S) se repelem, e que polos de nomes contrários se atraem. Verifica-se, também, que estes pólos jamais podem ser separados. Ou seja, um pólo magnético (ou monopolo) isolado jamais foi encontrado, apesar de inúmeras tentativas. A figura ilustra, também, as linhas de campo de uma pequena barra imantada.

Em particular, se envolvermos a região central com uma superfície esférica, e chamarmos o campo manético de **B**, qual seria o fluxo magnético, Φ_B, através desta superfície? Zero!



Por análogia com o fluxo de campo elétrico, teríamos:

$$\Phi_B = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$

Se cobrirmos a região central da figura, o que estas linhas lembram? As linhas de campo elétrico de um dipolo elétrico!
Na região superior teríamos a carga negativa, com as linhas de campo 'entranto' e na região inferior a carga positiva com as linhas de campo 'saindo'. A analogia entre cargas e pólos é clara.

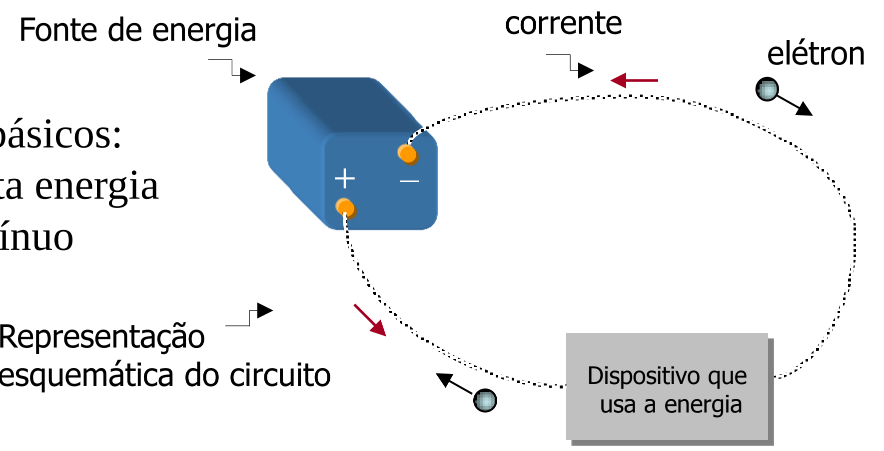
De fato, esta é outra lei fundamental do elétromagnetismo: as linhas de campo magnético são sempre 'fechadas', jamais divergindo em direção ao infinito. Voltaremos ao estudo desta lei adiante.

O que mais produz campo magnético? Verifíca-se que correntes elétricas produzem campos magnéticos. O nosso próximo tópico é justamente uma introdução ao estudo da corrente elétrica.

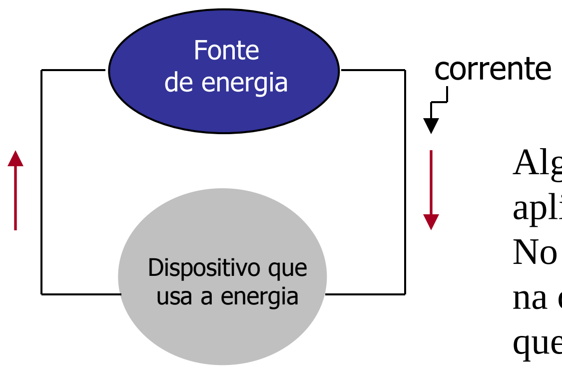
IF – 4300270– Eletricidade e Magnetismo

Introdução aos circuitos elétricos

Um circuito elétrico consiste de três elementos básicos: uma fonte de energia, um dispositivo que usa esta energia e o circuito propriamente, isto é, um trajeto contínuo formado por um dispositivo condutor.



Representação esquemática do circuito



Representação simbólica do circuito

Alguns elétrons no fio condutor movem-se em resposta a um campo elétrico aplicado, deslocando-se rapidamente para anular o campo elétrico aplicado. No entanto, se ‘retirarmos’ os elétrons de uma extremidade e os ‘colocarmos’ na outra, teremos um fluxo contínuo de elétrons – uma corrente elétrica. Note que neste processo os elétrons estão se deslocando estacionariamente; dizemos que temos uma corrente elétrica estacionária. Este é o papel da bateria como fonte de energia. No apêndice 2 estudamos a célula de Weston para entender o que está acontecendo no interior da bateria, onde introduzimos o importante conceito de ***força eletromotriz***.

A corrente elétrica, I, num fio é a razão que a carga elétrica, Q, flui através de qualquer seção transversal do fio.

$$I = \frac{dQ}{dt}$$

A unidade de corrente elétrica é o ampère, A.

$$1\ A = 1\ C/s$$

Exemplo → Quantos elétrons atravessam a secção transversal de um fio com uma corrente de 1 A a cada segundo?

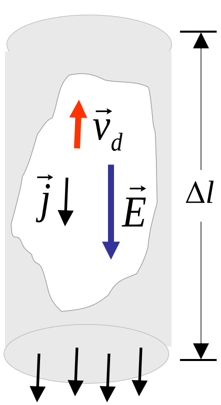
$$1A = 1\frac{C}{s} = \frac{n \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19} C}{s}$$

onde n é o número de elétrons. Portanto:

$$n = \frac{1}{1{,}6 \cdot 10^{-19}} \approx 6{,}2 \cdot 10^{18} elétrons$$

Com este número enorme de elétrons, devemos esperar algum tratamento estatístico para a o processo de condutividade e considerar médias das grandezas envolvidas (da velocidade dos elétrons, por exemplo).

Vejamos um modelo ‘ideal’ da condutividade.



Na figura ao lado representamos um trecho de um fio condutor de tamanho Δl, com um corte para visualizar o que está ocorrendo em seu interior.

$\vec{v}_d$ é a velocidade de deslocamento (já em média)

$\vec{E}$ é o campo elétrico

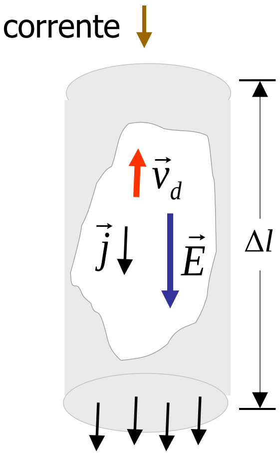
$\vec{j}$ é a densidade de corrente elétrica

Observe que

$$I = \frac{|\Delta Q|}{\Delta t} = \frac{en_e A \Delta l}{\Delta t} = en_e v_d A = jA$$

onde n_e é o número de elétrons por unidade de volume e A é a área da seção transvesrsal do filamento.

IF – 4300270– Eletricidade e Magnetismo



Na figura ao lado representamos um trecho de um fio condutor de tamanho Δl, com um corte para visualizar o que está ocorrendo em seu interior.

$\vec{v}_d$ é a velocidade de deslocamento (já em média)

$\vec{E}$ é o campo elétrico

$\vec{j}$ é a densidade de corrente elétrica

Observe que

$$I = \frac{|\Delta Q|}{\Delta t} = \frac{en_e A \Delta l}{\Delta t} = en_e v_d A = jA$$

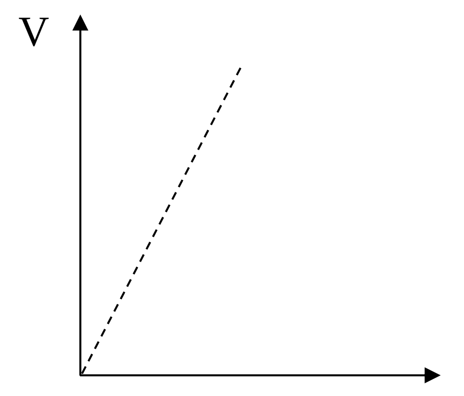
onde n_e é o número de elétrons contidos no trecho e A é a área da seção transvesral do filamento.

Vetorialmente, temos: $\vec{j} = -en_e \vec{v}_d$

Para distribuições de densidade de corrente elétrica arbitrárias, teríamos: $I = \int \vec{j} \cdot d\vec{A}$

Note também que a diferença de potencial elétrico neste trecho é $\Delta V = E\Delta l$

Na aula prática 1, verificamos uma relação linear entre a voltagem aplicada e a corrente produzida, no caso do resistor de carbono. Já no caso de uma lâmpada havia um nítido desvio da relação linear para voltagens mais altas. A relação linear entre a voltagem e a corrente é conhecida como lei de Ohm, embora não seja uma lei no sentido das três leis do eletromagnetismo que já foram estudadas.A não-linearidade é conhecida como ‘desvio da lei de Ohm’.



O coeficiente angular é denominado resistência, R.

Lei de Ohm

$$V = RI$$

A unidade de resistência é o ohm, representado por Ω:

$$1\Omega = \frac{1volt}{1ampère} = 1\frac{V}{A}$$

Aplicando a lei de Ohm para o trecho do filamento estudado teremos:

$$\Delta V = RI$$
$$\Delta V = E\Delta l \quad \rightarrow \quad E\Delta l = RjA \quad \text{ou} \quad j = \sigma E$$
$$I = jA$$

Vetorialmente temos

$$\vec{j} = \sigma\vec{E}$$

onde $\sigma = \dfrac{\Delta l}{RA}$ → condutividade elétrica

O inverso da condutividade é conhecido como resistividade da substância que compõe o condutor e é representada pela letra ρ (não confunda com a densidade volumétrica de carga!):

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{RA}{\Delta l}$$

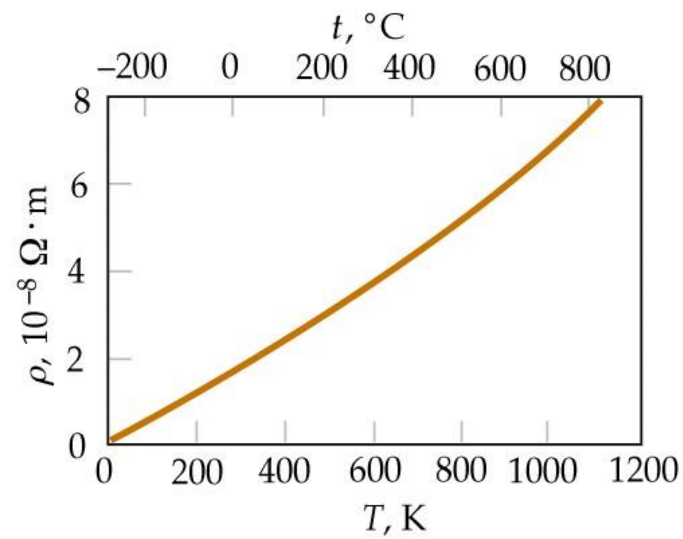
Portanto, podemos escrever:

$$R = \rho\frac{\Delta l}{A}$$

IF – 4300270– Eletricidade e Magnetismo

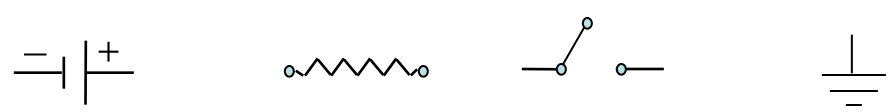
Resistividade elétrica (em ohm · metro) de materiais selecionados

Material	ρ (77K)	ρ (293K)
Metais		
Ag	$0{,}3 \times 10^{-8}$	$1{,}59 \times 10^{-8}$
Al	$0{,}3 \times 10^{-8}$	$2{,}65 \times 10^{-8}$
Au	$0{,}5 \times 10^{-8}$	$2{,}25 \times 10^{-8}$
Cu	$0{,}2 \times 10^{-8}$	$1{,}68 \times 10^{-8}$
Fe	$0{,}66 \times 10^{-8}$	$9{,}61 \times 10^{-8}$
Sn	$2{,}1 \times 10^{-8}$	$11{,}0 \times 10^{-8}$ (273K)
Ni		$6{,}03 \times 10^{-8}$
$Cu_{0,6}Ni_{0,4}$	40×10^{-8}	44×10^{-8}
Semicondutores		
Ge (puro)	10^{14}	0,45
Ge		0,011
Si (puro)	10^{31}	$2{,}2 \times 10^{3}$
Si (10^{-4}% As)	0,1	0,003
GaAs (puro)		$3{,}8 \times 10^{6}$
Isolantes		
Âmbar		5×10^{14}
Vidro		$10^{11} - 10^{14}$
Borracha		$10^{13} - 10^{16}$
Sílica		$7{,}5 \times 10^{17}$



$$\rho = \rho_{20}[1 + \alpha(T - 20°C)]$$

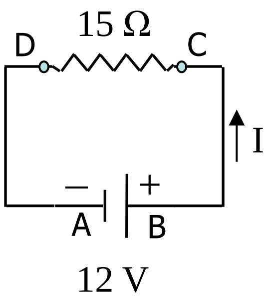
A seguir vamos estudar circuitos elétricos e utilizaremos símbolos (veja o apendice 2):

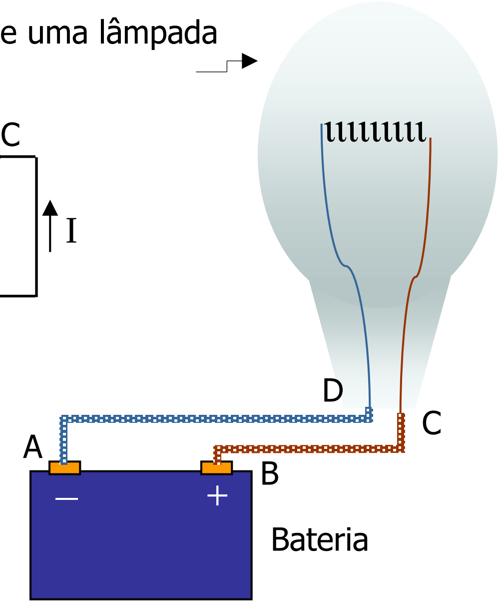


voltagem da fonte | resistor | interruptor | terra

Representação esquemática do bulbo de uma lâmpada

Exemplo → Qual a corrente elétrica que estaria está fluindo no circuito representado na figura? A lâmpada ‘queimaria’ ?





$$I = \frac{V}{R} = \frac{12\text{V}}{15\Omega} = 0{,}8A$$

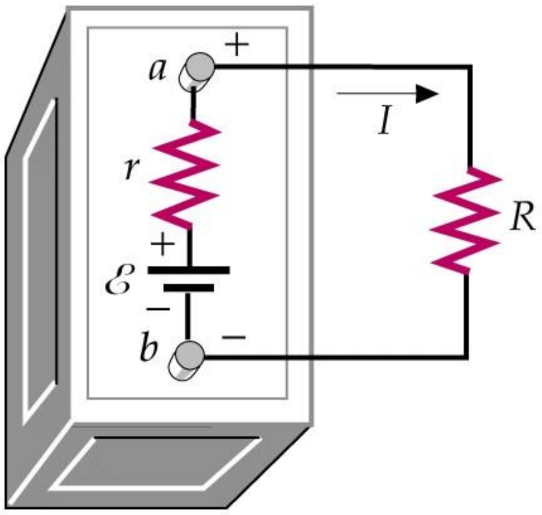
Para respondermos se a lâmpada ‘queimaria’ ou não precisamos entender o que é conhecido como efeito Joule. Ao transportarmos uma quantidade de carga $dq = I\,dt$ através do resistor teremos, mantendo a corrente I, que fornecer uma energia $dU = dqV$. Portanto

$$\frac{dU}{dt} = VI = P$$ → Potência consumida pela lâmpada, cuja unidade é o watt, W. (1 W = 1J/1s)

Usando a lei de Ohm podemos expressar a potência também como: $P = \dfrac{V^2}{R} = I^2 R$

Portanto a resposta depende da especificação da lâmpada. Se for uma lâmpada de automóvel com especificação 12 V e 9,6 W, não queimaria.

Bateria



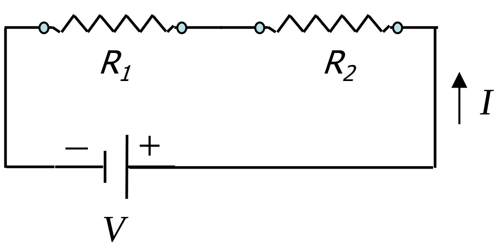
$$V = \mathcal{E} - r \cdot I$$

$\mathcal{E}$ => fem (força eletromotriz)

Bateria como receptor -> $V = \mathcal{E} + r \cdot I$

Circuitos costumam ser constituídos de associações de diversos dispositivos e associações complexas são reduzidas a dois tipos de associações. Vamos ilustrar isto com dois resistores associados em série e em paralelo.

Associação em série



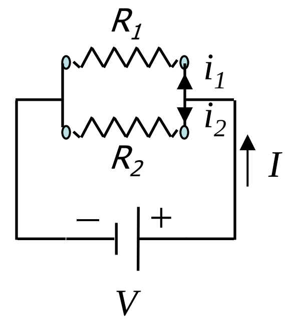
A queda de tensão em cada resistor será $V_1 = R_1 I$ e $V_2 = R_2 I$, pois a mesma corrente atravessa ambos resistores. Por outro lado, a queda de tensão total nos resistores é igual a tensão fornecida pela fonte, V:

$$V = V_1 + V_2 = R_1 I + R_2 I = (R_1 + R_2) I$$

Dizemos que temos um circuito equivalente com um só resistor, cuja resistência vale:

$$R = R_1 + R_2$$

Associação em paralelo



$$I = i_1 + i_2$$

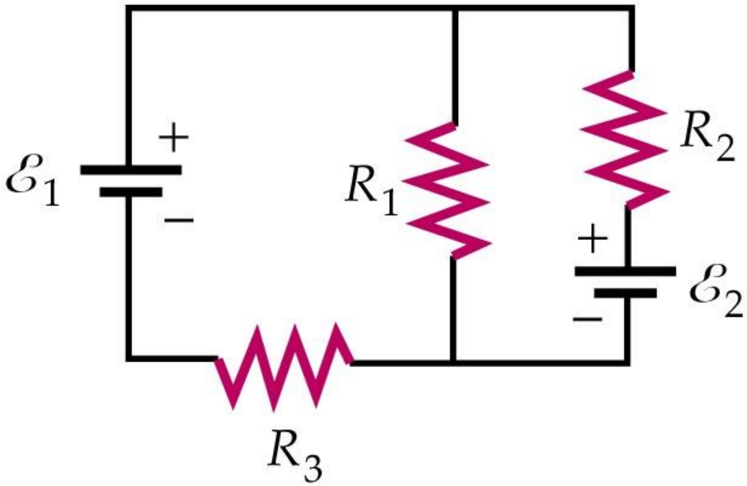
A lei de Ohm pode ser escrita como: $I = \dfrac{V}{R}$
Como a queda de tensão é a mesma em ambos resistores, temos:

$$I = i_1 + i_2 = \frac{V}{R_1} + \frac{V}{R_2} = (\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2})V$$

Dizemos que temos um circuito equivalente com um só resistor, cuja inverso da resistência vale:

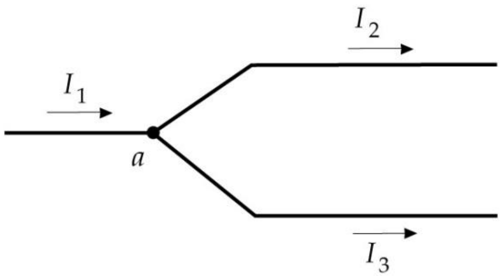
$$\frac{1}{R} = (\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2})$$

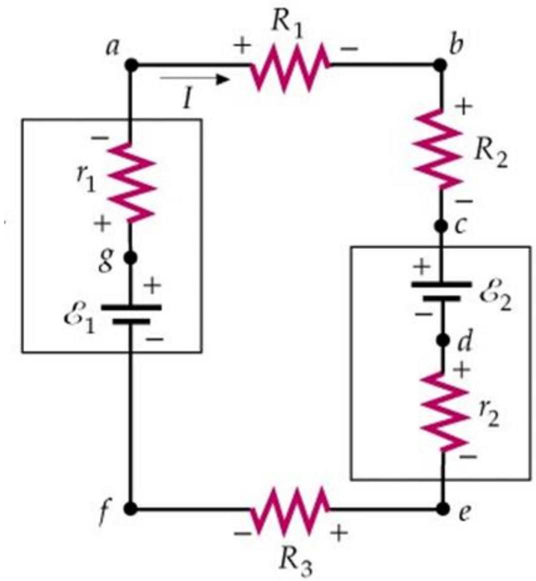
Regras de Kirchoff



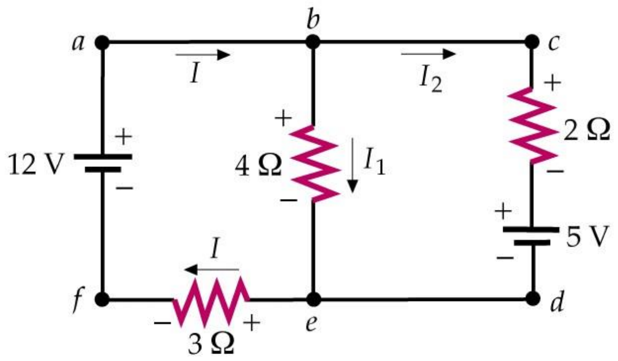
1) Em um nó do circuito (pontos em que correntes se adicionam ou se subtraem), a soma das correntes que chegam é igual a soma das correntes que saem.

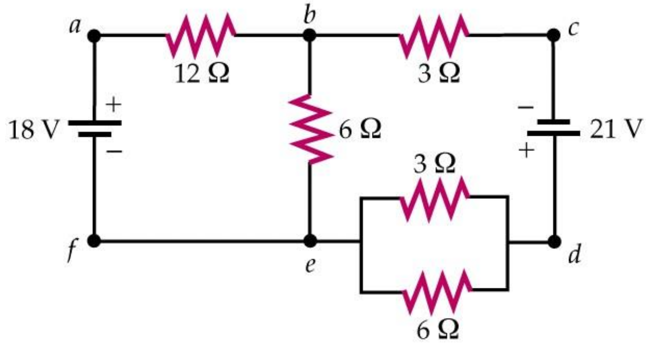
2) A soma algébrica das variações de potencial em uma malha fechada é sempre nula.





Alguns exemplos





Alguns exemplos