

Material Didático

Eletrodinâmica



”Ser um ser humano (ser, ser, ser) e um verdadeiro herói (herói, herói, herói)”

Alisson Ferreira Martins

Físico

2024

”Este material foi desenvolvido para o estudo do Campo Magnético, um componente essencial da Física. As referências são todas do livro Helou et al., 2010: Helou, D., Gualter, J. B., and Newton, V. B. (2010). Tópicos de Física, volume 3. Editora Saraiva, São Paulo, 1ª edição, sendo, portanto, o material desenvolvido com o objetivo de simplificar o conteúdo.”

Sumário

1	Introdução	2
2	Corrente elétrica e resistores	2
2.1	Corrente elétrica	2
2.2	A causa da corrente elétrica	3
2.3	Gerador elétrico	4
2.4	Intensidade de corrente elétrica e seu sentido convectivo	6
2.5	Circuito elétrico	9
2.5.1	Gráfico $i \times t$	9
2.5.2	Classificação das correntes elétricas quanto à forma do gráfico $i \times t$.	10
2.5.3	Corrente contínua constante	10
2.5.4	Corrente contínua pulsante	12
2.5.5	Corrente alternante	12
2.5.6	Frequência da rede elétrica	13
2.6	Continuidade da corrente elétrica	13
3	Efeito Joule	15
3.1	Potência elétrica	15

1 Introdução

A eletrodinâmica estuda as correntes elétricas, causas e os efeitos que produzem os portadores de cargas elétricas livres.

2 Corrente elétrica e resistores

2.1 Corrente elétrica

Corrente elétrica pode ser definida formalmente como:

Corrente elétrica é o movimento ordenado, isto é, com direção e sentido preferenciais, de portadores de carga elétrica

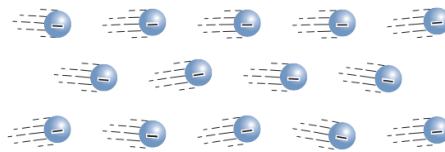


Figura 1: A corrente elétrica é o movimento ordenado de elétrons ou de íons negativos.

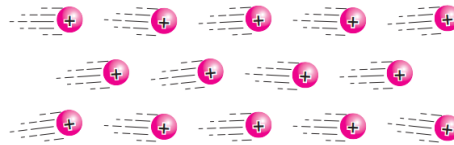


Figura 2: A corrente elétrica é o movimento ordenado de íons positivos.

Para gerar uma corrente elétrica apreciável em um material, este precisa ser um condutor elétrico. Existem três tipos de condutores:

- Os metais e a grafita, em que os portadores móveis de carga elétrica são os elétrons livres;
- As soluções eletrolíticas, em que os portadores móveis são íons positivos e negativos;
- Os gases ionizados, em que os portadores móveis podem ser íons positivos, íons negativos e elétrons livres.

2.2 A causa da corrente elétrica

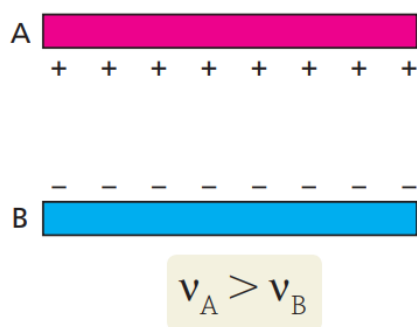


Figura 3: Duas placas metálicas A e B, eletrizadas de modo que o potencial elétrico de A (V_A) seja maior que o de B (V_B).

A e B é ligado por meio de um fio também metálico, após isso, os elétrons livres passam a se deslocar de B para A, ou seja, do potencial menor para o maior. Assim, uma corrente elétrica é gerada no fio.



Figura 4: à medida que saem elétrons de B, o potencial V_B vai crescendo; e a à medida que chegam elétrons em A, o potencial V_A vai diminuindo.

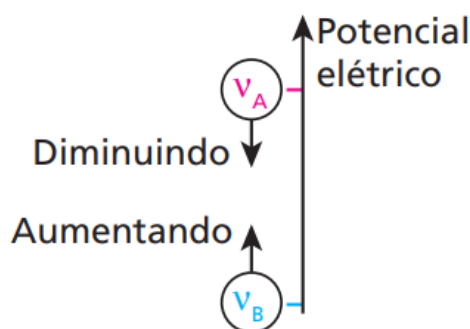


Figura 5: Quando os potenciais V_A e V_B tornam-se iguais, cessa o deslocamento dos elétrons de B para A, cessando, portanto, a corrente elétrica através do fio.

Portanto podemos formalizar o seguinte:

A corrente elétrica é causada por uma diferença de potencial elétrico (ddp) ou tensão elétrica.

A explicação da corrente elétrica pode ser dada também com base no conceito de campo elétrico. Quando o fio é ligado entre as placas A e B, um campo elétrico \vec{E} surge

no interior do fio, orientado do potencial maior para o menor. Como a carga dos elétrons é negativa, surgem neles forças elétrica \vec{F}_e de sentido oposto ao do campo. Dessa forma os elétrons param a se deslocar de B para A, criando-se, então, a corrente elétrica no fio. O fio não está em equilíbrio eletrostático, por isso o campo elétrico em seu interior não é nulo.

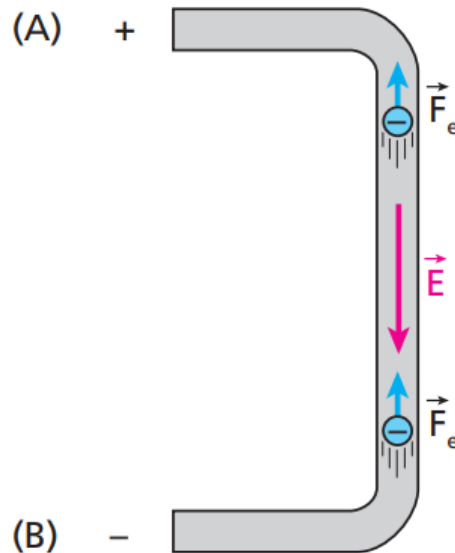


Figura 6: Quando a diferença de potencial U entre A e B se anula, o mesmo acontece com o campo elétrico \vec{E} .

É notório que $E \cdot d = U$ portanto ao se anular o campo, a corrente cessa no condutor.

2.3 Gerador elétrico

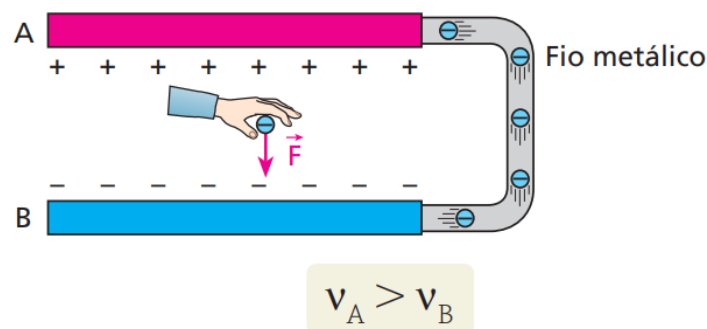


Figura 7: Imagine se todo elétron que chegasse à placa A fosse transportado por alguém até a placa B. Dessa forma, os potenciais elétricos das placas A e B nunca se igualariam e a corrente elétrica no fio seria mantida. Esse agente transportador de elétrons de A para B exerceria neles uma força \vec{F} , e essa força realizaria um trabalho. Nesse transportante haveria um fornecimento de energia aos elétrons.

A energia potencial eletrostática E_p de uma partícula eletrizada com carga elétrica q , situada em uma posição em que o potencial elétrico é v , é denotada por:

$$E_p = qV$$

Para o caso de elétrons, q é negativa, então quando os elétrons vão da placa B para a placa A ($V_A > V_B$), eles perdem energia potencial elétrica; e quando o agente transportador os leva de volta para a placa B, eles ganham energia potencial elétrica: o agente citado repõe nos elétrons a energia potencial elétrica que perderam. Na verdade quem faz essa reposição de energia potencial elétrica não é um agente imaginário, mas um dispositivo denominado gerador elétrico. O gerador deve dispor de alguma modalidade de energia e transformá-la em energia potencial elétrica.

Pilhas, baterias de automóveis, convertem energia química em energia potencial elétrica.

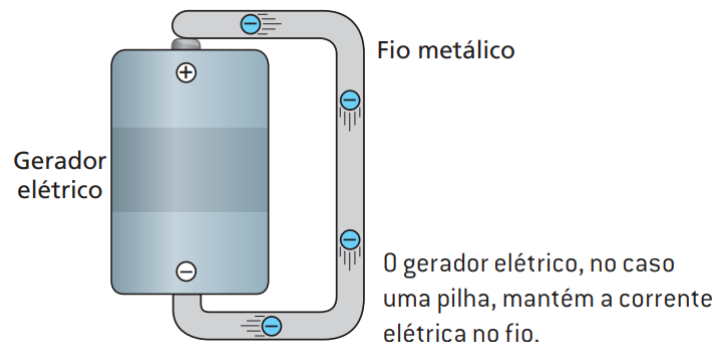


Figura 8: Substituindo as placas A e B por um gerador elétrico, podemos manter a corrente no fio metálico, já que esse gerador mantém uma diferença de potencial entre seus terminais. O gerador possui dois terminais, o terminal de potencial mais alto é denominado polo positivo (+) e o de potencial mais baixo, polo negativo (-).



Figura 9: As indicações dos polos positivo e negativo de uma pilha comum. Observe também a inscrição 1,5 V. Ela significa que existe uma diferença de potencial igual a 1,5 V entre os dois polos: o potencial do polo positivo está 1,5 V acima do potencial do polo negativo.

2.4 Intensidade de corrente elétrica e seu sentido convectivo

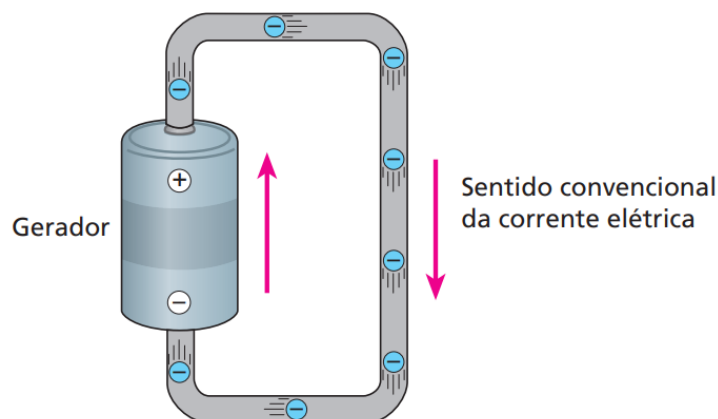


Figura 10: É convencional orientar a corrente elétrica, externamente ao gerador, no sentido dos potenciais decrescentes, ou seja, do polo positivo para o negativo. Esse sentido convencional é oposto ao movimento dos elétrons livres.

O sentido da corrente elétrica é, por convenção, oposto ao sentido preferencial em que se movem os portadores de carga elétrica negativa.

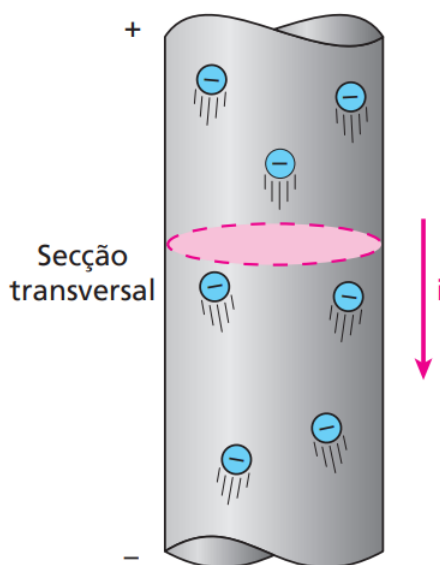


Figura 11: Ampliação de um pedaço do fio. Secção transversal do fio, essa secção pode ser considerada em qualquer posição

Durante certo intervalo de tempo Δt , passa, pela seção considerada, um número n de elétrons, que totalizam uma carga Q negativa de módulo $|Q| = ne$, em que e é a carga elétrica elementar ($e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$). Podemos formalizar matematicamente:

A intensidade média de corrente elétrica através da seção considerada é o quociente do módulo da carga elétrica que atravessa a seção pelo intervalo de tempo em que isso ocorre.

Assim:

$$i_m = \frac{|Q|}{\Delta t}, \quad \text{com} \quad |Q| = ne.$$

Se em intervalos de tempo arbitrariamente pequenos e iguais, a quantidade de carga que atravessa a seção transversal for sempre a mesma, teremos uma corrente de intensidade constante. Nesse caso a intensidade média de corrente i_m , em um intervalo de tempo qualquer, coincidirá com a intensidade instantânea de corrente i em qualquer instante, portanto

$$i = \frac{|Q|}{\Delta t}$$

No SI, a unidade de medida da intensidade de corrente elétrica é o ampère (símbolo: A), nome dado em homenagem ao físico francês André Marie Ampère (1775-1836).



Figura 12: **André Marie Ampère**. Grande físico e matemático francês, um dos fundadores da Eletrodinâmica e do Eletromagnetismo. Dentre outras contribuições, foi o introdutor do conceito de corrente elétrica e o elaborador da primeira teoria explicativa das propriedades magnéticas dos materiais. Foi ele quem construiu o primeiro eletroímã, o que possibilitou a invenção de muitos aparelhos, por exemplo, a campainha elétrica e os relés.

Alguns submúltiplos da unidade ampère costumam aparecer com frequência:

- **mA** = 10^{-3} A (miliampère)
- **μA** = 10^{-6} A (microampère)
- **nA** = 10^{-9} A (nanoampère)
- **pA** = 10^{-12} A (picoampère)

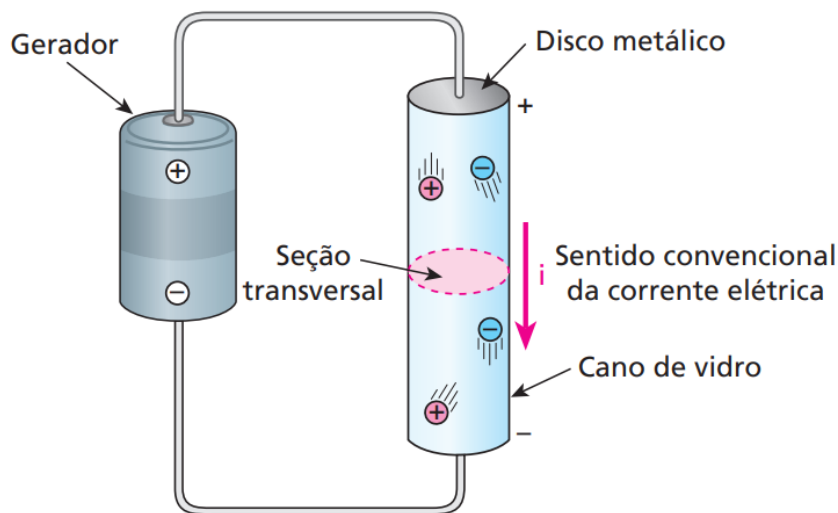


Figura 13: Cano de vidro com solução aquosa de NaCl (cloreto de sódio, ou em linguagem comum, sal de cozinha). As extremidades desse cano estão fechadas por discos metálicos que são ligados aos terminais de uma pilha por meio de fios também metálicos.

Quando o NaCl é dissolvido em água, aparecem na solução muitos íons livres positivos e negativos. Os íons positivos deslocam-se no sentido dos potenciais decrescentes; e os negativos, no sentido dos potenciais crescentes.

O sentido convencionado para a corrente elétrica coincide com o sentido do movimento das cargas positivas, mas opõe-se ao sentido do movimento das cargas negativas.

Com relação à intensidade de corrente na solução, observe que, durante um intervalo de tempo Δt , passa por uma seção transversal do cano um certo número de íons positivos (totalizando uma carga positiva Q_+) e um certo número de íons negativos (totalizando uma carga negativa Q_-). Portanto

$$|Q| = |Q_+| + |Q_-|$$

A intensidade média de corrente elétrica através da seção continua como:

$$i_m = \frac{|Q|}{\Delta t}$$

2.5 Circuito elétrico

O caminho onde se é estabelecido uma corrente elétrica é chamado de circuito elétrico. A parte do circuito elétrico situada fora do gerador é chamada de circuito externo.

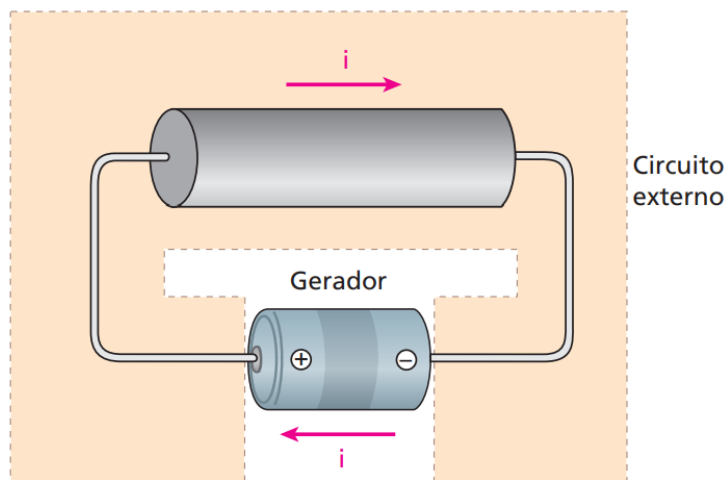


Figura 14: Qualquer que seja o condutor ligado ao gerador, a corrente no circuito externo flui do polo positivo (+) para o negativo (-). Consequentemente, no gerador, a corrente flui do polo negativo para o positivo

2.5.1 Gráfico $i \times t$

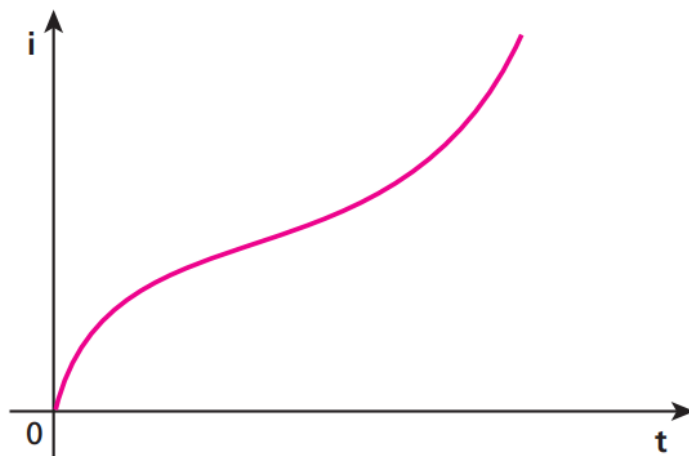


Figura 15: Representação gráfica da intensidade i de uma corrente elétrica qualquer em função do tempo t .

A “área” compreendida entre o gráfico e o eixo dos tempos, calculada em certo intervalo de tempo Δt , fornece o módulo da carga elétrica que atravessou uma seção transversal do condutor no citado intervalo.

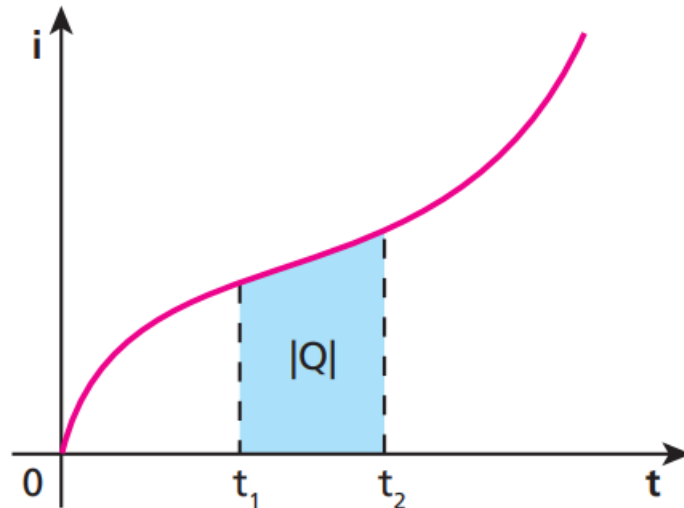


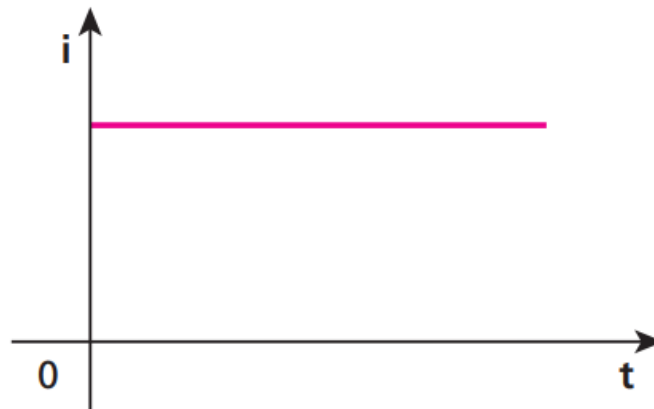
Figura 16: No gráfico $i \times t$, tem-se: “área” = $|Q|$

2.5.2 Classificação das correntes elétricas quanto à forma do gráfico $i \times t$

No gráfico $i \times t$, quando a corrente inverte seu sentido, convencionam-se considerá-la positiva em um sentido e negativa no sentido contrário. Quando usamos essa convenção, devemos chamar i de *valor algébrico da corrente elétrica*, em vez de intensidade.

Quanto à forma do gráfico $i \times t$, as correntes classificam-se em **contínuas** e **alternantes** (ou **alternadas**).

2.5.3 Corrente contínua constante



Corrente contínua constante.

Figura 17: Uma corrente elétrica é **contínua constante** quando mantém intensidade e sentido constantes no decorrer do tempo. Seu gráfico $i \times t$ é um segmento de reta paralelo ao eixo dos tempos.

No caso de corrente contínua constante, sua *intensidade média* coincide com a *intensidade instantânea*.

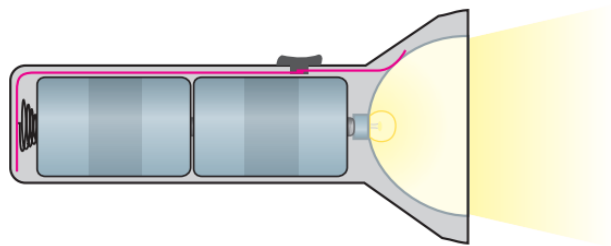


Figura 18: Lanterna a pilha: após ser ligada, a corrente elétrica no circuito assume uma intensidade praticamente constante com o tempo (evidentemente, não por muito tempo).



Figura 19: Bateria de telefone celular sendo carregada. O aparelho ligado na tomada é alimentado por corrente alternada. Entretanto, a corrente que ele estabelece no carregador é contínua constante. Esse processo, usado em muitos outros aparelhos, é comumente chamado de “eliminador de pilhas”.

2.5.4 Corrente contínua pulsante

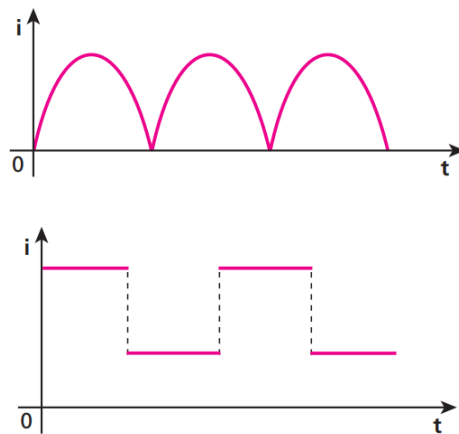
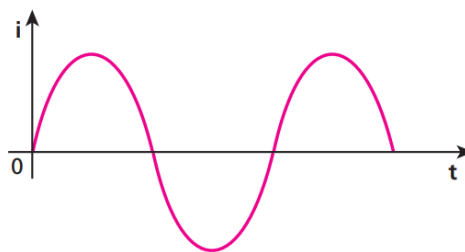


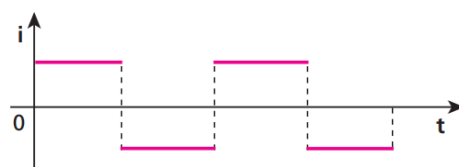
Figura 20: Corrente Contínua pulsante é a corrente cuja intensidade passa, em geral periodicamente, por máximos e mínimos, embora tenha sentido constante.

2.5.5 Corrente alternante



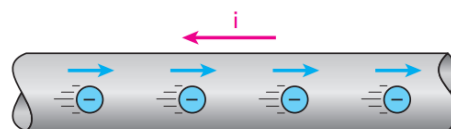
Exemplo de corrente alternante.

Figura 21: É chamada alternante ou alternada a corrente cujo sentido se inverte, em geral, periodicamente.



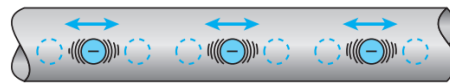
Exemplo de corrente alternante.

Em um condutor metálico percorrido por corrente contínua, o movimento ordenado dos elétrons livres ocorre sempre no mesmo sentido.



Corrente contínua.

Caso o condutor seja percorrido por corrente alternante, esses elétrons simplesmente oscilam em torno de determinadas posições, executando movimentos de vaivém.



Corrente alternante.

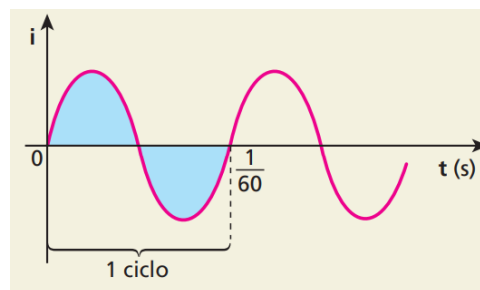
A corrente que se estabelece em uma rede elétrica residencial quando algum aparelho é ligado a ela é alternante.



Figura 22: A corrente elétrica em cabos de alta tensão geralmente é alternante.

2.5.6 Frequência da rede elétrica

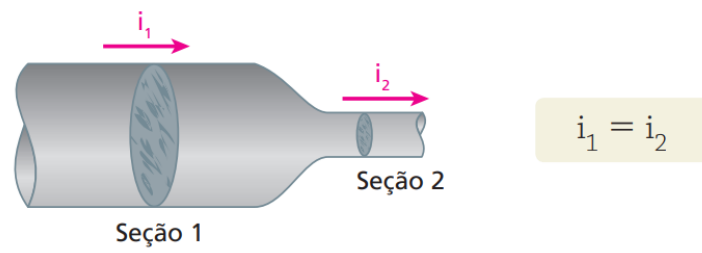
Provavelmente você tem a informação de que a rede elétrica no Brasil é de 60 Hz (sessenta hertz). Isso significa que, por exemplo, em um chuveiro elétrico ligado, o valor algébrico da corrente estabelecida varia com o tempo conforme um gráfico do tipo:



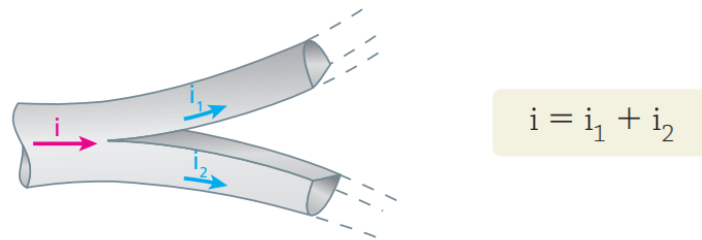
Note que uma variação completa de i , ou seja, um ciclo, dura $\frac{1}{60}$ s. Assim, ocorrem 60 ciclos em cada segundo. Dizemos, então, que a frequência da rede elétrica é igual a 60 ciclos/segundo ou 60 Hz.

2.6 Continuidade da corrente elétrica

Em um condutor, a intensidade elétrica é a mesma em qualquer seção, ainda que ele tenha seção transversal variável. A isso damos o nome de continuidade da corrente elétrica.

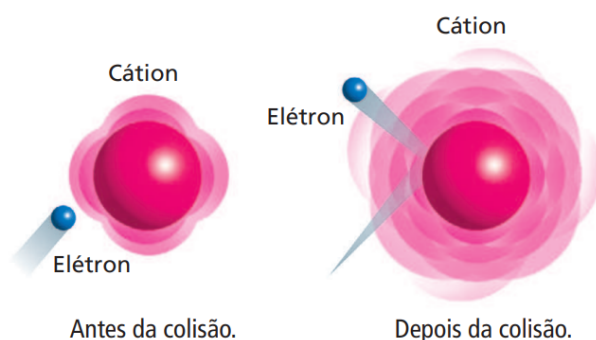


Como consequência, se no “caminho” da corrente elétrica ocorrer uma bifurcação, a soma das correntes nas derivações será igual à corrente total, isto é, àquela anterior à bifurcação.



3 Efeito Joule

Quando um fio condutor, de cobre, por exemplo, é ligado a um gerador, ele se submete a uma diferença de potencial, e um campo elétrico se estabelece em seu interior. As forças elétricas devidas a esse campo aceleram os elétrons livres em um determinado sentido, fazendo com que eles ganhem velocidade nesse mesmo sentido. Acontece que, logo em seguida, esses elétrons colidem com cátions do retículo cristalino do metal e perdem velocidade. Entretanto, como as forças elétricas continuam atuando, os elétrons livres ganham novamente velocidade naquele sentido; em seguida, colidem com outros cátions, e assim sucessivamente. Portanto, o condutor permite que os elétrons livres se movam através dele, mas oferece grande resistência a esse movimento. Ao serem bombardeados pelos elétrons livres, os cátions do metal passam a oscilar com amplitudes maiores, o que se traduz em uma elevação da temperatura do fio.



Entre duas colisões a velocidade típica dos elétrons é de 10^6 m/s. Entretanto, o movimento da nuvem de elétrons livres é tão dificultado pela presença dos cátions que ele se dá com velocidade muito baixa, tipicamente da ordem de décimos de milímetro por segundo (10^{-4} m/s)! Como essa velocidade é atingida imediatamente após a ligação do fio ao gerador e se mantém estável, toda energia potencial elétrica perdida pelos elétrons livres é convertida em energia térmica: dizemos que a energia potencial elétrica é dissipada no condutor. Essa transformação de energia potencial elétrica em energia térmica recebe o nome de efeito Joule ou efeito térmico.

3.1 Potência elétrica

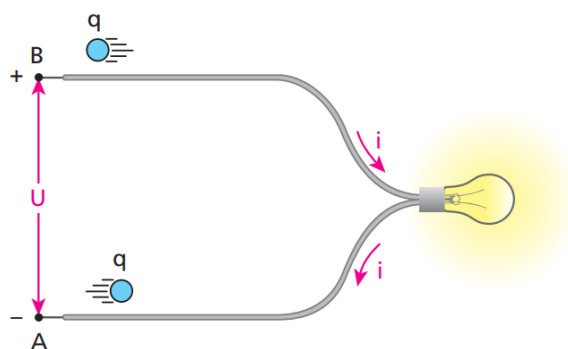


Figura 23: Lâmpada ligada a um gerador, submetendo-se a uma diferença de potencial U , suposta constante, e sendo percorrida por uma corrente elétrica de intensidade i .

Durante um intervalo de tempo Δt , essa lâmpada recebe uma quantidade de energia térmica E , equivalente à energia potencial elétrica perdida por uma carga q que passou por ela. A potência recebida pela lâmpada é dada por:

$$Pot = \frac{E}{\Delta t}$$

A energia é medida em **J** (Joule) e o intervalo de tempo, em **s** (segundo) no SI. Assim, a potência é medida na unidade J/s , denominada **watt** (W).

$$1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$$

A energia E recebida pela lâmpada no intervalo de tempo Δt é a diferença entre a energia potencial elétrica que a carga q tem em A (E_{pA}) e a que ela tem em B (E_{pB}):

$$E = E_{pA} - E_{pB}$$

Como $E_p = qV$, temos:

$$E = qV_A - qV_B = q(V_A - V_B)$$

Sendo q e $(V_A - V_B)$ quantidades negativas, o produto delas é positivo. Podemos reescrever como:

$$E = |q| \cdot |V_A - V_B|$$

Representando por U o módulo da diferença de potencial entre os pontos A e B, a energia E fica então:

$$E = |q| U$$

Relembrando que $Pot = \frac{E}{\Delta t}$ e $i = \frac{|q|}{\Delta t}$, reorganizando obtemos

$$Pot = \frac{E}{\Delta t} = \frac{|q| U}{\Delta t} = U i$$

$$\boxed{Pot = U i}$$

Nota

- No caso em que a potência for variável, mesmo com U constante, seu cálculo em um intervalo de tempo Δt fornecerá uma potência média:

$$Pot_m = \frac{E}{\Delta t} \quad \text{e} \quad Pot_m = U i_m$$

- Para simplificar a linguagem, frequentemente escrevemos a energia elétrica em vez de energia potencial elétrica.