

Conceitos Básicos de Eletricidade com Vistas a Instalações

1

1.1 CONSTITUIÇÃO DA MATÉRIA

A compreensão dos fenômenos elétricos supõe um conhecimento básico da estrutura da matéria, cujas noções fundamentais serão resumidas a seguir.

Toda matéria, qualquer que seja seu estado físico, é formada por partículas denominadas **moléculas**. As moléculas são constituídas por combinações de tipos diferentes de partículas extremamente pequenas, que são os átomos. Quando determinada matéria é composta de átomos iguais é denominada **elemento químico**. É o caso, por exemplo, do oxigênio, hidrogênio, ferro etc., que são alguns dos elementos que existem na natureza. A molécula da água (Fig. 1.1), como sabemos, é uma combinação de dois átomos de hidrogênio e um de oxigênio.

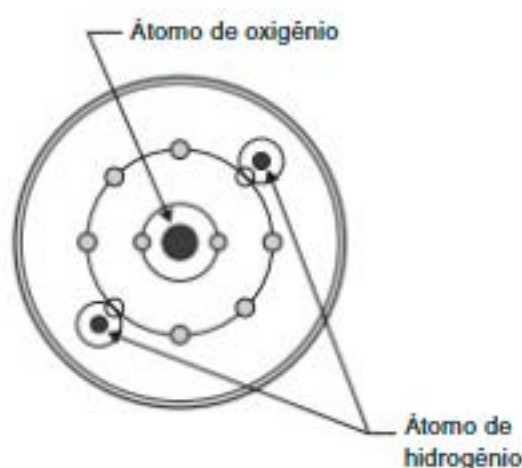


Figura 1.1 Molécula da água.

Os átomos são constituídos por partículas extraordinariamente pequenas, das quais as mais diretamente relacionadas com os fenômenos elétricos básicos são as seguintes:

- **prótons**, que possuem carga elétrica positiva;
- **elétrons**, possuidores de carga negativa;
- **nêutrons**, que são eletricamente neutros.

Uma teoria bem fundamentada afirma que a estrutura do átomo tem certa semelhança com a do sistema solar. O **núcleo**, em sua analogia com o sol, é formado por **prótons** e **nêutrons**, e em torno deste núcleo giram, com grande velocidade, elétrons planetários. Tais elétrons são numericamente iguais aos prótons, e este número influi nas características do elemento químico.



Figura 1.2 Átomo com duas camadas de elétrons.

Os elétrons, que giram segundo órbitas mais exteriores, são atraídos pelo núcleo com uma força de atração menor do que a exercida sobre os elétrons das órbitas mais próximas do núcleo. Como os elétrons mais exteriores podem ser retirados de suas órbitas com certa facilidade, são denominados **elétrons livres** (Fig. 1.2).

O acúmulo de elétrons em um corpo caracteriza a sua **carga elétrica**. Apesar de o número de elétrons livres constituir uma pequena parte do número de elétrons presentes na matéria, eles são, todavia, numerosos. O movimento desses elétrons livres se realiza com uma velocidade da ordem de 300 000 km/s e se denomina “corrente elétrica”.

Em certas substâncias, a atração que o núcleo exerce sobre os elétrons é pequena; estes elétrons têm maior facilidade de se libertar e deslocar. É o que ocorre nos metais como a prata, o cobre, o alumínio etc., denominados, por isso, **condutores elétricos**. Quando, ao contrário, os elétrons externos se acham submetidos a forças interiores de atração que dificultam consideravelmente sua libertação, as substâncias em que isso ocorre são denominadas **isolantes elétricos**. É o caso do vidro, das cerâmicas, dos plásticos etc. Pode-se dizer que um **condutor elétrico** é um material que oferece pequena resistência à passagem dos elétrons, e um **isolante elétrico** é o que oferece resistência elevada à corrente elétrica.

Assim como em hidráulica, a unidade de volume de líquido é o m^3 ; em eletricidade prática exprime-se a “quantidade” de eletricidade em **coulombs**.^{*} Um coulomb corresponde a $6,28 \times 10^{18}$ elétrons.

1.2 GRANDEZAS ELÉTRICAS

1.2.1 Potencial Elétrico

Quando, entre dois pontos de um condutor, existe uma diferença entre as concentrações de elétrons, isto é, de carga elétrica, diz-se que existe um **potencial elétrico** ou uma **tensão elétrica** entre esses dois pontos.

Consideremos o gerador do circuito da Fig. 1.3. A ação da f.e.m. interna do gerador obriga as cargas positivas a se concentrarem no terminal positivo e os elétrons ou cargas negativas a se reunirem no terminal negativo. Dessa forma, cria-se uma pequena diferença de potencial energético (d.d.p.) entre estes terminais, que estabelecerá um deslocamento dos elétrons entre o terminal negativo e o positivo. Esse deslocamento de elétrons deve-se à ação de uma força chamada **força eletromotriz (f.e.m.)**. Se estabelecermos um circuito fechado, ligando um terminal ao outro por um condutor, a tensão a que os elétrons livres estão submetidos faz com que se desloquem ao longo do condutor, estabelecendo-se assim uma **corrente elétrica**, cujo sentido é definido por convenção (do polo positivo [+] para o polo negativo [–], no circuito externo), como se vê na Fig. 1.3, embora se saiba que o sentido real da corrente é do polo negativo para o polo positivo.

Se em vez de uma pilha ou bateria tivermos um **gerador elétrico rotativo**, realizar-se-á fenômeno semelhante. Desenvolve-se no gerador uma tensão interna do polo negativo (–) para o positivo (+), que é a força eletromotriz, graças à qual o gerador fornece corrente a um condutor ligado aos seus terminais, orientada do polo negativo (–) para o polo positivo (+).

A tensão é medida em **volts**, cuja definição será apresentada mais adiante e determinada com o voltímetro.

Convenciona-se empregar as letras **E** para designar a f.e.m. gerada ou induzida nos terminais de um gerador ou bateria. Usa-se, em geral, a letra **U** para representar a tensão ou diferença de potencial entre dois pontos de um circuito pelo qual a corrente passa. Uma parte da f.e.m. é aplicada em vencer a resistência interna do próprio gerador quando fornece a corrente. Essa perda interna é a diferença entre **E** e **U**, como será visto no item 1.2.2.

^{*} COULOMB, Charles de — físico francês (1736-1806).

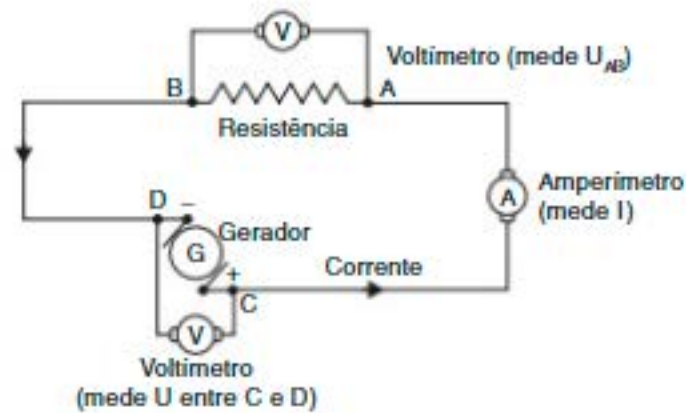


Figura 1.3 Circuito elétrico com resistência ôhmica.

1.2.2 Intensidade da Corrente Elétrica

Os elétrons livres dos átomos de uma certa substância normalmente se deslocariam em todas as direções. Quando, em um condutor, o movimento de deslocamento de elétrons livres é mais intenso em um determinado sentido, diz-se que existe uma *corrente elétrica* ou um *fluxo elétrico* no condutor. A *intensidade* (I) da corrente é caracterizada pelo número de elétrons livres (Q) que atravessa uma determinada seção do condutor na unidade de tempo (t). A

unidade de intensidade da corrente elétrica é o *ampère**, de tal forma que: $I = \frac{Q}{t}$.

Ampère (A) é a corrente elétrica invariável que, mantida em dois condutores retilíneos, paralelos, de comprimento infinito e de área de seção transversal desprezível e situados no vácuo a 1 metro de distância um do outro, produz entre esses condutores uma força igual a 2×10^{-7} newtons** por metro de comprimento desses condutores (Inmetro — Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade).

A medição da intensidade da corrente efetua-se com o auxílio de um *amperímetro*, ligado em *série* no circuito. Define-se, na prática, o ampère como a intensidade de escoamento de 1 coulomb em 1 segundo. Por analogia, a corrente elétrica se assemelha à *vazão* em hidráulica, expressa em m³/s, por exemplo.

1.2.3 Resistência Elétrica

Existe uma força de atração entre os elétrons e os respectivos núcleos atômicos e que resiste à liberação dos elétrons para o estabelecimento da corrente elétrica. Abreviadamente, designa-se essa oposição ao fluxo da corrente como *resistência*. Nos materiais ditos *condutores*, a corrente elétrica circula facilmente, porque a resistência que neles se verifica é pequena. Nos materiais isolantes, ocorre o contrário.

A unidade de resistência elétrica é o *ohm* (Ω),*** que corresponde à resistência de um fio de mercúrio a 0 °C, com um comprimento de 1,063 m e uma seção de 1 mm². Equivale à resistência elétrica de um elemento de circuito tal que uma diferença de potencial constante, igual a 1 volt, aplicada aos seus terminais, faz circular nesse elemento uma corrente invariável de 1 ampère.

$$1 \Omega = \frac{1 \text{ V}}{1 \text{ A}}$$

A resistência de um condutor depende de quatro fatores: material, comprimento, área da seção e temperatura.

A *resistividade* ou *resistência específica* de um material homogêneo e isotrópico é tal que um cubo com 1 metro de aresta apresenta uma resistência elétrica de 1 ohm entre faces opostas. Seu símbolo é o ρ (rô). O Inmetro indica como unidade de resistividade o *ohm $\times$ metro* ($\Omega \times \text{m}$).

A resistência de um *condutor* de seção uniforme, expressa em ohms, é dada por:

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

sendo:

l — comprimento do condutor (m)

S — seção reta do condutor (m²)

ρ — resistividade do condutor ($\Omega \times \text{m}$)

* AMPÈRE, André Marie — físico e matemático francês (1775-1836).

** NEWTON, Sir Isaac — cientista e matemático inglês (1642-1727).

*** OHM, Georg Simon — físico alemão (1787-1854).

Pode-se usar a fórmula com:

S em mm^2 ; ρ em $\Omega \times \text{mm}^2/\text{m}$

Valores da resistividade ρ a 15°C

Cobre — $0,0178 \Omega \times \text{mm}^2/\text{m}$, ou $\frac{1}{56} \Omega \times \text{mm}^2/\text{m}$

Alumínio — $0,028 \Omega \times \text{mm}^2/\text{m}$

Prata-liga — $0,300 \Omega \times \text{mm}^2/\text{m}$

Denominam-se **resistores** os elementos de circuito elétrico que se caracterizam por sua *resistência*.

EXEMPLO 1.1

Calcular a resistência de um condutor de cobre a 15°C , sabendo-se que sua seção é de 3 mm^2 e que seu comprimento é de 200 m .

Solução

Para o cobre, $\rho = 0,0178 \Omega \times \text{mm}^2/\text{m}$.

A resistência é dada por:

$$R = \rho \frac{l}{S} \therefore R = \rho \left[\Omega \times \frac{\text{mm}^2}{\text{m}} \right], \text{ sendo } l (\text{m}) \text{ e } S (\text{mm}^2);$$

portanto,

$$R = \frac{0,0178 \times 200}{3} = 1,186 \text{ ohm}$$

Variação de resistência com a temperatura

A resistência do condutor depende da temperatura a que ele se acha submetido.

Denomina-se **coeficiente de temperatura** (α) a variação da resistência de um condutor, quando a temperatura varia de 1°C .

Para o cobre, $\alpha = 0,0039^\circ\text{C}^{-1}$ a 0°C e $0,004^\circ\text{C}^{-1}$ a 20°C .

Para o alumínio, $\alpha = 0,0038^\circ\text{C}^{-1}$ a 20°C .

A variação de resistência com a temperatura é expressa por:

$$R_t = R_0 (1 + \alpha t)$$

sendo:

R_0 — resistência a 0°C (Ω)

R_t — resistência a uma temperatura de $t^\circ\text{C}$ (Ω)

Se a temperatura variar de t_1 para t_2 , a resistência variará do valor R_0 para o valor R_t , segundo a expressão:

$$R_t = R_0 [1 + \alpha (t_2 - t_1)]$$

EXEMPLO 1.2

Um condutor de cobre tem uma resistência de 120Ω a 20°C . Qual será sua resistência se a temperatura for de 50°C ?

Dado: $\alpha_{\text{cobre}} = 0,004^\circ\text{C}^{-1}$ a 20°C

Solução

$$R_t = R_0 [1 + \alpha (t_2 - t_1)]$$

$$R_{50} = 120 [1 + 0,004 (50 - 20)] = 134,4 \text{ ohms}$$

1.2.4 Lei de Ohm

A intensidade da corrente I que percorre um condutor é diretamente proporcional à f.e.m. E , que a produz, e inversamente proporcional à **resistência** R do condutor, isto é:

$$I = \frac{E}{R}$$

em que:

I — intensidade da corrente (A)

E — tensão ou f.e.m. (V)

R — resistência (Ω)

A lei de Ohm é aplicável, sob esta forma simples, para:

- a) circuitos de corrente contínua contendo apenas uma f.e.m.;
- b) condutores ou resistências de corrente contínua;
- c) *qualquer circuito contendo apenas resistências.*

Para circuitos envolvendo elementos mais complexos que serão vistos adiante, a lei de Ohm não se aplica sob essa forma simples.

EXEMPLO 1.3

Qual a resistência da lâmpada incandescente ligada a um circuito de 120 V, sabendo-se que o amperímetro indica 0,5 A e que a resistência dos fios é desprezível?

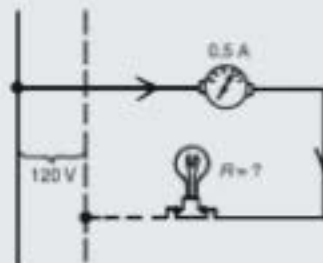


Figura 1.4 Esquema do circuito elétrico, indicando a resistência a ser determinada.

Solução

A diferença de potencial existente entre os parafusos do soquete da lâmpada é de 120 V, de modo que temos:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{120}{0,5} = 240 \, \Omega$$

1.2.5 Potência Elétrica

A **potência** é definida como o trabalho efetuado na unidade de tempo. Assim como a potência hidráulica é dada pelo produto do desnível energético pela vazão, a potência elétrica, para um circuito puramente resistivo, é obtida pelo produto da **tensão** U pela **intensidade da corrente** I :

$$P = U \times I$$

A unidade de potência é o **watt** (W), sendo $1 \text{ kW} = 1\,000 \text{ W}$.

Pela lei de Ohm, sabemos que:

$$U = R \times I$$

de modo que podemos escrever:

$$P = R \times I^2$$

e

$$R = \frac{U}{I}, \text{ sendo } P = U \times I \text{ e } I = \frac{P}{U}; \text{ logo, } R = \frac{U^2}{P}.$$

EXEMPLO 1.4

Um chuveiro elétrico indica na plaqueta 3 000 W e 220 V. Quais os valores da corrente que ele absorve e da resistência do mesmo?

Solução

$$I = \frac{P}{U} = \frac{3\,000}{220} = 13,6 \text{ A}$$

e

$$R = \frac{U^2}{P} = \frac{220^2}{3\,000} = 16,1 \, \Omega$$

1.2.6 Energia e Trabalho

A energia consumida, ou o trabalho elétrico T efetuado, é dada pelo produto da potência P pelo tempo t , durante o qual o fenômeno elétrico ocorre. As fórmulas que permitem calcular este valor são:

$$T = P \times t = \text{watt} \times \text{hora (Wh)}$$

ou

$$T = U \times I \times t = \text{watt} \times \text{hora (Wh)}$$

$$T = \frac{R \times I^2 \times t}{1\,000} = \text{quilowatt} \times \text{hora (kWh)}$$

$$T = \frac{U \times I \times t}{1\,000} = \text{quilowatt} \times \text{hora (kWh)}$$

O consumo de energia é medido em **kWh** pelos aparelhos das empresas concessionárias, e a tarifa é cobrada em termos de consumo, expresso na mesma unidade.

1.2.7 Queda de Tensão

A *tensão* representa nível energético elétrico. A corrente elétrica, ao percorrer um circuito constituído por condutores e outros elementos resistivos, despende a energia de que está dotada, a fim de vencer as resistências que lhe são opostas. Portanto, a tensão vai se reduzindo a partir da fonte geradora até o retorno da corrente à mesma fonte. Diz-se, pois, que ocorre uma **queda de tensão** ou **perda de carga energética** ao longo do circuito.

A tensão nos terminais do gerador, U , é igual à f.e.m. do gerador menos o produto da corrente que dele parte pela sua *resistência* interna R_i , isto é:

$$U = f.e.m. - R_i \times I$$

A tensão na resistência externa R_e (aparelho de consumo de energia) é inferior à tensão do gerador U devido à queda de tensão (Fig. 1.5) ao longo do circuito $\Delta U_{c1} - \Delta U_{c2}$, assim:

$$U_{Re} = U - \Delta U_{c1} - \Delta U_{c2}$$

Ao fazer um projeto de Instalações Elétricas deve-se ter o cuidado de escolher a seção dos fios adequadamente de forma que, ao conduzir a corrente de projeto, a queda de tensão total:

$$\Delta U = \Delta U_{c1} + \Delta U_{c2}$$

não fique maior do que os valores estabelecidos pela NBR 5410:2004 – versão corrigida 2008.

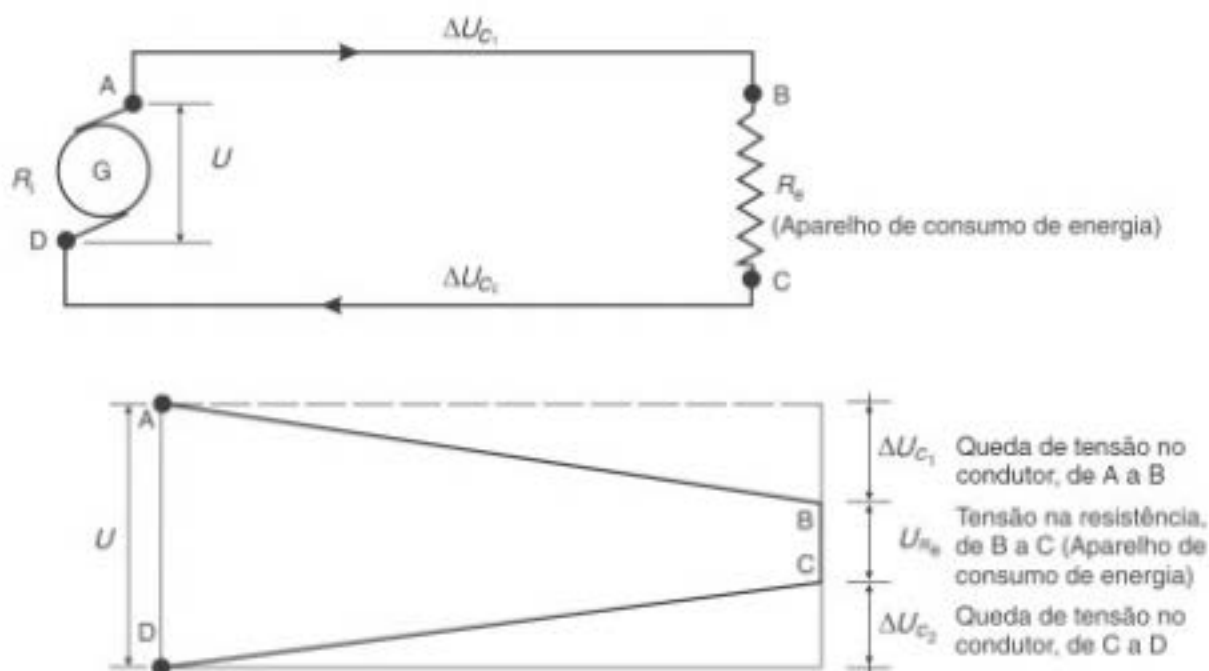


Figura 1.5 Queda de tensão em um circuito elétrico.

EXEMPLO 1.5

A tensão nominal (sem ligação de carga) de uma bateria é de 24 V, e sua resistência interna é de 0,5 Ω .

Ligou-se um aparelho de consumo à bateria e mediu-se num voltímetro, colocado nos bornes da bateria, uma tensão de 22 V. Qual a intensidade da corrente fornecida?

Solução

$$\text{f.e.m. } (E) = 24 \text{ V}; R_i = 0,5 \Omega; U = 22 \text{ V}$$

Sabemos que:

$$E = U + I \times R_i$$

Logo:

$$I = \frac{E - U}{R_i} = \frac{24 - 22}{0,5} = 4 \text{ A}$$

EXEMPLO 1.6

Um circuito de corrente contínua consome 20 A, e a queda de tensão no ramal que o alimenta não deve exceder 5 V. Qual a máxima resistência que pode ter esse ramal (Fig. 1.6)?

Solução

$$R = \frac{U}{I} = \frac{5}{20} = 0,25 \Omega \text{ para os dois condutores. Cada um deverá ter } 0,125 \Omega.$$

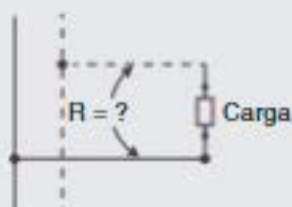


Figura 1.6 Esquema do circuito elétrico, indicando a resistência a ser calculada.

1.2.8 Circuitos com Resistências Associadas

1.2.8.1 Circuitos com resistências em série

Diz-se que existem resistências (resistores) associadas em série quando elas são ligadas, extremidade com extremidade, diretamente ou por meio de trechos de condutores.

A Fig. 1.7 mostra que a mesma corrente I percorre todas as resistências e que a tensão U se divide pelos diversos elementos que constituem o circuito.

Assim:

$$U_{BE} = U_{BC} + U_{CD} + U_{DE}$$

e a resistência total equivalente será a soma das resistências em série no circuito.

$$R = R_1 + R_2 + R_3$$

EXEMPLO 1.7

Na Fig. 1.7 as resistências são $R_1 = 42,9 \, \Omega$, $R_2 = 36,4 \, \Omega$ e $R_3 = 18,5 \, \Omega$.

Se aplicarmos entre os pontos B e E uma tensão de 220 volts, qual será a corrente que percorrerá o circuito?

Solução

A resistência equivalente R será:

$$R = 42,9 + 36,4 + 18,5 = 97,8 \, \Omega$$

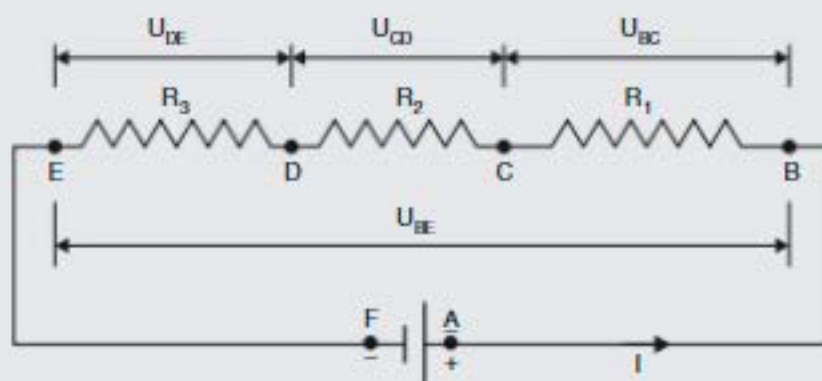


Figura 1.7 Circuito com resistências em série.

A intensidade de corrente I será:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{U}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{220}{97,8} = 2,249 \, \text{A}$$

EXEMPLO 1.8

Considerando o circuito do Exemplo 1.7, conhecidas as resistências R_1 , R_2 e R_3 e a intensidade da corrente acima determinada (2,249 A), calcular os valores da diferença de potencial nos terminais de cada uma das resistências e nos terminais B e E do circuito.

Solução

Apliquemos a lei de Ohm, $U = R \times I$, a cada um dos trechos do circuito.

Para:

$$R_1, U_1 = I \times R_1 = 2,249 \times 42,9 = 96,482 \, \text{V}$$

$$R_2, U_2 = I \times R_2 = 2,249 \times 36,4 = 81,863 \, \text{V}$$

$$R_3, U_3 = I \times R_3 = 2,249 \times 18,5 = 41,606 \, \text{V}$$

a diferença de potencial entre B e E será:

$$U_{BE} = U_1 + U_2 + U_3 = 219,95 \approx 220 \, \text{V}$$

1.2.8.2 Circuitos com resistências em paralelo

No circuito em paralelo, as extremidades das resistências estão ligadas a um ponto comum. As diversas resistências estão submetidas à mesma diferença de potencial, e a intensidade de corrente total é dividida entre os elementos do circuito, de modo inversamente proporcional às resistências.

Se um certo número de resistências $R_1, R_2, R_3, \dots, R_n$ estiver associado em paralelo, a *resistência efetiva ou equivalente* do conjunto poderá ser calculada por:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n}$$

e

$$\frac{1}{R} = \frac{P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_n}{U^2}$$

sendo $P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$ as potências dos aparelhos correspondentes, respectivamente, às resistências $R_1, R_2, R_3, \dots, R_n$. As correntes serão dadas por:

$$I_1 = \frac{U}{R_1}; I_2 = \frac{U}{R_2}; I_3 = \frac{U}{R_3}; \dots; I_n = \frac{U}{R_n}$$

EXEMPLO 1.9

Uma corrente de 25 A percorre um circuito com três resistências $R_1 = 2,5 \, \Omega$, $R_2 = 4,0 \, \Omega$ e $R_3 = 6,0 \, \Omega$ em paralelo (Fig. 1.8). Determinar as parcelas de corrente total que percorrem cada uma das resistências.

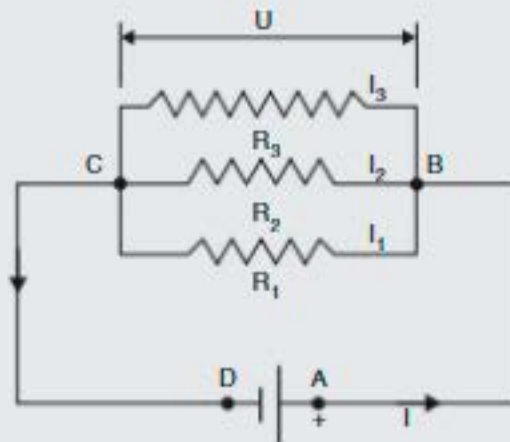


Figura 1.8 Circuito com resistências em paralelo.

Solução

Temos:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{2,5} + \frac{1}{4} + \frac{1}{6} = 0,40 + 0,25 + 0,16 = 0,81$$

$$R = \frac{1}{0,81} = 1,234 \, \Omega$$

Mas,

$$U = R_1 \times I_1 \quad (\text{I})$$

$$U = R \times I \quad (\text{II})$$

Dividindo-se (I) por (II), fica

$$R_1 \times I_1 = R \times I$$

logo,

$$\frac{I}{I_1} = \frac{R_1}{R}$$

donde,

$$I_1 = \frac{I \times R}{R_1} = \frac{25 \times 1,234}{2,5} = 12,34 \text{ A}$$

$$I_2 = \frac{I \times R}{R_2} = \frac{25 \times 1,234}{4} = 7,71 \text{ A}$$

$$I_3 = \frac{I \times R}{R_3} = \frac{25 \times 1,234}{6} = 5,14 \text{ A}$$

Verificação:

$$I = I_1 + I_2 + I_3 = 12,34 + 7,71 + 5,14 = 25,19 \text{ A} \approx 25 \text{ A}$$

1.3 PRODUÇÃO DE UMA FORÇA ELETROMOTRIZ

Como vimos no início deste capítulo, para que circule uma corrente elétrica é necessário haver uma diferença de tensão elétrica entre dois pontos. Estabelece-se o movimento de elétrons livres, do ponto de maior tensão para o de menor tensão ou tensão nula. A tensão elétrica é produzida em dispositivos ou máquinas adequados, e quando medida nos terminais destes geradores de eletricidade é, como vimos, denominada *força eletromotriz* (f.e.m.). Portanto, é necessário recorrer-se a um gerador de força eletromotriz para criar um desnível energético capaz de promover o deslocamento dos elétrons livres, isto é, a corrente elétrica ao longo dos condutores e dos aparelhos e equipamentos elétricos de utilização.

A obtenção da força eletromotriz pode realizar-se de várias maneiras:

- por **atrito** do vidro contra o couro, e da ebonite contra a lã;
- pela **ação da luz** sobre uma película de selênio ou telúrio, depositada sobre uma chapa de ferro (células foto-elétricas, fotovoltaicas);
- pela **ação de compressão e tração** sobre cristais como o de quartzo (efeito piezoelétrico);
- por **aquecimento** do ponto de soldagem entre dois metais diferentes (efeito termelétrico);
- por **ação química** de soluções de sais, ácidos e bases, na presença de dois metais diferentes ou de metal e carvão (pilhas e baterias), e nas células de hidrogênio;
- por **indução eletromagnética**, no caso dos geradores rotativos.

Vejam os como se estabelece uma f.e.m. por efeito de indução eletromagnética. Três são os processos pelos quais se pode obtê-la:

- 1) *Pelo movimento de um condutor num campo magnético.* Dado um campo magnético (formado por um ímã, por exemplo), se deslocarmos, com movimento de rotação, um condutor (uma espira), de modo que corte as linhas de força do campo magnético, origina-se uma f.e.m. entre os dois extremos do condutor. Se este estiver ligado a um circuito externo, circulará uma corrente elétrica por ele. Este é o princípio do método empregado na produção da f.e.m. de um gerador de corrente elétrica, e o fenômeno se denomina **indução eletromagnética**.

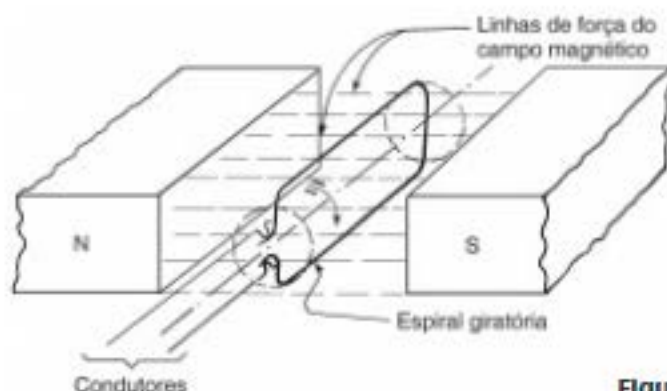


Figura 1.9 Rotação de um condutor em um campo magnético.