

2

Conceitos Básicos Necessários aos Projetos das Instalações Elétricas

Agora que já temos uma visão global de um sistema de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, estudaremos, neste capítulo, alguns conceitos básicos dos fundamentos da eletricidade e as principais leis que regulam as fórmulas e os cálculos aplicáveis.

2.1 Preliminares

Energia é tudo aquilo capaz de produzir trabalho, de realizar uma ação (por exemplo, produzir calor, luz, radiação etc.). Em sentido geral, poderia ser definida como essência básica de todas as coisas, responsável por todos os processos de transformação, propagação e interação que ocorrem no universo.

A energia elétrica é um tipo especial de energia por meio da qual podemos obter os efeitos citados; ela é usada para transmitir e transformar a energia primária da fonte produtora que aciona os geradores em outros tipos de energia utilizados em nossas residências.

Podemos dizer que a eletricidade é uma energia intermediária entre a fonte produtora e a aplicação final. É um dos tipos mais convenientes de energia, porque, com o simples ligar de uma chave, temos à nossa disposição parte da energia acionadora das turbinas, inteiramente silenciosa e não poluidora.

Para entendermos melhor, definiremos os conceitos fundamentais de energia e de eletricidade, começando pela energia potencial e energia cinética.

Energia potencial

É a energia armazenada como resultado de sua posição.

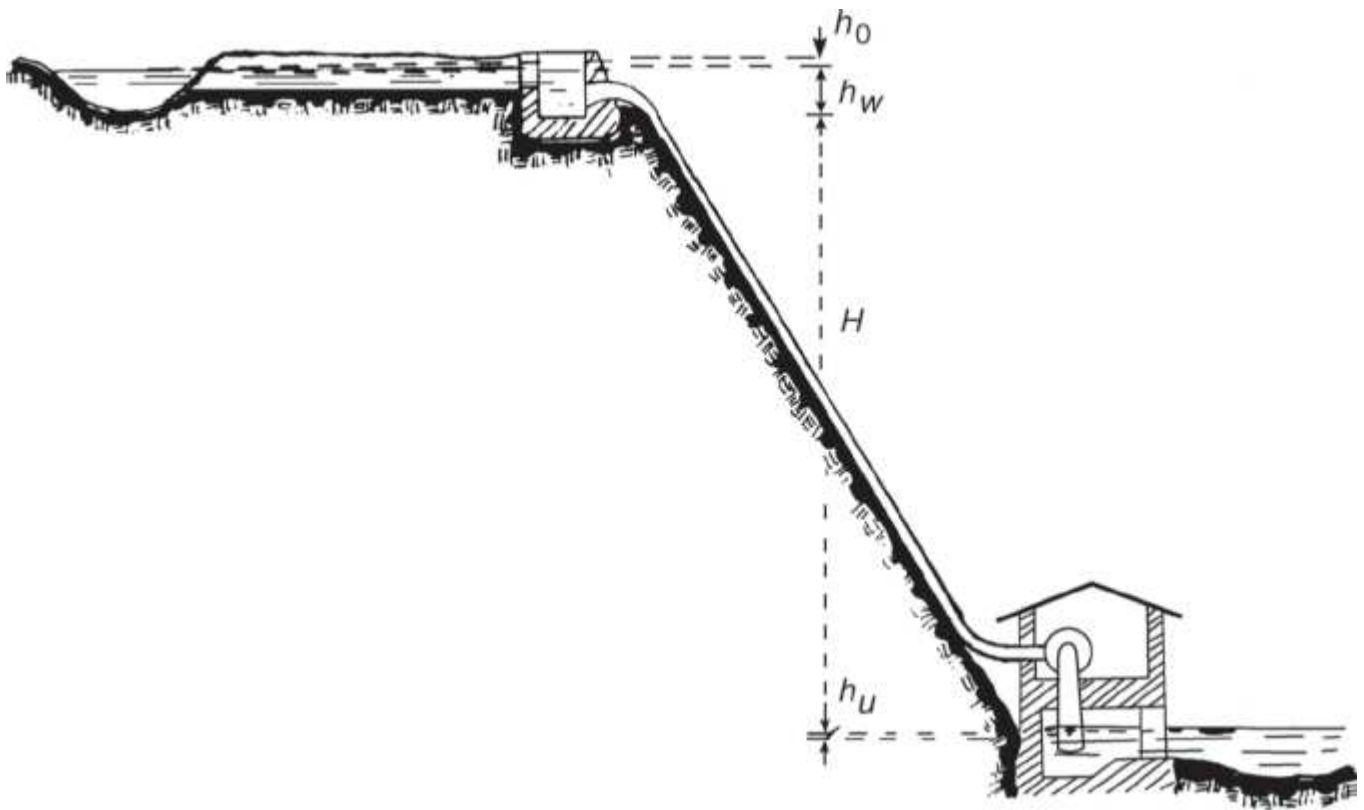
Energia cinética

É a energia resultante do movimento.

No caso de uma barragem, represamos a água de um rio que normalmente correria montanha abaixo, por causa da força da gravidade. Uma vez represada, a água possui uma enorme energia potencial, que poderemos usar facilmente.

Conforme vimos na Figura 1.2, temos, em seu lado esquerdo, tubulações que vão conduzir a água desde a barragem até as turbinas. Essa queda-d'água faz com que a energia potencial acumulada se transforme em energia cinética, ou seja, energia de movimento. Assim, podemos enunciar, dentro do princípio de conservação de energia, que “a energia potencial se transforma em energia cinética, e vice-versa”. Essa água em movimento encontra as palhetas das turbinas, dando origem a um movimento de rotação, o qual precisa ser muito bem controlado, para não haver variação da frequência da rede.

Na Figura 2.1, temos o corte longitudinal de uma barragem, onde vemos as tubulações e a casa de máquinas, na qual fica instalada a turbina (no caso, do tipo PELTON).



Perfil longitudinal de uma queda-d'água com tubulação forçada.

Figura 2.1

Para sabermos qual a potência dessa turbina, podemos usar a seguinte fórmula:

$$P_t = \frac{1000 Q H \eta}{75}$$

em que:

P_t = potência da turbina em cv (cavalo-vapor);

Q = vazão da água em m^3/s ;

H = altura da queda em metros;

η = rendimento hidráulico, da ordem de 83%;

h_0 = nível em repouso;

h_w = nível dinâmico;

h_u = altura de perdas na usina.

Outros exemplos de energias potencial e cinética:

- Uma grande pedra em uma montanha possui energia potencial; se essa pedra for descalçada, rolará ladeira abaixo, fazendo com que a energia potencial seja transformada em energia cinética;
- Um arco lançador de flechas acumula energia potencial quando tangemos sua corda, e, se a largamos, essa energia se transforma em cinética, a qual é capaz de lançar a flecha a uma grande distância;
- Um veículo em movimento possui energia cinética, que tenderia a ser mantida, não fosse o atrito que a desgasta. Qualquer obstáculo que apareça subitamente, tentando deter o veículo, sofre sério impacto em função do peso do veículo (inércia) e da velocidade de deslocamento;
- Todos os fluidos que se deslocam nas tubulações possuem energia cinética. Para que eles possam deslocar-se nas tubulações, é preciso que haja diferença de nível entre o reservatório e o ponto de utilização. Essa diferença de nível é a energia potencial.

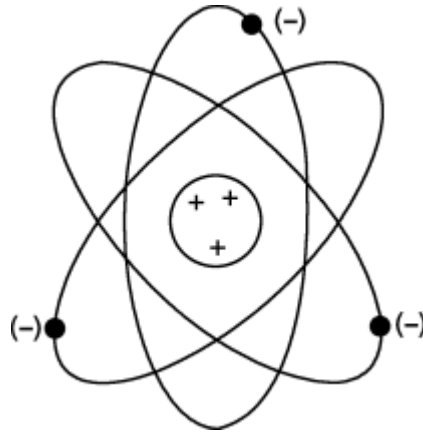
2.2 Composição da Matéria

Todos os corpos são compostos de moléculas, e estas são um aglomerado de um ou mais átomos, a menor porção de matéria.

Cada átomo compõe-se de um núcleo no qual existem prótons, com carga positiva, e nêutrons, sem carga; em torno do núcleo, gravitam os elétrons, elementos de carga negativa.

Num átomo em equilíbrio, o número de elétrons em órbita é igual ao número de prótons no núcleo (Figura 2.2).

O hidrogênio é o elemento mais simples, porque só possui um elétron em órbita e um próton no núcleo. Já o urânio é dos mais complexos: tem 92 elétrons em órbita e 92 prótons no núcleo.



Átomo em equilíbrio.

Figura 2.2

Quando um elétron é retirado de um átomo, dizemos que esse átomo ficou positivo (íon), pois há mais elementos positivos no núcleo do que elétrons em órbita. A disposição dos átomos de um corpo possibilita a retirada dos elétrons por meios diversos.

O átomo, como visto na Figura 2.2, é conhecido como átomo de Rutherford-Bohr, o qual se comporta como um sistema solar em miniatura.

O núcleo do átomo age como o Sol, em torno do qual gravitam os elétrons, como se fossem os planetas, em órbitas circulares ou elípticas.

Após a realização de várias experiências, cientistas concluíram que a massa do próton é cerca de 1 840 vezes maior que a do elétron, de modo que praticamente a massa do átomo se concentra no núcleo. Todavia, a carga elétrica do elétron é a mesma do próton.

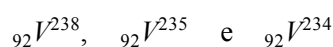
No caso do hidrogênio pesado, há um próton e um nêutron no núcleo, bem como um elétron em órbita. Este é o deutério, cujo símbolo é ${}^2_1\text{H}$.

Há outro hidrogênio pesado, o trítio, cujo símbolo é ${}^3_1\text{H}$, com 2 nêutrons e 1 próton no núcleo.

O número embaixo e à esquerda, que representa a quantidade de elétrons em órbita, é o “número atômico” do átomo; já o número acima e à direita, que representa a quantidade de partículas no núcleo, refere-se ao “peso atômico” do elemento.

Na escala periódica dos elementos, segue-se o hélio, cujo isótopo mais abundante é o ${}^4_2\text{He}$, ou seja, 2 elétrons em órbita e 2 prótons + 2 nêutrons no núcleo. Esse isótopo é conhecido como partícula alfa.

O átomo de ocorrência natural mais complexo é o urânio, cujos isótopos são:



ou seja, 92 elétrons em órbita, 92 prótons e 146 nêutrons no núcleo (no primeiro caso).

Verificou-se que, entre o núcleo e o elétron em órbita, exerce-se uma força atrativa, força esta tanto menor quanto maior a distância entre eles.

2.3 Carga Elétrica

Conforme exposto, o elétron e o próton são as cargas elementares e componentes do átomo.

Por convenção, estabeleceu-se que a carga do elétron seria negativa e a do próton, positiva, ou seja, cargas de polaridades opostas.

Aproximando-se cargas de polaridades opostas, verifica-se uma força atrativa entre elas; aproximando-se cargas de mesmas polaridades, nota-se uma força de repulsão entre elas.

Experimentalmente, estabeleceu-se uma unidade para se medir a carga elétrica; a essa unidade chamou-se coulomb. A carga de 1 elétron é:

$$e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ coulombs,}$$

ou seja: para se formar 1 coulomb, são necessários $6,28 \times 10^{18}$ elétrons. 1 cm³ de cobre possui cerca de 8×10^{22} elétrons livres, ou seja, oito seguido por vinte e dois zeros.

2.4 Diferença de Potencial ou Tensão Elétrica

A diferença entre os potenciais elétricos de dois pontos de uma região de um campo eletrostático é chamada de diferença de potencial, f.e.m. ou tensão elétrica entre esses dois pontos.

A diferença de potencial entre dois pontos de um campo eletrostático é de 1 volt, quando o trabalho realizado contra as forças elétricas ao se deslocar uma carga entre esses dois pontos é de 1 joule por coulomb.

$$1 \text{ volt} = 1 \frac{\text{joule}}{\text{coulomb}}.$$

A diferença de potencial é medida em volts da mesma maneira que a tensão elétrica.

Um gerador elétrico é uma máquina que funciona como uma bomba, retirando cargas elétricas de um polo e acumulando-as em outro, isto é, um polo fica com excesso de cargas de certa polaridade, e o outro, com deficiência de cargas daquela polaridade. Como são elétrons que se deslocam, um polo fica carregado negativamente e o outro positivamente.

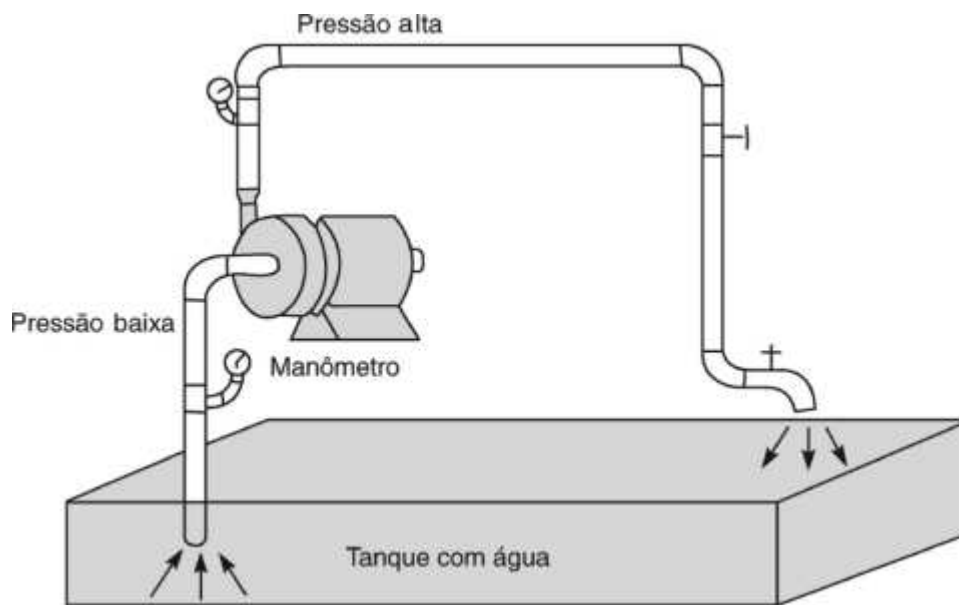
Em outras palavras, o gerador provoca uma diferença de potencial (d.d.p.) entre os seus terminais.

Para facilitar a compreensão, vemos, na Figura 2.3, um esquema hidráulico análogo, em que:

- a bomba é análoga ao gerador;
- as tubulações são análogas aos condutores elétricos;
- a torneira é análoga ao interruptor;
- a água retirada é análoga à energia consumida;
- o fluxo d'água (l/s) é análogo à corrente.

Numa instalação hidráulica, de modo análogo, para haver circulação de água, precisamos ter uma diferença de pressões, uma tubulação, uma torneira e um caminho de retorno. As pressões da água são medidas por manômetros que registram essas grandezas em metros de coluna d'água. Assim, entre a alta e a baixa pressão, existe uma diferença em metros de colunas d'água ou diferença de potencial hidráulico (Figura 2.3).

De modo análogo, também se mede a vazão da água em litros por segundo.

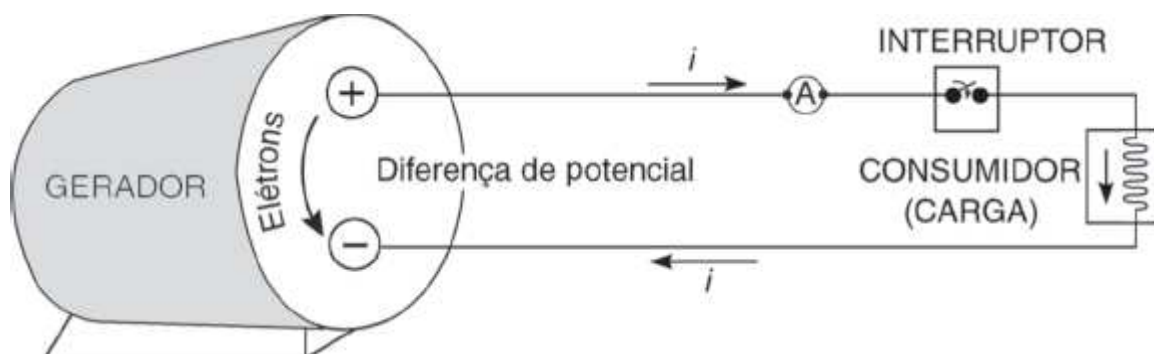


Esquema de um circuito hidráulico análogo ao elétrico.

Figura 2.3

2.5 Corrente Elétrica

Se os terminais do gerador forem ligados a um circuito elétrico fechado, como observado na Figura 2.4, teremos uma corrente elétrica, a qual é o deslocamento de cargas dentro de um condutor quando existe uma diferença de potencial elétrico entre as suas extremidades. Tal deslocamento procura restabelecer o equilíbrio desfeito pela ação de um campo elétrico ou outros meios (reação química, atrito, luz etc.).



Esquema de um circuito elétrico fechado.

Figura 2.4

Desse modo, a “corrente elétrica” é o fluxo de cargas que atravessa a seção reta de um condutor, na unidade de tempo. Se esse fluxo for constante, denomina-se ampère a relação:

$$1 \text{ ampère} = 1 \frac{\text{coulomb}}{\text{segundo}}$$

ou, generalizando:

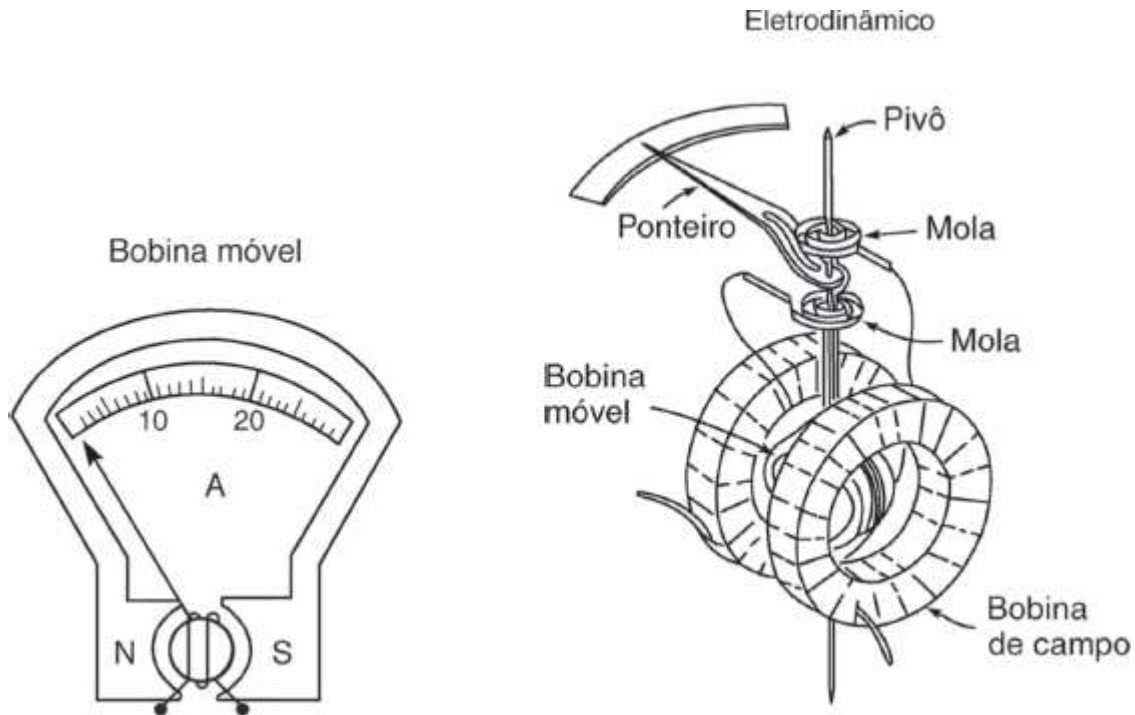
$$i = \frac{dq}{dt}$$

Com base na ação da força de um campo magnético, pode-se construir um amperímetro, ou seja, um instrumento capaz de medir as intensidades das correntes.

Um ímã permanente em forma de ferradura é desenhado de tal maneira que se pode colocar entre seus polos um núcleo de ferro doce, capaz de girar segundo um eixo (Figura 2.5). Em torno desse núcleo, enrola-se uma bobina de fio fino, cujos terminais permitem ligar em série o circuito cuja “corrente” se deseja medir.

A corrente contínua circulando pela bobina formará um campo que reage com o campo magnético do ímã permanente, havendo uma deflexão no ponteiro instalado solidário com o núcleo de ferro. Há um sistema de molas que obriga o ponteiro a voltar à origem tão logo a corrente cesse de circular.

A graduação na escala do instrumento possibilita a medição das intensidades de correntes.



Amperímetro de bobina móvel e eletrodinâmico.

Figura 2.5

2.6 Resistência Elétrica

Como sempre acontece em qualquer deslocamento, há uma resistência à passagem das cargas dentro dos condutores, e essa resistência oposta é a resistência ôhmica, medida em ohm, em homenagem ao descobridor dessa propriedade dos corpos.

Chama-se resistência elétrica a oposição interna do material à circulação das cargas. Por isso, os corpos maus condutores têm resistência elevada, e os bons condutores têm menor resistência.

Isso se deve às forças que mantêm os elétrons livres, agregados ao núcleo do material.

Assim, chegou-se à seguinte conclusão:

“Corpos bons condutores são aqueles em que os elétrons mais externos, mediante um estímulo apropriado (atrito, contato ou campo magnético), podem facilmente ser retirados dos átomos.”

Exemplos de corpos bons condutores: platina, prata, cobre e alumínio.

“Corpos maus condutores são aqueles em que os elétrons estão tão rigidamente solidários aos núcleos que somente com grandes dificuldades podem ser retirados por um estímulo exterior.”

Exemplos de corpos maus condutores: porcelana, vidro, madeira.

A resistência R depende do tipo do material, do comprimento, da seção A e da temperatura.

Cada material tem a sua resistência específica própria, ou seja, a sua resistividade (ρ). Então, a expressão da resistência em função dos dados relativos ao condutor é:

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

em que:

R = resistência em ohms (Ω);

ρ = resistividade do material em ohms \times mm²/m;

L = comprimento em m;

A = área da seção reta em mm².

Para o cobre, temos $\rho = 0,0178 \Omega \times \text{mm}^2$ a 15 °C

Para o alumínio, $\rho = 0,028 \Omega \times \text{mm}^2$ a 15 °C

A resistência varia com a temperatura de acordo com a expressão:

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

em que:

R_t = a resistência na temperatura t em Ω ;

R_0 = a resistência a 0 °C em Ω ;

α = coeficiente de temperatura em C^{-1} ;

t_2 e t_1 = temperaturas final e inicial em °C.

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

EXEMPLOS

1. A resistência de um condutor de cobre a 0 °C é de 50 V. Qual será a sua resistência a 20 °C?

Solução

$$R_{20} = 50(1 + 0,004 \times 20) = 54 \Omega.$$

2. Qual a resistência de um fio de alumínio de 1 km de extensão e de seção de 2,5 mm² a 15 °C?

Solução

$$R = \rho \times \frac{L}{A} = 0,028 \times \frac{1000}{2,5} = 11,2 \Omega.$$

3. Se no exemplo anterior o condutor fosse de cobre, qual a sua resistência?

Solução

$$R = \rho \times \frac{L}{A} = 0,0178 \times \frac{1000}{2,5} = 7,12 \Omega.$$

2.7 Lei de Ohm

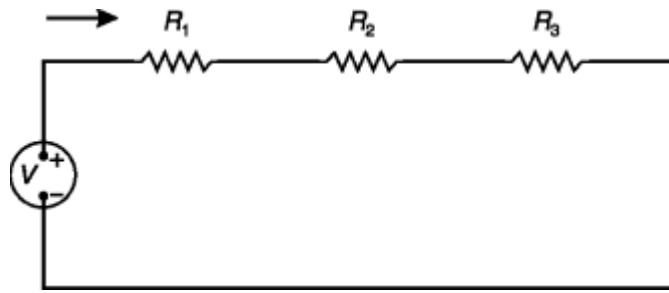
Ohm* estabeleceu a lei que tem o seu nome e que inter-relaciona as grandezas d.d.p., corrente e resistência:

$$V = R \times I$$

V = d.d.p. em volts;

R = resistência em ohms (Ω);

I = intensidade de corrente em ampères.



Circuito série.

Figura 2.6

2.8 Circuitos Séries

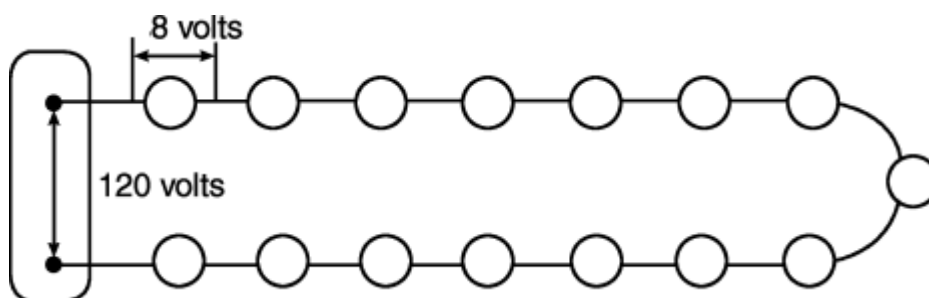
Os circuitos séries são aqueles em que a mesma corrente percorre todos os seus elementos.

A resistência equivalente de um circuito série com três resistências R_1 , R_2 e R_3 é:

$$R = R_1 + R_2 + R_3$$

EXEMPLO

A iluminação da árvore de Natal é um exemplo de circuito série. Vamos supor que tenhamos 15 lâmpadas de 8 volts cada uma e queiramos ligá-las na tomada de 120 volts de nossa casa. Como disporemos as lâmpadas? Qual a corrente circulante se cada lâmpada dissipa 5 watts? Qual a resistência equivalente?



Lâmpadas ligadas em série (árvore de Natal).

Figura 2.7

Solução

1. 15 lâmpadas de 8 volts dão a queda de $8 \times 15 = 120$ volts.
2. A potência dissipada é 5 watts, ou seja, $V \times I = 5$.

$$I = \frac{5}{8} = 0,625 \text{ A ou } 625 \text{ miliampères;}$$

$$P = RI^2;$$

$$R = \frac{P}{I^2} = \frac{5}{0,625^2} = 12,8 \Omega;$$

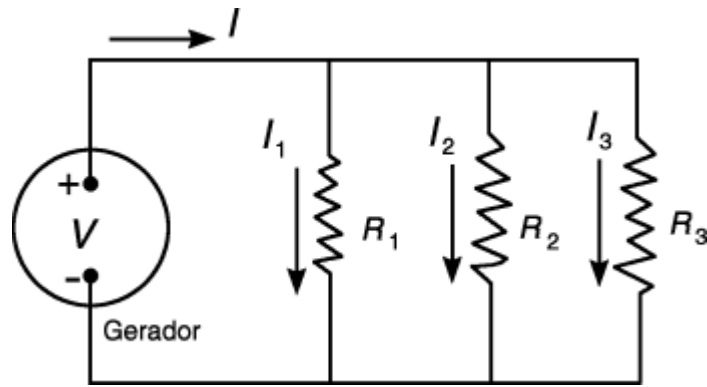
$$R_{eq} = 15 \times 12,8 = 192 \Omega.$$

Verificação

$$V = R_{eq} \times I = 192 \times 0,625 = 120 \Omega.$$

2.9 Circuitos Paralelos

Os circuitos paralelos são os mais utilizados nas instalações elétricas.



Circuito paralelo.

Figura 2.8

A resistência equivalente de um circuito paralelo, com três resistências, R_1 , R_2 e R_3 , é:

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

Quando são apenas duas as resistências em paralelo, R_1 e R_2 , a resistência equivalente será o quociente do produto pela soma delas:

$$R_{eq} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}.$$

Se $R_1 = R_2$, resulta $R_{eq} = \frac{R_1}{2}$. Se forem n resistências: $R_{eq} = \frac{R}{n}$.

EXEMPLO

Num circuito de 220 volts, desejamos instalar um forno de secagem de pintura, o qual possui três resistências de 20 ohms ligados em paralelo. Qual a resistência equivalente? Qual a corrente resultante e a potência total dissipada?

Solução

$$1. \frac{1}{R} = \frac{1}{20} + \frac{1}{20} + \frac{1}{20} = \frac{3}{20} \text{ ou } R = \frac{20}{3} = 6,66 \Omega.$$

$$2. I_1 = \frac{V}{R_1} = \frac{220}{20} = 11 \text{ A};$$

$$I_2 = \frac{V}{R_2} = \frac{220}{20} = 11 \text{ A};$$

$$I_3 = \frac{V}{R_3} = \frac{220}{20} = 11 \text{ A};$$

$$I = I_1 + I_2 + I_3 = 11 + 11 + 11 = 33 \text{ A}.$$

$$3. P_1 = R_1 I_1^2 = 20 \times 11^2 = 2\,420 \text{ W};$$

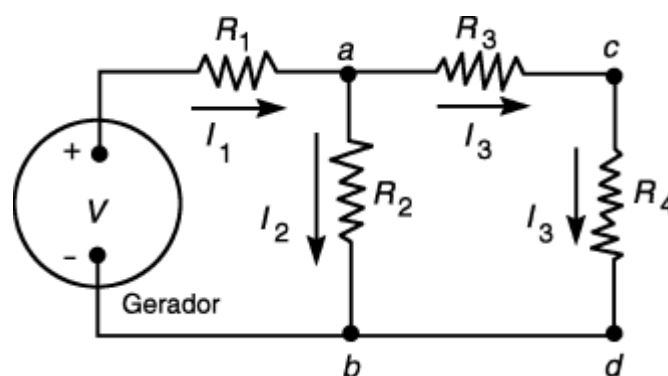
$$P_2 = R_2 I_2^2 = 20 \times 11^2 = 2\,420 \text{ W};$$

$$P_3 = R_3 I_3^2 = 20 \times 11^2 = 2\,420 \text{ W};$$

$$P = P_1 + P_2 + P_3 = 2\,420 + 2\,420 + 2\,420 = 7\,260 \text{ W}.$$

Verificação

$$V = R_e \times I = 6,66 \times 33 \cong 220 \text{ V} \text{ ou } P = V \times I = 220 \times 33 = 7\,260 \text{ W}.$$



Circuito misto.

Figura 2.9

2.10 Circuitos Mistos

É uma combinação das ligações série e paralelas em um mesmo circuito. Nas instalações elétricas usuais, o circuito misto é mais encontrado, pois, embora as cargas estejam ligadas em paralelo, pelo fato de os fios terem resistência ôhmica, esta resistência deve ser considerada nos cálculos (Figura 2.9).

EXEMPLO

No circuito da Figura 2.9, as resistências R_1, R_3 representam as resistências do condutor elétrico, e as resistências R_2, R_4 representam as cargas, por exemplo, lâmpadas.

Vamos calcular a resistência equivalente supondo que $R_1 = R_3 = 2$ ohms e $R_2 = R_4 = 10$ ohms.

Começemos pelo trecho $a-c-d$:

$$R_3 + R_4 = 2 + 10 = 12 \text{ V}.$$

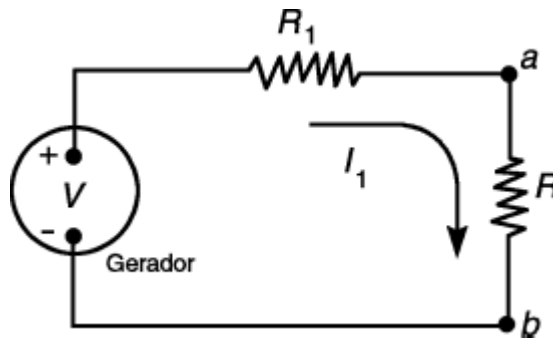
Essa resistência equivalente de 12 ohms está em paralelo com R_2 , ou seja:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{12} + \frac{1}{10}; \quad R = \frac{120}{22} = 5,45 \Omega.$$

Agora R_1 e $R = 5,45$ ohms estão em série:

$$R_1 + 5,45 = 7,45 V.$$

Essa resistência de 7,45 ohms é a resistência equivalente do circuito.



Circuito equivalente ao da Figura 2.9.

Figura 2.10

Suponhamos que $V = 100$ volts, e desejamos conhecer as correntes que circulam em cada braço do circuito da Figura 2.9; então:

$$I_1 = \frac{100}{7,45} = 13,42 \text{ A.}$$

Conhecendo I_1 , calculamos a queda de tensão em R_1 do seguinte modo:

$$V_1 = R_1 I_1 = 2 \times 13,42 = 26,84 \text{ V.}$$

Então,

$$V_{ab} = V - V_1 = 100 - 26,84 = 73,16 \text{ V.}$$

Conhecendo-se a tensão, a corrente I_2 será:

$$I_2 = \frac{V_{ab}}{R_2} = \frac{73,16}{10} = 7,31 \text{ A.}$$

Pela Figura 2.9, vemos que:

$$I_1 = I_2 + I_3 \therefore I_3 = I_1 - I_2 = 13,42 - 7,31 = 6,11 \text{ A.}$$

A queda de tensão em R_3 será:

$$V_3 = R_3 I_3 = 2 \times 6,11 = 12,22 \text{ V;}$$

e em R_4 será:

$$V_4 = R_4 I_3 = 10 \times 6,11 = 61,10 \text{ V.}$$

Verificação:

$$V_{ab} = V_3 + V_4 = 12,22 + 61,10 = 73,32 \text{ V.}$$

(Resultado ligeiramente diferente devido às aproximações nos cálculos.)

2.11 Leis de Kirchhoff

Há duas leis estabelecidas por Gustav Kirchhoff* para resolver circuitos mais complexos, com geradores em diversos braços, o que, muitas vezes, torna impossível a solução pela determinação da resistência equivalente.

1ª Lei: A soma das correntes que chegam a um nó do circuito é igual à soma das correntes que se afastam.

No exemplo da Figura 2.9, para o nó a , temos:

$$I_1 = I_2 + I_3. \quad (1)$$

Chama-se “nó” o ponto de junção de três ou mais braços de um circuito elétrico.

2ª Lei: A soma dos produtos das correntes pelas resistências em cada malha do circuito é igual à soma algébrica das forças eletromotrizes dessa malha.

Chama-se malha um circuito fechado qualquer percorrido em um sentido arbitrado; por exemplo, o sentido horário. Na Figura 2.9, temos as seguintes malhas: malha 1

malha 1 = gerador – a – b – gerador;

malha 2 = a – c – d – b – a ;

malha 3 = gerador – a – c – d – b – gerador.

Vamos aplicar as leis de Kirchhoff no mesmo exemplo anterior (Figura 2.9). Na malha 1, aplicando a 2ª lei, temos:

$$R_1 I_1 + R_2 I_2 = 100 \quad \text{ou} \quad 2I_1 + 10I_2 = 100. \quad (2)$$

Na malha 2, temos:

$$R_3 I_3 + R_4 I_3 - R_2 I_2 = 0 \quad \text{ou} \quad 2I_3 + 10I_3 - 10I_2 = 100. \quad (3)$$

Nota-se que a parcela $R_2 I_2$ tem sinal negativo porque se opõe ao sentido horário estabelecido.

Da Equação (3), temos:

$$12I_3 - 10I_2 = 0 \quad \text{ou} \quad 10I_2 = 12I_3 \quad \therefore \quad I_3 = \frac{10}{12} I_2.$$

Da Equação (2), temos:

$$2I_1 = 100 - 10I_2 \quad \text{ou} \quad I_1 = 50 - 5I_2.$$

Substituindo estes valores em (1), temos:

$$50 - 5I_2 = I_2 + \frac{10}{12} I_2 \quad \therefore \quad I_2 = 7,31 \text{ A.}$$

Donde tiramos:

$$I_3 = 6,10 \text{ A;}$$

$$I_1 = 13,42 \text{ A.}$$

(Mesmo resultado obtido anteriormente.)

2.12 Potência Elétrica

Sabemos que, para executarmos qualquer movimento ou produzir calor, luz, radiação etc., precisamos despende energia. A energia aplicada por segundo em qualquer dessas atividades chamamos de potência.

Em eletricidade, a potência é o produto da tensão pela corrente, ou seja:

$$P = V \times I$$

em que:

$$P = \text{volt} \times \text{ampère} = \text{watt} = \frac{\text{joule}}{\text{segundo}}$$

P é medido em watts.

Como a unidade watt é, muitas vezes, pequena para exprimir os valores de um circuito, usamos o quilowatt (kW) ou o megawatt (MW) ou o gigawatt (GW):

$$1 \text{ kW} = 1\,000 \text{ W}, \quad 1 \text{ MW} = 10^6 \text{ W} \quad \text{e} \quad 1 \text{ GW} = 10^9 \text{ W}.$$

Como $V = RI$, substituindo, temos $P = RI^2$,

ou seja, a potência é o produto da resistência pelo quadrado da corrente.

EXEMPLO

Qual a potência consumida por um chuveiro cuja tensão é 220 volts e “puxa” uma corrente de 20 ampères?

Solução

$$P = V \times I = 220 \times 20 = 4\,400 \text{ W} \quad \text{ou} \quad 4,4 \text{ kW}.$$

2.13 Medidores de Potência

Os medidores de potência elétrica são conhecidos como wattímetros, pois sabemos que a potência é expressa em watts e como vimos no item 2.12:

$$P = V \times I \text{ W}.$$

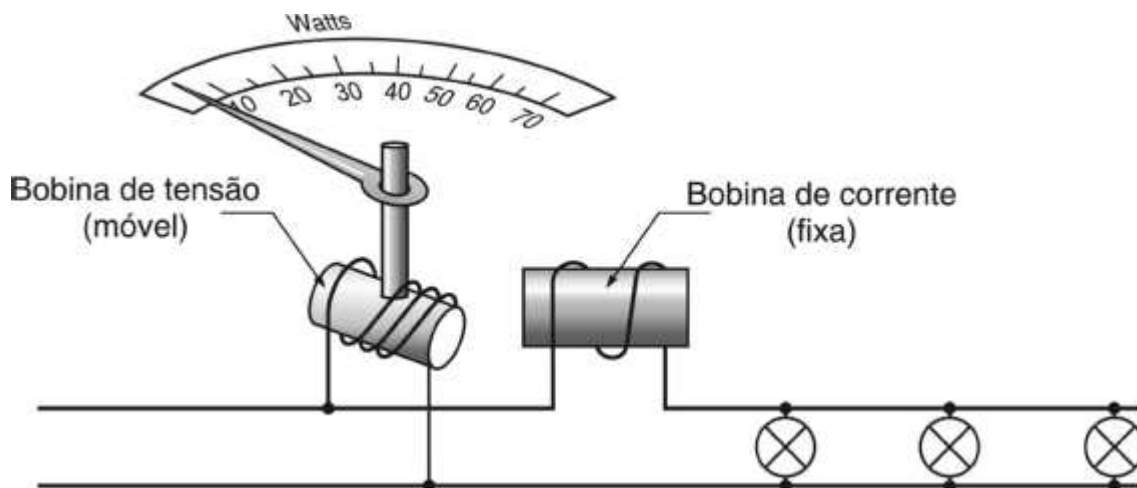
Assim, para que um instrumento possa medir a potência de um circuito elétrico, será necessário o emprego de duas bobinas: uma de corrente e outra de potencial.

A ação mútua dos campos magnéticos gerados pelas duas bobinas provoca o deslizamento de um ponteiro em uma escala graduada em watts proporcional ao produto volts \times ampères (Figura 2.11). Note-se que a bobina de tensão ou de potencial está ligada em paralelo com o circuito e a bobina de corrente em série.

Os wattímetros medem a potência ativa, tanto em circuitos alimentados em corrente contínua quanto em corrente alternada. Existem três tipos de potência em circuitos de corrente alternada:

- potência ativa;
- potência reativa;
- potência aparente.

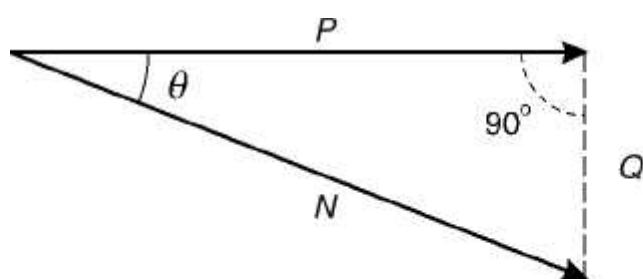
No diagrama da Figura 2.12, vemos que as três potências em jogo num circuito de corrente alternada se compõem vetorialmente como um triângulo.



Esquema de um wattímetro.

Figura 2.11

Os wattímetros medem somente potência ativa, ou seja, a potência que é transformada em trabalho (calor, movimento, luz, ação etc.). Conhecidas a potência ativa P , a tensão V e a corrente I usando a expressão (1), determinar o fator de potência ($\cos \theta$).



$P = V \times I \cos \theta$	- potência ativa (W)
$Q = V \times I \sin \theta$	- potência reativa (var)
$N = V \times I$	- potencia aparente (VA)

em que:

V – tensão em volts
 I – corrente de ampères
 $\cos \theta$ – fator de potência

Diagrama de fasores.

Figura 2.12

2.14 Energia Elétrica

Energia é a potência dissipada ou consumida ao longo do tempo, ou seja:

$$E = W \times s.$$

Se o tempo considerado for de uma hora, a energia é expressa em watts \times hora (Wh). Como esta é uma unidade muito pequena, na prática usa-se a potência em quilowatts, e a energia será em kWh.

O quilowatt-hora é a unidade que exprime o consumo de energia em nossa residência. Por esta razão, na “conta de luz” que recebemos no fim do mês estão registrados o número de kWh que gastamos e o valor a ser pago dependendo do preço do kWh e de outras taxas que são incluídas na conta (Figura 2.13).

A energia, como vimos, é a potência realizada ao longo de tempo; se um chuveiro de 4,4 kW ficar ligado durante 2 horas, a energia consumida será: W

$$W = 4,4 \times 2 = 8,8 \text{ kWh.}$$

Se você ainda não possui sua conta da Light em Débito Automático, faça a adesão na sua agência bancária, na Agência Virtual (www.light.com.br), no Disque-Light (0800 282 0120) ou nas agências da Light e fique despreocupado.

ATENÇÃO: AGÊNCIA RUA LARGA ESTÁ FECHADA PARA OBRAS

A agência da Light na Av. Mal Floriano, 168, no Centro da cidade, está fechada temporariamente para modernização, visando mais conforto e comodidade aos clientes.
A agência mais próxima fica na Rua 1º de Março, 11 (2ª a 6ª, das 8h30 às 16h30).

A Light oferece outros canais e agências, veja em www.light.com.br

Reservado ao Fisco: 0B70.09D6.891D.DFA8.0C3F.9A32.8F5D.AFA8
Nota Fiscal - Série 01 no. 1850148
Conta de Energia Elétrica
RE PROC. E-04/053.359/09 - IFE 03
SEPD - Autorização n.08-2005/0006384-9



LIGHT SERVIÇOS DE ELETRICIDADE SA
AV. MAL FLORIANO 168 RIO DE JANEIRO RJ CEP 20080-002
CNPJ 60.444.437/0001-46
INSC. ESTADUAL 81380.023 INSC. MUNICIPAL 00794678

Classe / Subclasse
RESIDENCIAL / RESIDENCIAL

Medidor
TRIFÁSICO N°: 2587181

Ref: Mês / Ano
OUT/2014 Referência Bancária 010040444030 Número da Fatura 519503145499

DATA PREVISTA DA PRÓXIMA LEITURA **14/11/2014**

TENSÃO NOMINAL EM VOLTS
Disponível: 380
Limites mínimo: 348 Limites máximo: 396

INDICADORES DE QUALIDADE
Mês de referência: Agosto/2014
Conjunto: ALDEIA CAMPISTA

Indicadores	Apurado Mensal	Meta Mensal	Meta Trimestral	Meta Anual
DIC	0,00	4,33	8,71	17,43
FIC	0,00	2,86	5,72	11,45
DMIC	0,00	2,35	---	---

DIC - Duração de interrupção individual
FIC - Frequência de interrupção individual
DMIC - Duração máxima de interrupção contínua
DICRI - Duração da interrupção individual em dia crítico

VALOR DO ENCARGO DE USO DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO:
R\$ 34,68

O cliente tem o direito de solicitar a qualquer tempo a apuração dos indicadores DIC, FIC, DMIC e DICRI e também receber uma compensação, caso sejam violadas as metas de continuidade individuais - mensal, trimestral e anual - relativos à unidade consumidora de sua responsabilidade.

ENERGIA ATIVA						ENERGIA REATIVA EXCEDENTE			
Medição Atual Data	Leitura	Medição Anterior Data	Leitura	Const Medidor	Consumo kWh	Nº Dias	Medição Acumulada Atual	Const Medidor	Consumo kWh
16/10/2014	6.628	15/09/2014	6.607	10	210	31			

Data da Emissão: 16/10/2014 Data de Apresentação: 22/10/2014

CÓDIGO DO CLIENTE	CÓDIGO DA INSTALAÇÃO
23184630	0412847722

DESCRIÇÃO	CFOP	UNIDADE	QUANT.	PREÇO UNIT R\$	VALOR R\$
CONSUMO	5.258	kWh	210	0,41440	87,01
CONTRIBUIÇÃO DE ILUMIN PÚBLICA	0000				8,19
Subtotal Faturamento (Veja abaixo)					87,01
Subtotal Outros					8,19

Após o vencimento haverá multa de 2%, juros e atualização de IGP-M, cobrados em conta posterior (Res. ANEEL nº 414 de 09/09/10 e Lei 10.762 de 11/11/2003)

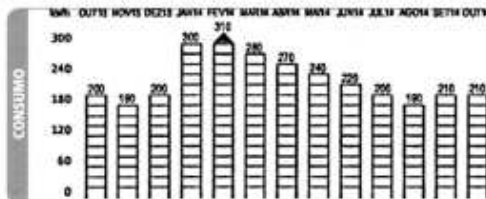
Valor da Energia	Valor da Transmissão	Valor da Distribuição	ICMS R\$	Total da Nota Fiscal R\$
39,59	1,93	22,95	87,01	*****87,01
Encargos Setoriais	Tributos	Total	Alíquota 18%	Valor (já incluído no preço) 15,67
4,54	18,00	87,01		

PTS alíquota 0,470%	COFINS alíquota 2,200%
R\$ 0,40	R\$ 1,91

VENCIMENTO	TOTAL A PAGAR R\$
29/10/2014	*****95,20

Valores já incluídos no preço (PTS - Lei 10.637/02 / COFINS - Lei 10.833/03 / REH ANEEL vigente)

Tarifa em R\$/kWh (sem impostos)
TUSD + TE
0,32974



A partir de 2015 vigorará o sistema de bandeiras tarifárias. A bandeira verde não implicará cobrança adicional. As bandeiras amarela ou vermelha, quando acionadas, implicarão tarifas de maior valor, devido ao maior custo de geração. No mês de Outubro vigorará a bandeira Vermelha, a qual implicará em R\$ 0,030/kWh de acréscimo ao valor da tarifa, líquido de tributos. Mais informações em www.aneel.gov.br

TE - Tarifa de Energia e TUSD - Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição

CONTA EM DÉBITO AUTOMÁTICO

VENCIMENTO	TOTAL A PAGAR	CÓDIGO DO CLIENTE
29/10/2014	*****95,20	23184630
		OUT/2014

Autenticação Mecânica

8366000000.1.95200053100.8.00844822900.8.10040444030.5



01 810 520 04 0756

Figura 2.13

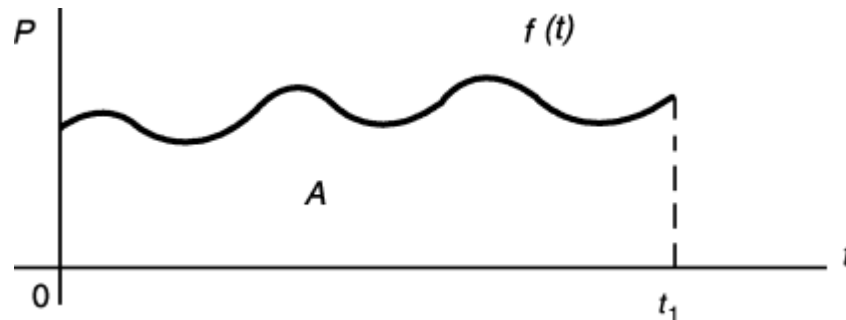
Desejando ter uma noção mais profunda sobre o significado de integração ao longo do tempo, devemos recorrer às definições matemáticas. Recordemos os seguintes conceitos:

- área sob a curva;
- integração entre limites.

A área sob a curva de uma função que varia ao longo do tempo é dada pela expressão:

$$A = \int_0^t P(t) dt.$$

Suponhamos o gráfico a seguir, no qual vemos representada a função $P(t)$ variando ao longo do tempo.

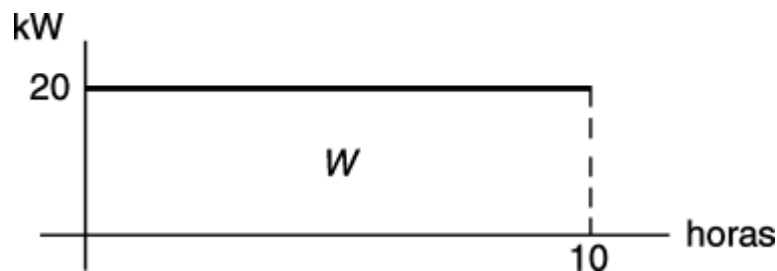


Se quisermos saber a área sob a curva representada pela função $P(t)$, teremos de fazer a integração entre os limites 0 e t_1 desta função.

Também na eletricidade podemos exprimir a variação da potência ao longo do tempo e fazer a integração entre os limites considerados para obtermos a área sob a curva, que representa a energia consumida.

EXEMPLOS

1. Vamos supor que desejemos saber a energia consumida em 10 horas de funcionamento de um forno elétrico que consome a potência constante de 20 kW. Esses dados podem ser representados no seguinte gráfico: Aplicando a expressão matemática, temos:



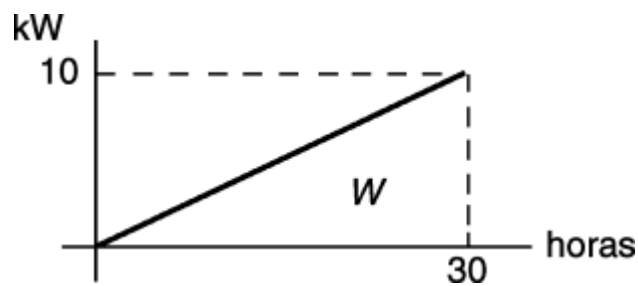
Aplicando a expressão matemática, temos:

$$W = \int_0^{10} P dt = 20[t]_0^{10} = 20 \times 10 = 200 \text{ kWh.}$$

Como temos uma função constante, é fácil saber a área do retângulo representado por W :

$$W = 20 \times 10 = 200 \text{ kWh.}$$

2. Neste exemplo, o valor da potência não é mais constante, ou seja, varia desde zero até um valor qualquer, de modo linear. Seja o gráfico a seguir, no qual temos uma carga variando desde zero até 10 kW em 30 horas.



Aplicando a expressão matemática, temos:

$$W = \int_0^{30} P dt.$$

Agora P não é mais constante, e sim variável com o tempo; segundo a equação de uma reta passando pela origem e com o coeficiente angular de $\frac{10}{30}$ ou $\frac{1}{3}$,

$$P = \frac{1}{3}t.$$

Substituindo na equação, temos:

$$W = \int_0^{30} \frac{1}{3}t dt = \frac{1}{3} \int_0^{30} t dt = \frac{1}{3} \left[\frac{t^2}{2} \right]_0^{30}$$

$$W = \frac{1}{3} \times \frac{900}{2} = 150 \text{ kWh.}$$

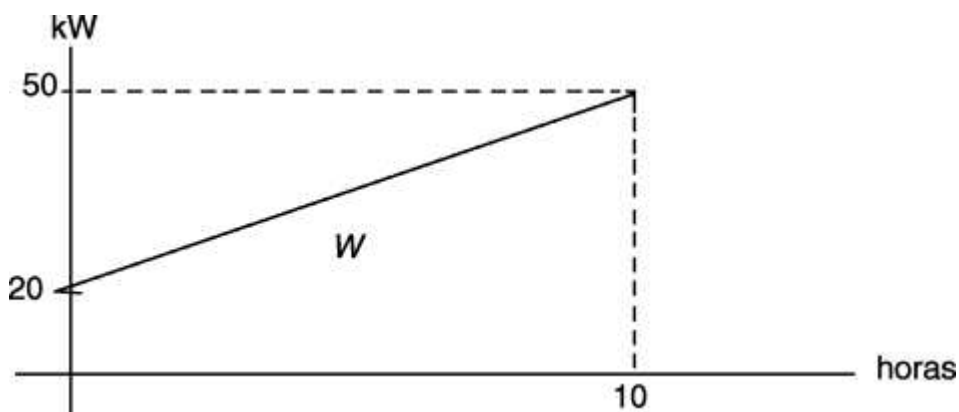
Como se trata de um triângulo, poderíamos obter facilmente este valor calculando a área desta figura geométrica:

$$W = \frac{30 \times 10}{2} = 150 \text{ kWh.}$$

3. Vamos supor um consumidor qualquer que, no tempo $t = 0$ (quando foi iniciada a medição), consumia 20 kW, e, após 10 horas de consumo, a demanda passou, linearmente, para 50 kW.

Qual a energia consumida?

Graficamente, temos a representação do consumo:



A reta que exprime a variação da potência tem a seguinte expressão matemática:

$$W = \int_0^{10} (3t + 20) dt = \left[\frac{3t^2}{2} + 20t \right]_0^{10} = 350 \text{ kWh.}$$

O mesmo resultado será obtido pela área do trapézio: $W = \frac{50 + 20}{2} \times 10 = 350 \text{ kWh.}$

Quando a variação dessa função P não for linear, a integração matemática poderá ficar extremamente difícil, sendo somente resolvida por aproximações.

Em qualquer instalação elétrica, a potência em jogo no circuito é quase sempre variável, em especial considerando-se uma grande instalação como edifícios, bairros, cidades etc.; em cada hora, a potência solicitada dos geradores varia conforme o tipo de consumidor.

2.15 Medidores de Energia

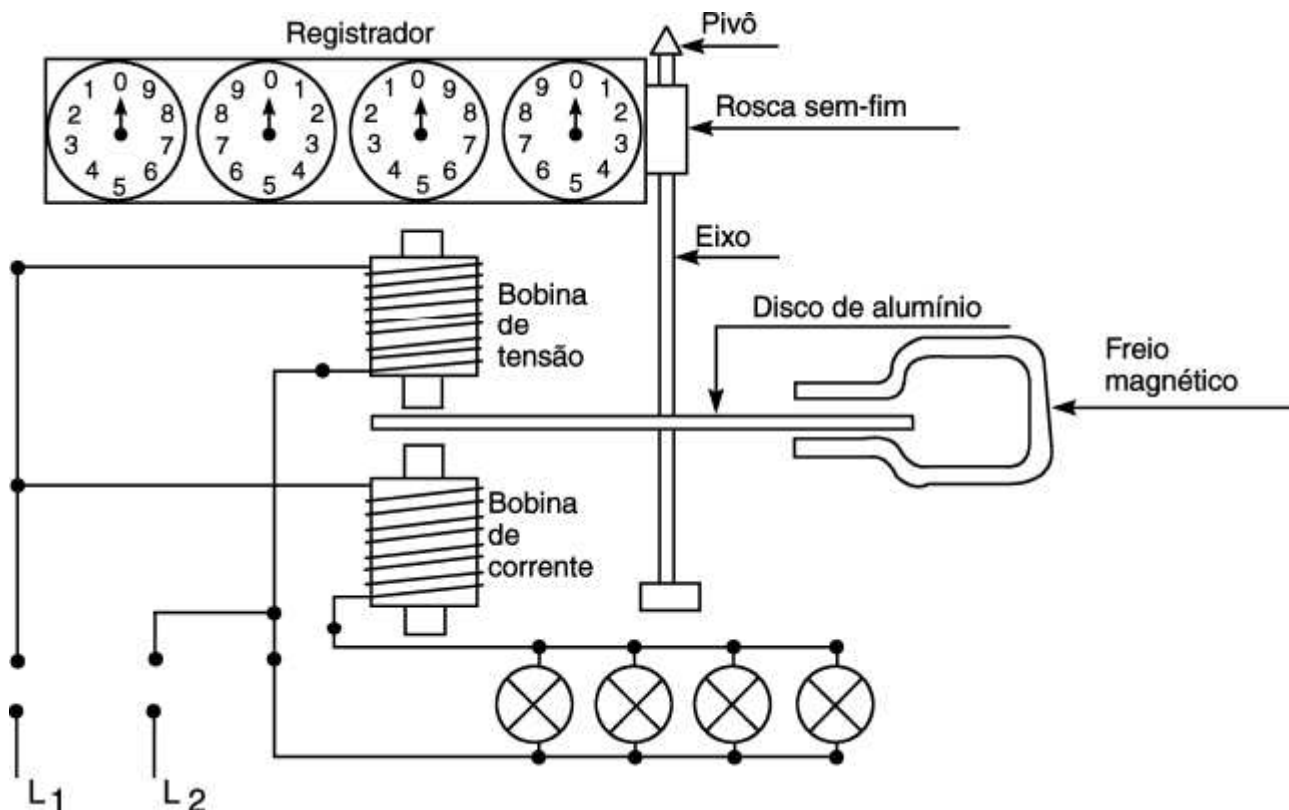
A energia elétrica é medida por instrumentos que se chamam quilowatt-hora-metro, os quais são integradores, ou seja, somam a potência consumida ao longo do tempo.

O princípio de funcionamento do medidor de energia é o mesmo que o de um motor de indução, isto é, os campos gerados pelas bobinas de corrente e de potencial induzem correntes em um disco, provocando a sua rotação (Figura 2.14). Solidário com o disco existe um eixo em conexão com uma rosca sem-fim, que leva à rotação dos registradores, os quais fornecerão a leitura.

Cada fabricante tem características próprias, ou seja, o número de rotações do disco para indicar 1 kWh é variável.

Os quatro mostradores da figura indicam as diferentes grandezas de leitura, isto é, unidades, dezenas, centenas e milhares.

As companhias de eletricidade fazem mensalmente as leituras dos registradores de cada medidor, e essas leituras devem ser subtraídas das leituras do mês anterior para se ter o consumo real do mês. Por exemplo, se no mês de fevereiro a leitura, no fim do mês, for de 5 240 e, no final de janeiro, 5 000, o consumo de energia em fevereiro terá sido de 240 kWh.



Esquema de um quilowatt-hora-metro.

Figura 2.14

Na Figura 2.15, vemos as partes constituintes de um medidor de energia elétrica, a saber:

Base — de ferro fundido;

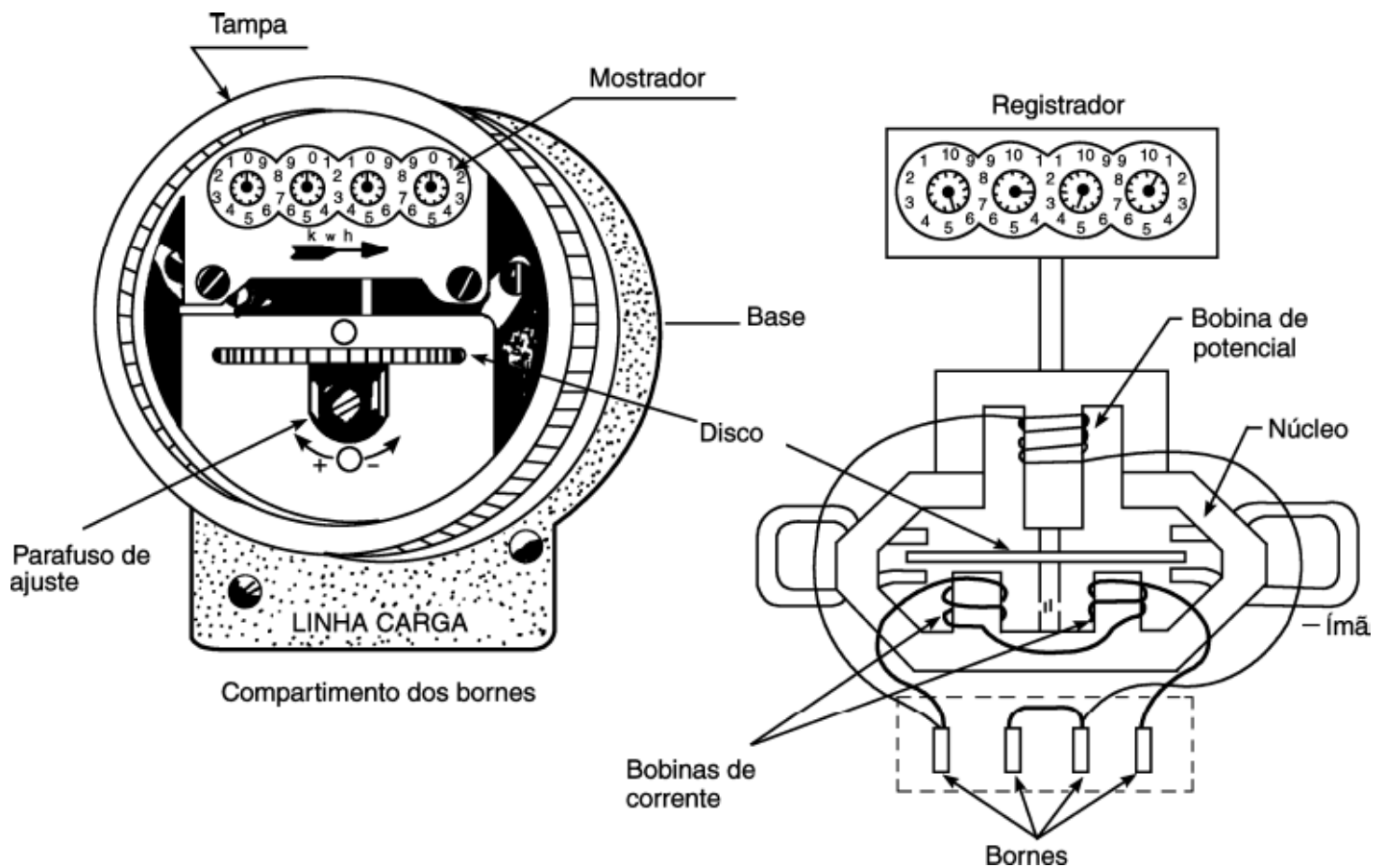
Disco — de alumínio lavrado e com orifícios;

Mostrador — constituído de ponteiros e escala graduada em kWh (está registrando a leitura de 5 240);

Compartimento dos bornes — onde são ligadas a linha e a carga;

Parafuso de ajuste — para regulagem do instrumento.

De modo semelhante ao wattímetro, a bobina de potencial é ligada em paralelo com o circuito, e a bobina de corrente em série, com a carga, de modo a ser percorrida pela corrente total.



Partes constituintes de um medidor de energia.

Figura 2.15

A ligação dos medidores deve obedecer às características particulares do circuito, ou seja, monofásicos (fase 1 + neutro), bifásicos (2 fases + 1 neutro) ou trifásicos (3 fases + 1 neutro).

Na Figura 2.16, vemos a ligação em um circuito monofásico, em um circuito bifásico 1 neutro e em um circuito trifásico.

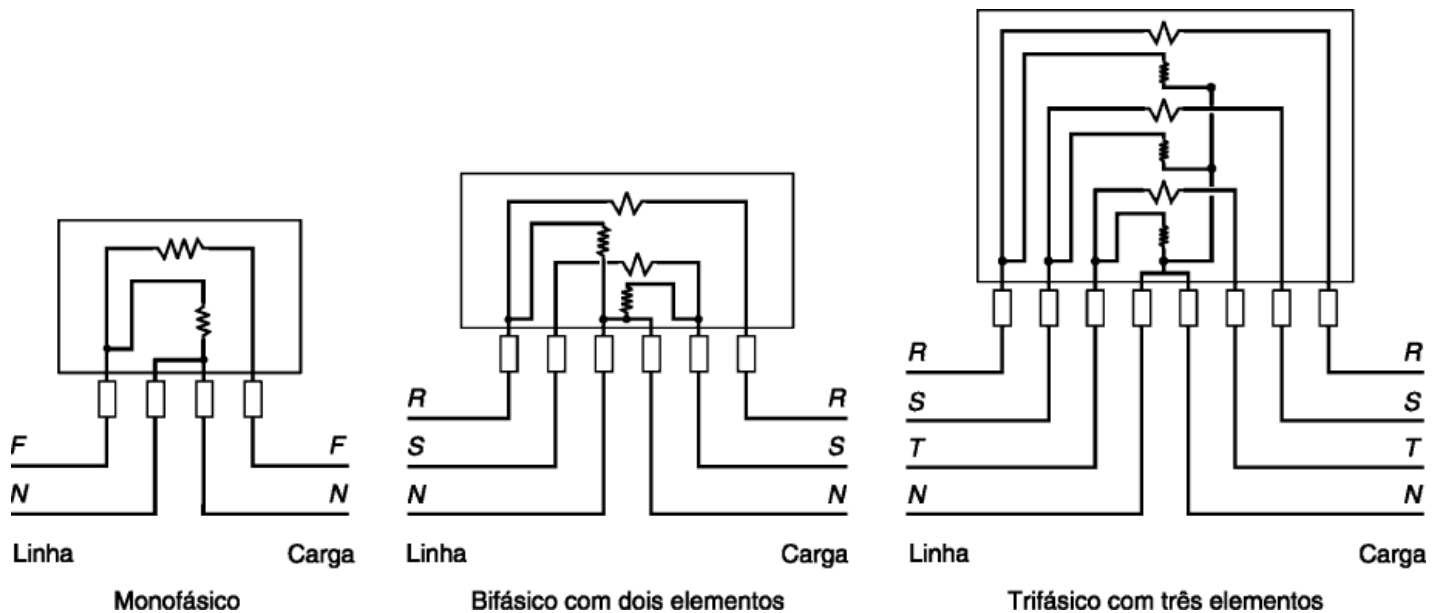
Ao se ligar um medidor de energia, deve-se ler cada instrução do fabricante e observar as características:

Tensão nominal: 120 ou 230 volts;

Corrente nominal: 5, 10, 15 e 30 ampères;

Frequência: 50 ou 60 ciclos;

Número de fios do circuito.



Ligações de medidores de energia.

Figura 2.16

2.16 Economia de Energia Elétrica

Por ser uma energia de alto custo, todo projeto de energia elétrica deve visar à economia.

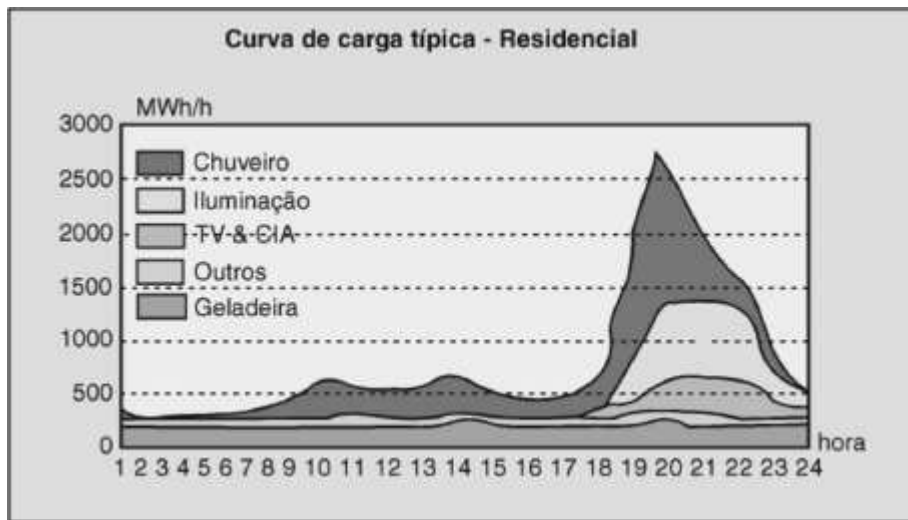
Existe um projeto federal orientando as concessionárias de energia elétrica, bem como seus usuários, para que o consumo seja o mínimo possível. Essa atitude não só possibilita que seja evitado o desperdício no consumo individual dos usuários da energia elétrica (diminuição de despesas), como também minimiza os investimentos na geração, transmissão e distribuição, afetos aos órgãos do governo e de concessionárias.

Tomemos o exemplo do perfil de consumo de energia elétrica, em 2010, da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), uma das principais concessionárias brasileiras. O consumo total da CEMIG foi de 66,2 milhões de MWh, assim distribuídos:

- Residencial → 21%
- Comercial → 13%
- Industrial → 53%
- Rural → 5%
- Outros → 8%

Fonte: Volume de vendas consolidada – Earnings Release/CEMIG H/2010.

Vamos fixar-nos no setor residencial, onde se constata que os maiores consumos referem-se à refrigeração, à iluminação e ao aquecimento de água. A parcela relativa ao aquecimento de água tem o seu “pico” em torno das 19 h, quando o uso do chuveiro elétrico é máximo. Por ser um aquecedor instantâneo de alta potência, o chuveiro elétrico é o maior responsável pelo pico do consumo residencial, conforme se pode ver na figura a seguir:



Se fosse usado outro tipo de aquecedor de água, por exemplo, um aquecedor solar, a energia poderia ser reduzida de 80% para os aquecedores bem instalados e mantidos.

Os consumidores industriais e comerciais têm, nos sistemas de ar condicionado e frio industrial, os maiores consumidores de energia elétrica. Em certas instalações que usam o sistema de circulação de água gelada para os *fan-coils*, há possibilidade de economia, em escala industrial, na produção de gelo no horário das 22 às 7 horas do dia seguinte, e sua utilização para o ar condicionado, no horário comercial (sistema de termoacumulação de energia).

Quanto à iluminação, há possibilidade de grande economia no consumo na utilização de lâmpadas mais econômicas, que todos os fabricantes de lâmpada e luminárias têm oferecido aos consumidores. Outra possível economia em projetos para grandes edifícios comerciais está em se dividir os circuitos de modo que as lâmpadas junto às janelas possam ser ligadas ou desligadas por meio de circuitos com elementos fotossensíveis: em dia claro, até o nível de 250 lux, por exemplo, as lâmpadas permanecem desligadas; em dia escuro ou à noite, os elementos fotossensíveis permitem a ligação dos circuitos.

O Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL) é um programa de governo vinculado ao Ministério de Minas e Energia, que promove o combate ao desperdício de energia elétrica em todo o país.

No quadro a seguir, é visto em quanto o PROCEL, nos anos de 2002 a 2004, economizou em energia elétrica.

Resultados anuais	2002	2003	2004
Redução da demanda de ponta (MW)	309	453	622
Energia total economizada (GWh/ano)	1 270	1 817	2 373
Usina equivalente (MW)	305	436	569
Investimento postergado (bilhões de reais)	1 339	2 007	2 492

2.17 Noções de Magnetismo e Campo Magnético

Magnetismo

Magnetismo é a propriedade que têm certos materiais de atrair pedaços de ferro. Desde a Antiguidade, esse fenômeno é conhecido, admitindo-se que tenha sido descoberto na cidade de Magnésia, na Ásia Menor; daí o nome magnetismo.

Alguns materiais encontrados livres na natureza, como, por exemplo, o minério de ferro Fe_3O_4 – magnetita –, possuem essa propriedade; são os ímãs naturais.

Se aproximarmos um ímã sob a forma de barra a pedaços de ferro (Figura 2.17), notaremos que o ferro adere ao ímã, principalmente nas duas extremidades. Essas extremidades têm o nome de polos, e, experimentalmente, conclui-se que, embora ambos atraiam o ferro, possuem propriedades magnéticas opostas; por isso, foram denominadas polo norte e polo sul.

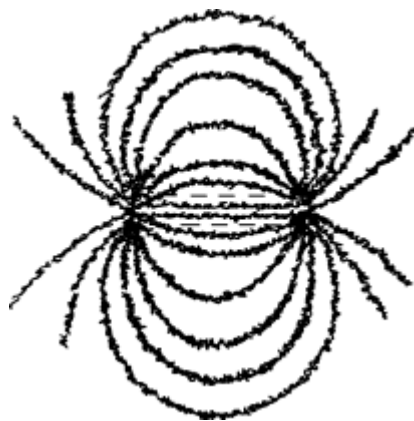
Se aproximarmos duas barras imantadas, ambas suspensas por um fio, verificaremos que elas girarão até que os polos de naturezas contrárias se aproximem. Assim, foi enunciada a regra há muito conhecida:

Polos de nomes contrários se atraem; polos de mesmo nome se repelem.

Os chineses se basearam nessa experiência quando inventaram a bússola, a qual não passa de uma agulha imantada que, podendo girar livremente, aponta para a direção norte-sul da Terra. A razão desse fenômeno reside no fato de a Terra representar um gigantesco ímã, com polo norte e polo sul. Por convenção, adotou-se que o polo norte da agulha aponta para o polo norte terrestre; porém, é sabido que, na realidade, ocorre o contrário. A causa desse fenômeno de atração e repulsão permanece um enigma para a ciência.

Os ímãs sob a forma de ferradura concentram melhor as linhas de força.

Há uma conhecida experiência de se colocar limalha de ferro em uma folha de papel e, do outro lado, aproximar um ímã. O ferro se depositará de modo a indicar as linhas de força do campo magnético do ímã (Figura 2.17).



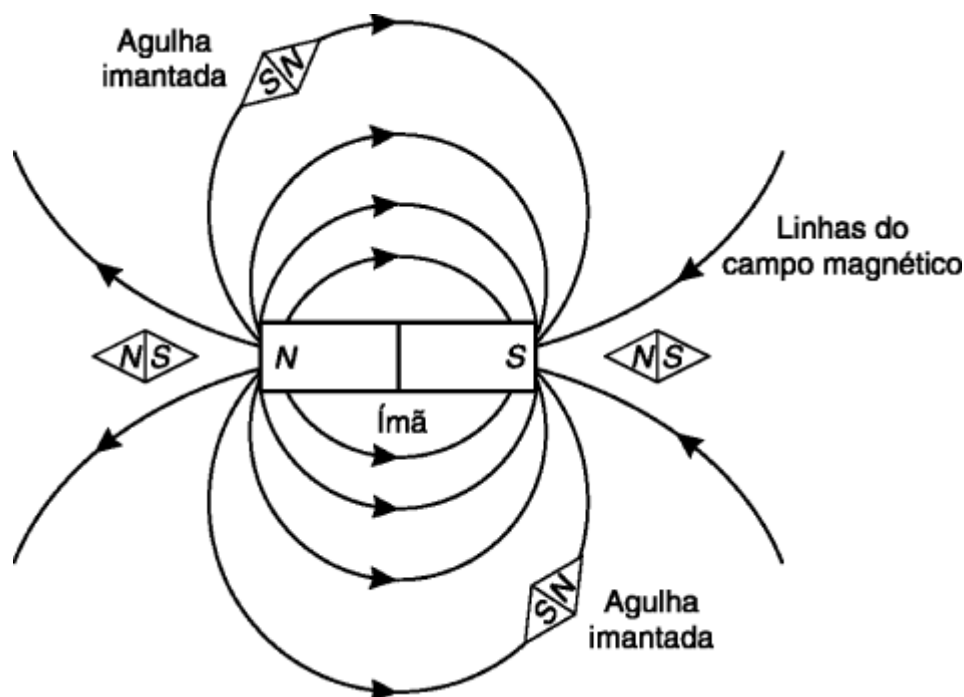
Experiência da limalha de ferro.

Figura 2.17

Campo magnético

Chama-se campo magnético o espaço ao redor do ímã onde se verificam os fenômenos de atração e repulsão.

Se colocarmos uma agulha imantada sob a ação do campo magnético de um ímã, ela se orientará segundo a direção tangente a uma linha de força do campo, conforme mostra a Figura 2.18.



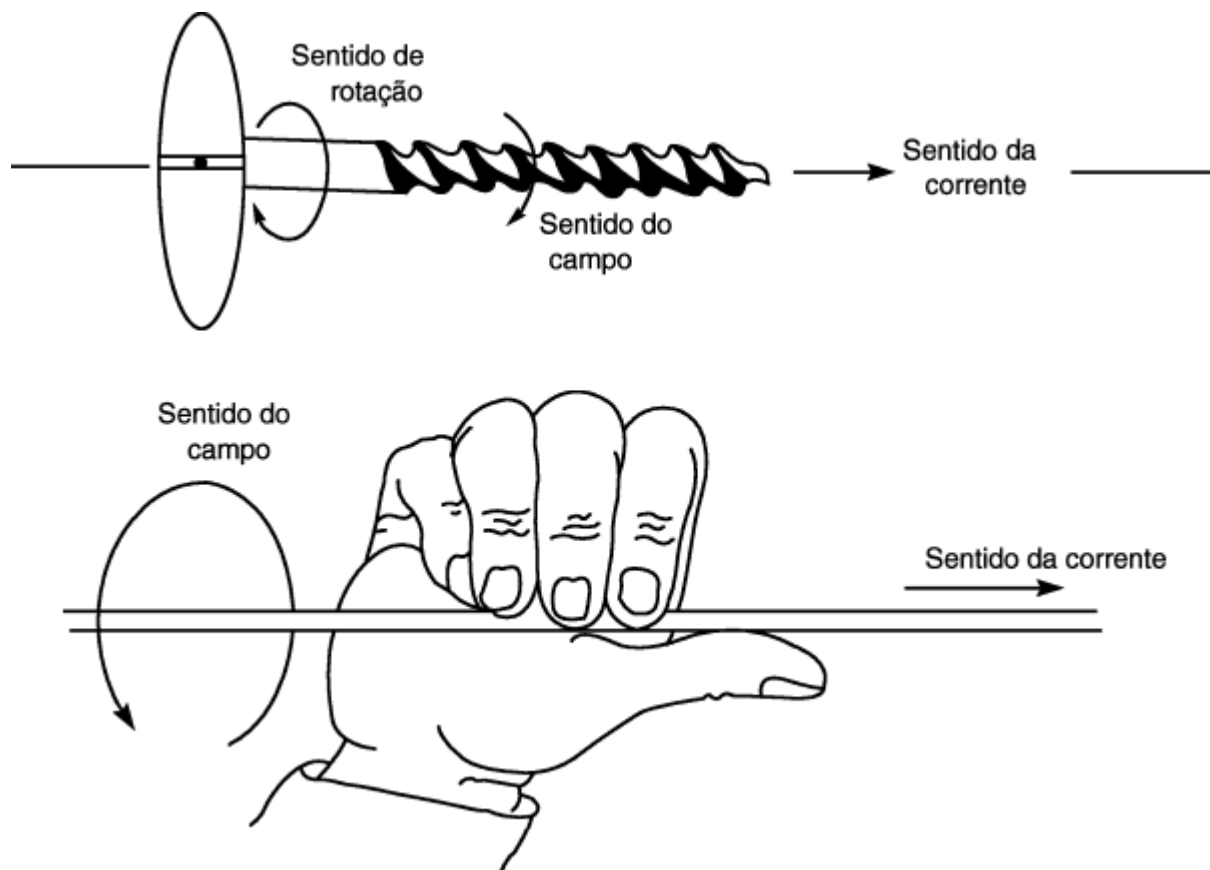
Campo magnético de um ímã permanente.

Figura 2.18

Campo magnético ao redor de um condutor

Pode ser comprovado experimentalmente que, ao redor de um condutor transportando corrente constante, tem origem um campo magnético cujo sentido pode ser determinado.

Na Figura 2.19, vemos um condutor percorrido por uma corrente cuja direção é definida pela regra da mão direita: se o dedo polegar apontar para o sentido da corrente, os demais dedos indicam o sentido do campo.

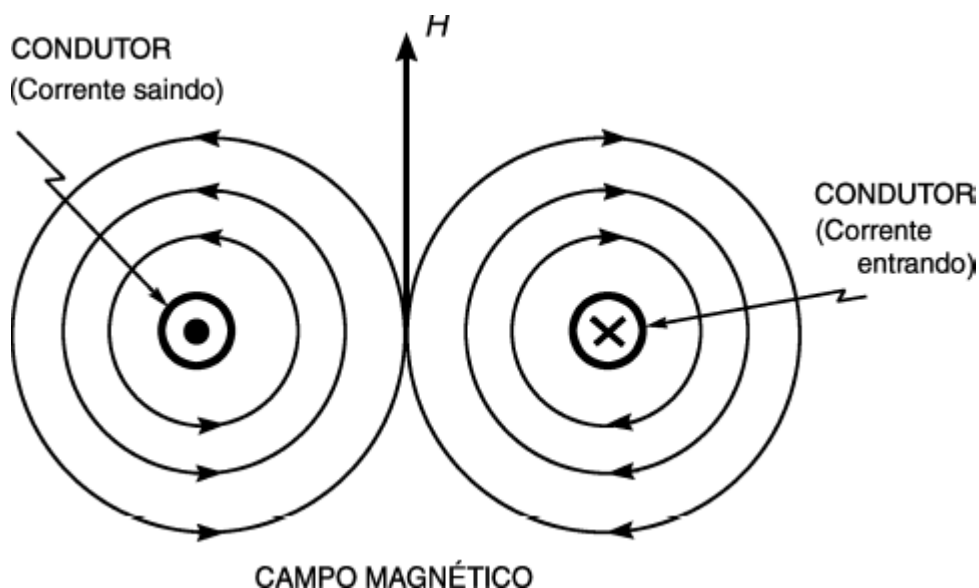


Regra da mão direita.

Figura 2.19

Campo magnético de dois condutores paralelos

A fim de melhor compreendermos o sentido do campo magnético, convencionou-se que, se a corrente elétrica for representada por uma flecha e estiver entrando perpendicularmente ao plano desta folha do livro, a cauda da flecha será um X, e, se estiver saindo da folha, a ponta da flecha será representada por um ponto (Figura 2.20).



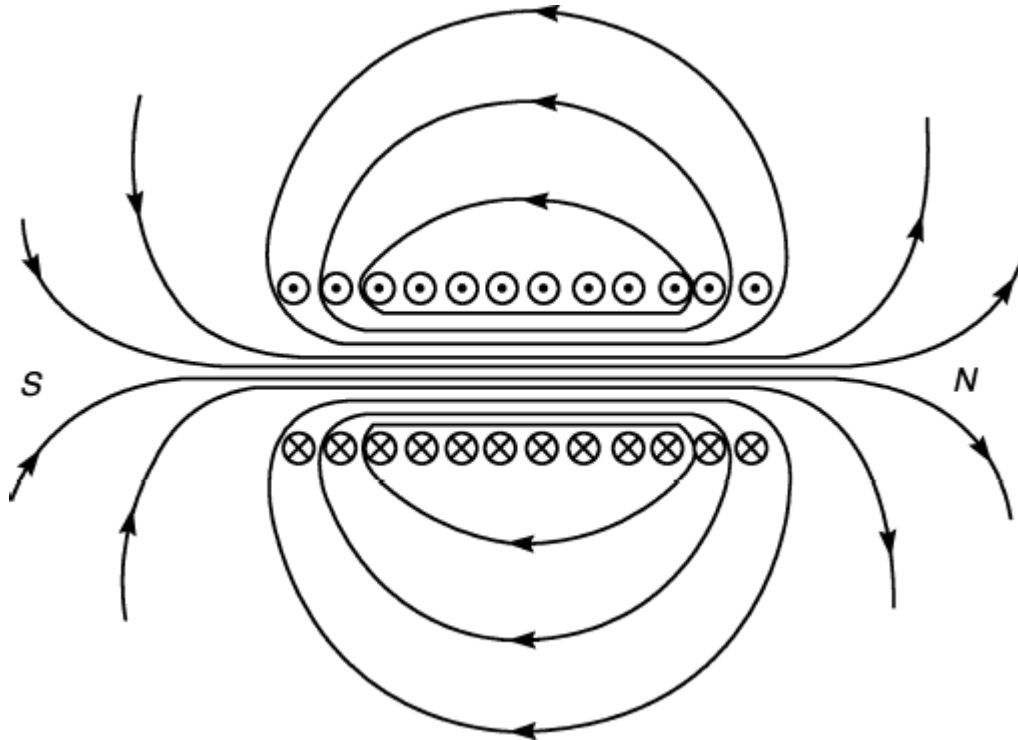
Campo magnético de dois condutores paralelos.

Figura 2.20

Se dois condutores elétricos transportando corrente circulando em sentido contrário são colocados próximos, seus campos magnéticos se somam, como pode ser visto na Figura 2.20. O vetor H representa a resultante das linhas de força dos campos dos dois condutores.

Campo magnético de um solenoide

Um solenoide é uma bobina de fios condutores e isolados em torno de um núcleo de ferro laminado. Como é fácil de ser entendido, os campos dos diversos condutores se somam, e o conjunto se comporta como se fosse um verdadeiro ímã (Figura 2.21).



Campo magnético produzido por um solenoide.

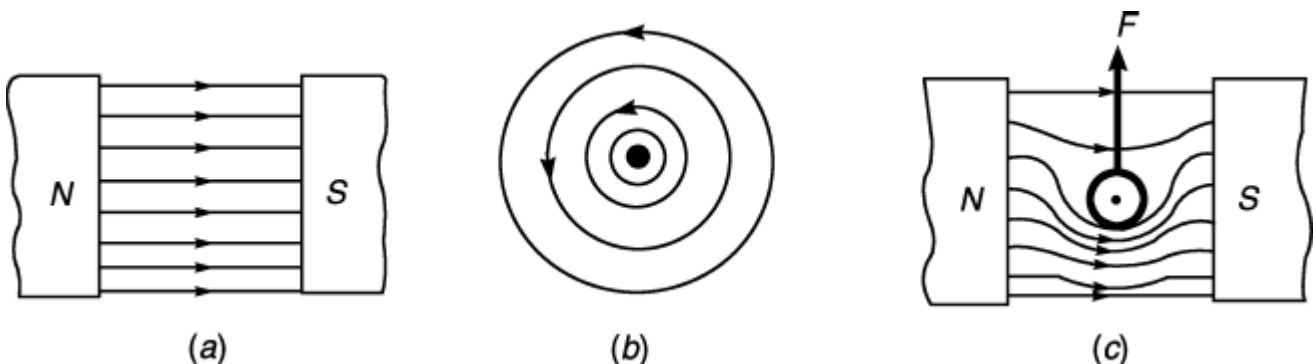
Figura 2.21

Força do campo magnético

Todas as máquinas elétricas rotativas são baseadas nas ações de dois campos magnéticos colocados em posições convenientes.

Imaginemos um condutor percorrido por corrente dentro de um campo magnético de um ímã e, para um melhor entendimento, consideremos os campos isolados (Figura 2.22).

Em (a), vemos o campo magnético do ímã; em (b), a corrente saindo do plano da figura. O condutor sob a ação do campo tende a ser lançado para cima, no sentido indicado por F , como se as linhas do campo do ímã se comportassem como um elástico empurrando-o neste sentido.



Força (F) sobre um condutor que transporta corrente dentro de um campo magnético.

Figura 2.22

O sentido do movimento do condutor pode ser determinado pela regra da mão esquerda do seguinte modo: com os dedos do polegar, indicador e médio colocados no ângulo reto entre si, o dedo médio apontado no sentido da corrente no condutor e o indicador no sentido do campo magnético, o polegar indicará o sentido de movimento do condutor.

2.18 Processos de Geração de Força Eletromotriz – F.E.M.

Há seis processos principais para a geração de f.e.m.

- | | |
|---------------------------------|--|
| 1) Por atrito. | Ex.: gerador de Van de Graff; |
| 2) Por ação química. | Ex.: baterias, pilhas e célula combustível; |
| 3) Por ação de luz. | Ex.: geração fotovoltaica; |
| 4) Por ação térmica. | Ex.: par termelétrico; |
| 5) Por compressão. | Ex.: microfones e medidores de grande pressão; |
| 6) Por indução eletromagnética. | Ex.: geradores elétricos. |

O primeiro processo é utilizado em laboratórios para ensaios de isolamento e dielétricos de equipamentos elétricos.

O segundo processo é usado para a produção de corrente contínua e de emprego em pequenas potências, sendo que a célula combustível, ainda em fase de desenvolvimento, poderá ser utilizada na substituição das baterias nos carros elétricos.

O terceiro processo é o da célula fotovoltaica, que gera eletricidade a partir da luz solar.

O quarto processo é empregado para fins específicos, como, por exemplo, instrumentos de medida de temperatura de fornos.

O quinto processo é utilizado em medidores de grande pressão.

O sexto processo é o empregado na produção comercial de energia elétrica oriunda das grandes centrais hidrelétricas ou termelétricas que abastecem todos os consumidores de energia elétrica.

2.19 Indução Eletromagnética

Vimos que um condutor percorrido por uma corrente elétrica dentro de um campo magnético tende a se deslocar sob a ação de uma força F que se origina da reação entre os dois campos. Inversamente, se aplicarmos a mesma força F no mesmo condutor dentro do campo, neste condutor terá origem uma f.e.m. induzida (Figura 2.23).

É fato provado experimentalmente que, quanto maior a intensidade do campo e maior a velocidade com que as linhas de indução são cortadas pelo condutor, tanto maior será a f.e.m. induzida. Nesse princípio simples se baseia a geração de energia elétrica em larga escala que ilumina cidades e movimenta a vida moderna.

A geração da f.e.m. induzida é regida pela lei de Faraday, que diz:

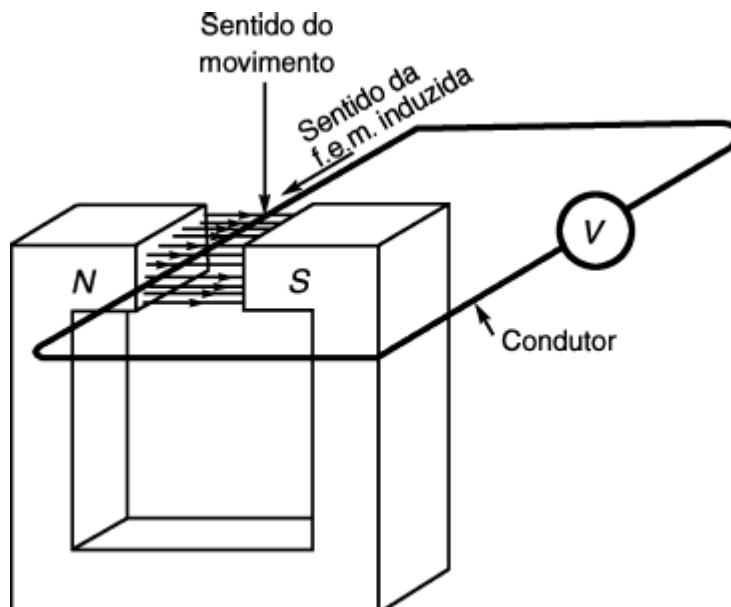


Figura 2.23

A f.e.m. induzida é proporcional ao número de espiras e à rapidez com que o fluxo magnético varia.

Assim:

$$\epsilon = -N \frac{d\phi}{dt} \times 10^{-8}$$

ϵ = f.e.m. em volts;

N = número de espiras;

$\phi = B \times A$ = fluxo magnético em weber;

B = indução magnética em tesla;

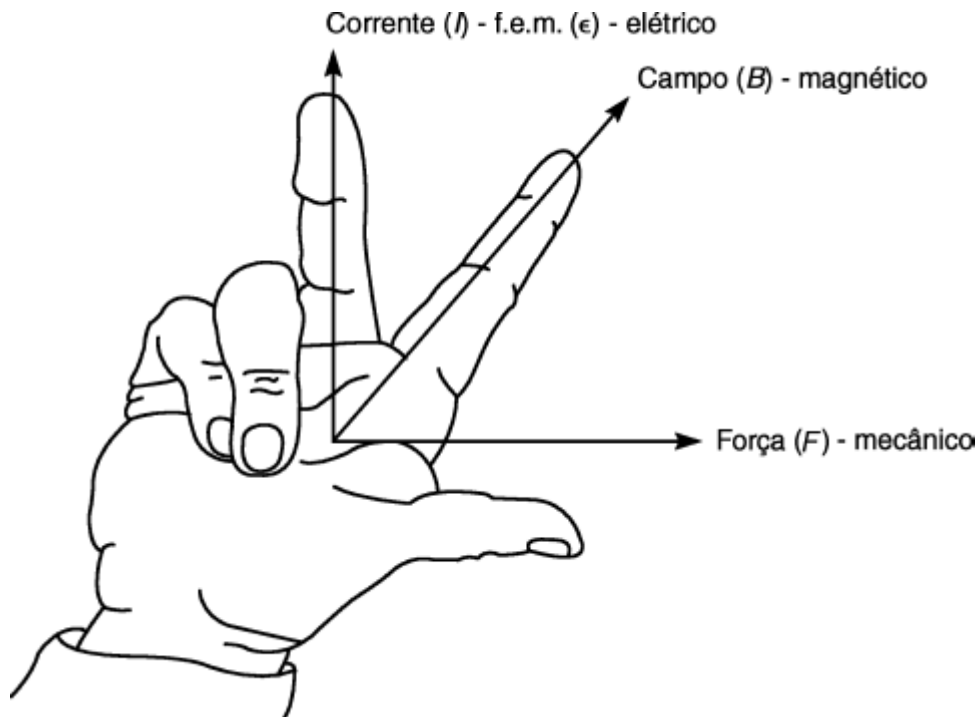
A = área em m²;

$\frac{d\phi}{dt}$ = variação do fluxo magnético;

(-) = o sinal (-) significa que o sentido da tensão induzida é contrário à causa que o produz (lei de Lenz).

Sentido da f.e.m. induzida

Segundo a conhecida regra da mão direita, é possível se determinar o sentido da f.e.m. induzida do seguinte modo: dispõe-se a mão direita de maneira a que os dedos polegar, indicador e médio formem ângulos retos entre si (Figura 2.24). Se o polegar mostrar o sentido da força aplicada ao condutor, e o indicador, o sentido do campo, o dedo médio mostrará o sentido da f.e.m. induzida.



Regra da mão direita.

Figura 2.24

Indução magnética - B

A indução magnética de um campo em um ponto qualquer é medida pela capacidade em induzir f.e.m. em um condutor que se desloque no campo. Se o condutor tem 1 metro de comprimento, a velocidade de deslocamento de 1 metro por segundo e a f.e.m. induzida de 1 volt, a indução magnética é de 1 weber por metro quadrado.

Fluxo magnético

O fluxo magnético ϕ uniforme é o produto da indução pela área:

$$\phi = B \times A$$

ϕ = fluxo em weber;

B = indução em weber por metro quadrado;

A = área em metro quadrado.

2.20 Força Eletromotriz (F.E.M.)

O conceito de força eletromotriz é muito importante para o entendimento de certos fenômenos elétricos. Pode ser definida como a energia não elétrica transformada em energia elétrica, ou vice-versa, por unidade de carga.³

Assim, se temos um gerador movido a energia hidráulica, por exemplo, com energia de 1 000 joules e dando origem ao deslocamento de 10 coulombs de carga elétrica, a força eletromotriz será:

$$\text{f.e.m.} = \frac{1000 \text{ joules}}{10 \text{ coulombs}} \quad \text{ou} \quad 100 \frac{\text{joules}}{\text{coulombs}}$$

ou, generalizando:

$$\epsilon = \frac{dw}{dq}$$

em que:

ϵ = f.e.m. em volts;

dw = energia aplicada em joules;

dq = carga deslocada em coulombs.

Esta relação $\frac{\text{joule}}{\text{coulomb}}$ foi denominada volt em homenagem a Volta, o descobridor da pilha elétrica.

No exemplo acima, a f.e.m. do gerador será de 100 volts.

Analogamente, se a fonte for uma bateria, a energia química de seus componentes se transformará em energia elétrica, constituindo a bateria um gerador de f.e.m. (energia não elétrica se transformando em energia elétrica).

No caso oposto, ou seja, uma bateria submetida à carga de um gerador de corrente contínua, a energia elétrica do gerador se transformará em energia química na bateria.

Veremos adiante que f.e.m. e diferença de potencial (d.d.p.) são expressas pela mesma unidade: volt; por isso, são muitas vezes confundidas, embora o conceito seja diferente.

No gerador, a f.e.m. de origem mecânica provoca uma diferença de potencial nos seus terminais.

Temos:

$$\epsilon = RI + rI = I(R + r)$$

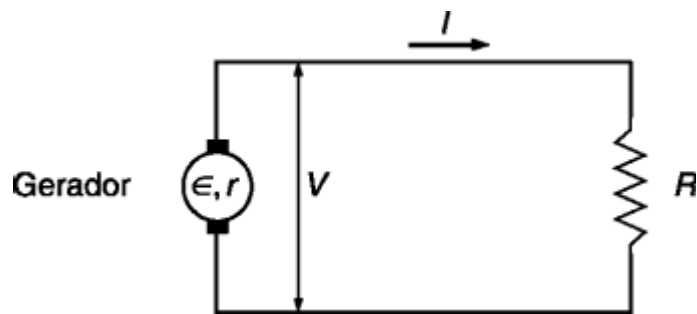
ϵ = f.e.m.;

V = d.d.p.;

I = corrente;

$V = RI$ = queda no circuito externo;

rI = queda interna.



Circuito gerador.

Figura 2.25

$$\boxed{\epsilon = V + rI.}$$

No motor, a d.d.p. provoca uma força eletromotriz de sentido contrário à d.d.p., motivo pelo qual é chamada de força contraeletromotriz.

Temos:

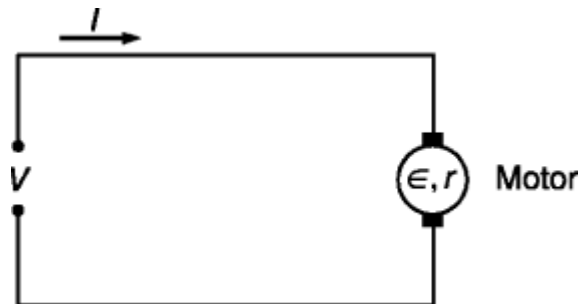
$$\epsilon = V - rI \text{ ou}$$

$$\boxed{V = \epsilon + rI.}$$

Como rI é, muitas vezes, desprezível, para fins práticos consideramos ϵ e V iguais.

Na bateria fornecendo carga, a f.e.m. de origem química provoca a d.d.p. entre os terminais (+) e (-).

Na bateria recebendo carga, a f.e.m. do gerador acumula-se em energia química.



Circuito motor.

Figura 2.26

2.21 Corrente Contínua e Corrente Alternada

Há dois tipos básicos de corrente ou tensão elétricas de aplicação generalizada: corrente ou tensão contínua e corrente ou tensão alternada.

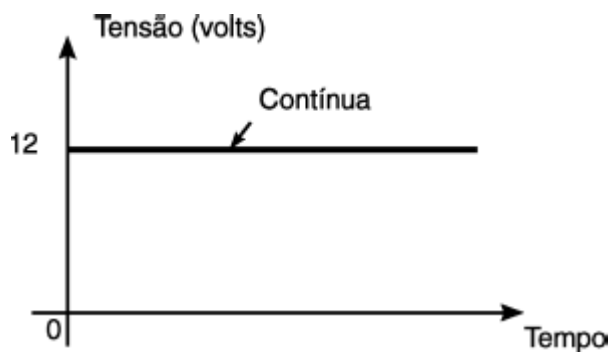


Gráfico da tensão de uma bateria de automóvel de 12 volts.

Figura 2.27

Tensão contínua é aquela cujo valor e cuja direção não se alteram ao longo do tempo.

A tensão pode ser expressa pelo gráfico da Figura 2.27, onde vemos representados, no eixo horizontal, os tempos e, no eixo vertical, a amplitude das tensões.

Como exemplo de fontes de corrente ou tensão contínuas, temos as pilhas, as baterias e os dínamos.

Na corrente ou tensão alternada, temos, ao contrário, a tensão variando de acordo com o tempo. Podemos definir:

Corrente alternada é uma corrente oscilatória que cresce de amplitude em relação ao tempo, segundo uma lei definida.

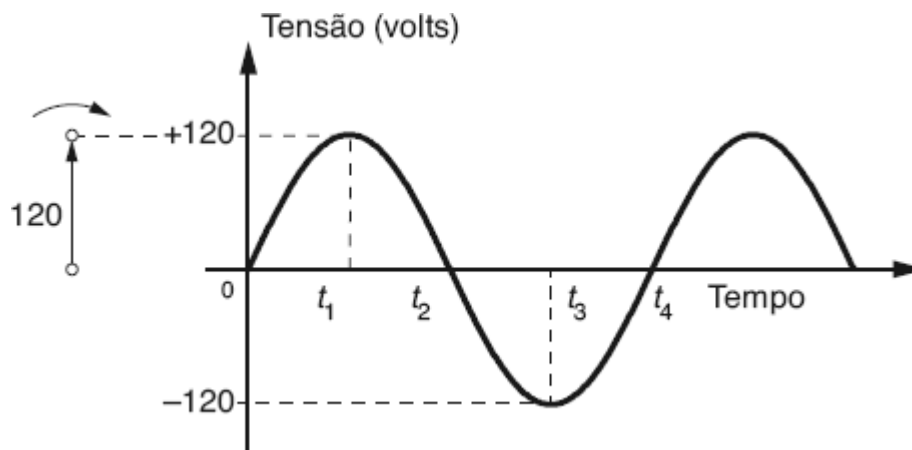


Gráfico de uma tensão alternada.

Figura 2.28

Na Figura 2.28, vemos um exemplo de corrente alternada na qual a tensão varia desde zero até um valor máximo positivo de 120 volts, no tempo t_1 ; depois, inicia-se a diminuição até o valor zero, no tempo t_2 ; posteriormente, aumenta no sentido negativo até 120 volts, em t_3 , e se anula, novamente, em t_4 .

Esse conjunto de valores positivos e negativos constitui o que chamamos de um ciclo, e, na corrente de que dispomos em nossa casa, ocorre 60 vezes em um segundo, ou seja, 60 ciclos por segundo ou 60 hertz.

Os mais curiosos fariam logo a seguinte pergunta: “Então quer dizer que a nossa luz apaga e acende cerca de 120 vezes em um segundo?”. Exatamente. Porém, nessa velocidade, não se percebe visualmente esse rápido piscar-piscar porque o filamento da lâmpada nem chega a se apagar por completo. Na luz fluorescente, a qual funciona por meio de outro princípio que veremos mais adiante, esse “piscar-piscar” pode representar até um perigo, pois em salas que possuem algum tipo de máquina rotativa – como, por exemplo, um ventilador –, é possível termos a sensação de que ela está parada, se estiver girando na mesma velocidade que o “piscar-piscar” da corrente, e uma pessoa distraída pode sofrer um acidente ao tocar nela. Esse fenômeno se chama “efeito estroboscópico”.

Do exposto, temos as seguintes definições:

Período é o tempo necessário à realização de um ciclo.

Ou seja:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (1)$$

T = período em segundos;

π = 3,14;

ω = radianos por segundo (velocidade angular).

Frequência é o número de ciclos por segundo.

A frequência e o período são inversos um do outro.

Assim:

$$f = \frac{1}{T}$$

Substituindo esses valores na expressão (1), temos:

$$\omega = 2\pi f$$

Como dissemos que a frequência da corrente alternada de que dispomos em nossas casas é de 60 ciclos por segundo, o valor da velocidade angular será:

$$\omega = 2 \times 3,14 \times 60 = 377 \text{ radianos por segundo.}$$

As frequências de um sistema elétrico de luz e força são consideradas muito baixas, porém em sistemas de transmissões de rádio e TV são altas; por isso, são medidas em quilociclos/segundo ou megaciclos/segundo. São usuais as expressões quilo-hertz e megahertz.

Assim:

1 quilo-hertz = 1 000 hertz ou 1 000 ciclos/s;

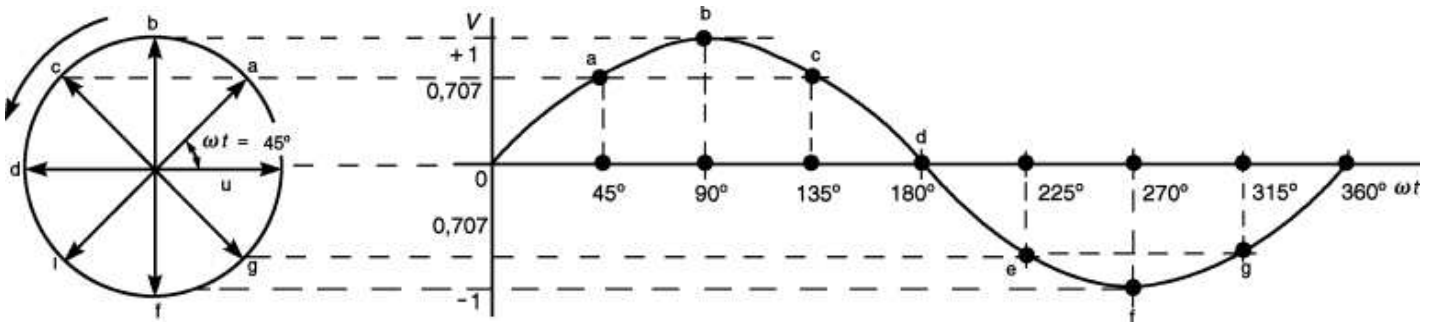
1 mega-hertz = 1 000 000 hertz ou 1 000 000 ciclos/s.

2.21.1 Ondas senoidais

Vejamos como é traçado o gráfico de uma onda senoidal (Figura 2.29) de uma tensão $v = V_m \text{ sen } \omega t$.

À esquerda da figura, vemos um vetor que representa a intensidade de uma tensão alternada, traçado em escala (por exemplo: 1 cm = 1 V).

Este vetor vai girar no sentido contrário ao dos ponteiros do relógio, ocupando a sua extremidade diferentes posições a partir do zero, e estas posições são medidas por valores angulares ωt . À direita da figura, vamos registrando os valores das projeções do vetor sobre o eixo vertical em relação aos valores angulares ωt .



Como desenhar uma onda senoidal.

Figura 2.29

Assim, temos a lista de valores:

ωt	v	Posição
0	0	0
45°	+0,707	a
90°	+1	b
135°	+0,707	c
180°	0	d

225°	-0,707	e
270°	-1	f
315°	-0,707	g
360°	0	h

2.21.2 Valor eficaz ou rms – root mean square

Por definição, uma função periódica no tempo tem a forma:

$$f(t + T) = f(t)$$

em que T é o período em segundos.

A corrente apresentada na Figura 2.30 é periódica com período $T = \frac{2\pi}{\omega}$, e sua equação é:

$$i = 10 \cos \omega \left(t + \frac{2\pi}{\omega} \right) = 10 \cos(\omega t + 2\pi) = 10 \cos \omega t.$$

Por definição, o valor médio de uma potência variável é o valor médio da potência que, no período T , transfere a mesma energia W . Assim:

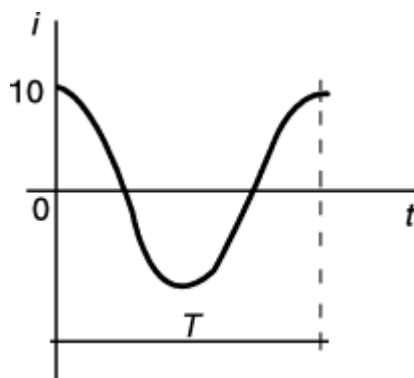
$$P_{\text{médio}} \times T = \int_t^{t+T} p dt = \int_0^T p dt.$$

É definido que a corrente eficaz I_e é aquela corrente constante que, no momento de tempo, produz uma mesma quantidade de calor que uma corrente variável ($i = I_m \text{ sen } \omega t$) em uma mesma resistência R .

Sabemos que a quantidade de calor dissipada por unidade de tempo em uma resistência R , percorrida por uma corrente alternada $i = I_m \text{ sen } \omega t$, é:

$$P = Ri^2 = R(I_m \text{ sen } \omega t)^2 = RI_m^2 \text{ sen } \omega t$$

em que: $I_m = I_{\text{máximo}}$



Corrente periódica.

Figura 2.30

A energia sob a forma de calor dissipada na resistência R em um intervalo de tempo T igual a um período é:

$$E = P_{\text{médio}} T = \int_0^T Ri^2 dt = RI_m^2 \int_0^T \text{sen}^2(\omega t) dt = RI_m^2 \frac{1}{2} T.$$

Como a energia dissipada por uma corrente de intensidade constante I_{ef} durante o mesmo intervalo de tempo é:

$$E_1 = RI_{ef}^2 T$$

pela definição de I_{ef} , essas quantidades de energia são iguais. Assim:

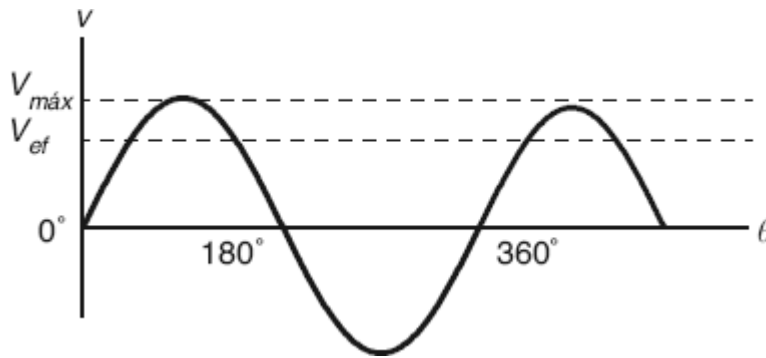
$$E_1 = E; \quad \text{então:} \quad RI_{ef}^2 T = RI_m^2 \frac{1}{2} T$$

em que podemos concluir que:

$$I_{ef} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}.$$

ou seja, uma corrente que varia senoidalmente tem o seu valor eficaz igual ao seu valor máximo (I_m) multiplicado por $1/\sqrt{2}$ ou por 0,707. Por analogia, como indicado na Figura 2.31,

$$V_{ef} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}, \quad \text{em que} \quad V_m = V_{\text{máximo}}.$$



Valor eficaz (rms).

Figura 2.31

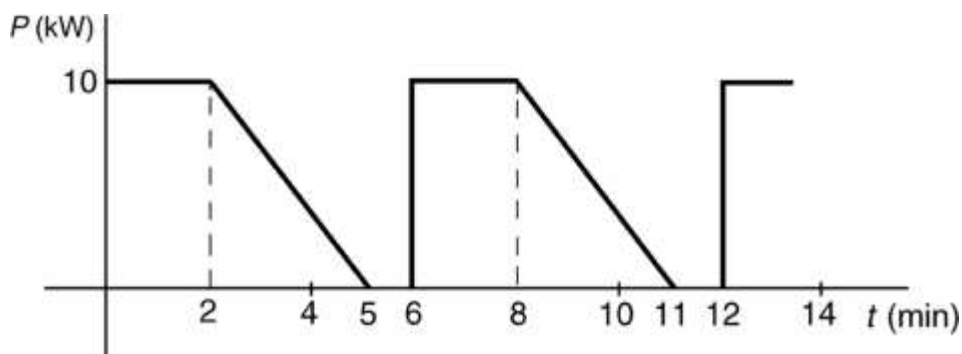
2.21.3 Aplicação do valor eficaz ou rms

O valor nominal de muitos equipamentos elétricos ou mecânicos é baseado no valor rms; por exemplo: motores elétricos com carga variável; motores de automóvel com potência de 300 cv devem ter a capacidade de aceleração de 0 a 80 km/h em 2,4 s; um motor de caminhão ou motor elétrico tem a sua potência nominal baseada em um uso contínuo, sob um longo período de tempo sem uso excessivo.

Um motor elétrico de 50 cv pode desenvolver duas ou três vezes essa potência por curtos períodos. Se operado em sobrecarga por longos períodos, as excessivas perdas (proporcionais a i^2R) aumentam a temperatura de operação, e o isolamento, em curto tempo, danifica-se.

EXEMPLO

Um motor elétrico deve ser especificado para uma carga variável com o tempo, de acordo com a Figura 2.32.



Dados do exemplo.

Figura 2.32

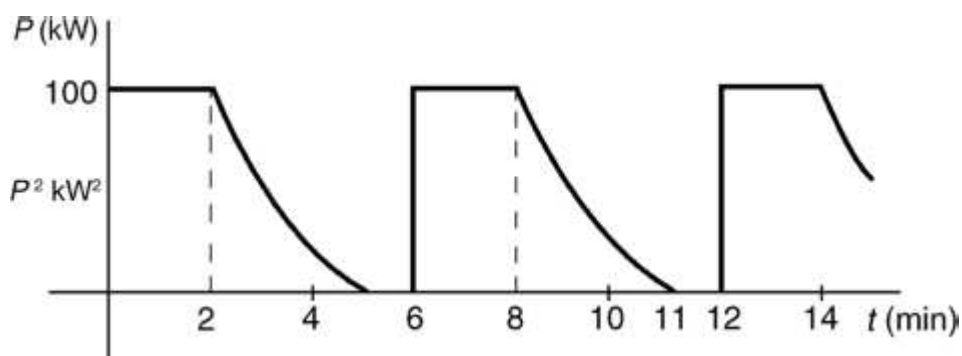
A potência de 10 kW é exigida por 2 minutos e, depois, decai linearmente até os próximos 3 minutos; em seguida, descansa por 1 minuto, e, então, o ciclo se repete.

Solução

Devemos então calcular a potência rms:

$$P_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T} \sum (\text{kW})^2 \times \text{tempo.}}$$

Para isso, precisamos calcular a área sob a curva $(\text{kW})^2 \times \text{tempo}$. A curva $(\text{kW})^2$ é a seguinte, apresentada na Figura 2.33:



Resposta.

Figura 2.33

Observação:

A área sob a parábola é 1/3 da área do retângulo incluso. A área parabólica é $100 (\text{kW})^2 \times \frac{3 \text{ min}}{3}$.

$$P_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{6} \sum \left(100 \times 2 + \frac{3}{3} \times 100 \right)} = \sqrt{50} = 7,07 \text{ kW.}$$

2.23 Circuitos de Corrente Alternada em Regime Permanente

Já vimos que o fenômeno de indução eletromagnética é o responsável pela produção da energia elétrica que vai abastecer as grandes cidades. Pelo fato de a produção se basear em geradores rotativos, a tensão gerada começa de zero, passa por valor máximo positivo, anula-se e, depois, passa por máximo negativo, e novamente se anula, dando origem a um ciclo. Pode-se representar pela senoide (Figura 2.29) essa tensão alternada gerada. v

$$v = V_m \text{ sen } \omega t$$

v = valor instantâneo da tensão;

V_m = valor máximo da tensão;

ω = velocidade angular em radianos por segundo; $\omega = 2\pi f$;

t = tempo em segundos.

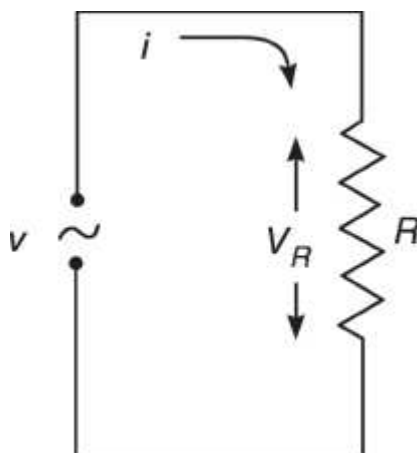
f = frequência em c/s ou Hz.

2.22.1 Circuito puramente resistivo – R

Vejamos uma onda senoidal aplicada em um circuito que só tem resistência (Figura 2.34); por exemplo: chuveiros, aquecedores, fornos etc.

Pela lei de Ohm:

$$V_R = Ri \quad \text{ou} \quad i = \frac{V_R}{R} = \frac{V_m}{R} \text{sen } \omega t \quad \text{ou} \quad i = I_m \text{sen } \omega t.$$

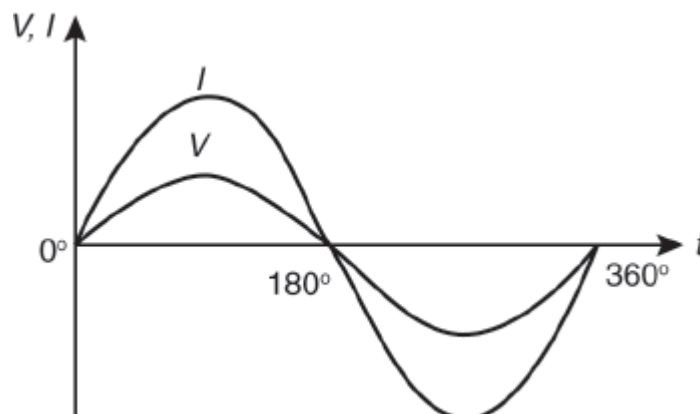


Circuito resistivo.

Figura 2.34

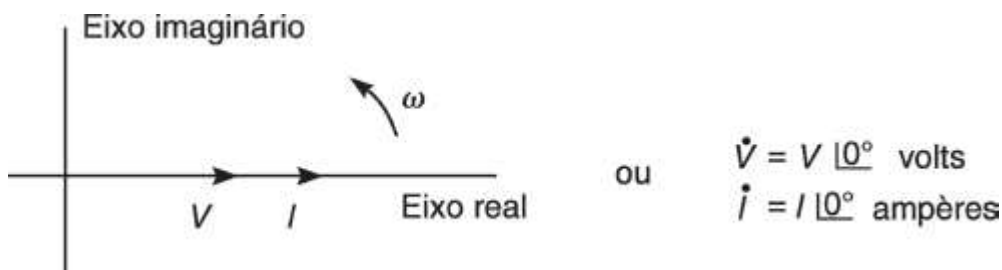
Então, conclui-se que a tensão e a corrente estão em fase, ou seja, atingem os máximos e mínimos ao mesmo tempo. Podemos, desse modo, representá-las pela Figura 2.35.

A representação por vetores (fasores) rotativos na velocidade angular ω será:



Tensão e corrente em fase.

Figura 2.35



Tensão e corrente em fase (representação fasorial).

Figura 2.36

Esses vetores rotativos giram no sentido anti-horário e, com base nas fórmulas de Euler, podem expressar as projeções no eixo real e no eixo imaginário:

$$V \cdot e^{j\theta} = V(\cos \theta + j \sin \theta), \quad \text{em que } e^{j\theta} \text{ é o "fasor".}$$

No circuito resistivo, não há defasagem, ou seja, $\theta = 0^\circ$. Para simplificar, os símbolos V e I representam “valores eficazes”, como veremos adiante.

No circuito resistivo, a corrente é o quociente da tensão pela resistência R .

2.22.2 Circuito permanente indutivo – L

Agora veremos o circuito indutivo puro, isto é, a tensão instantânea aplicada em uma indutância L (Figura 2.37):

$$v_L = L \frac{di}{dt}. \quad (2)$$

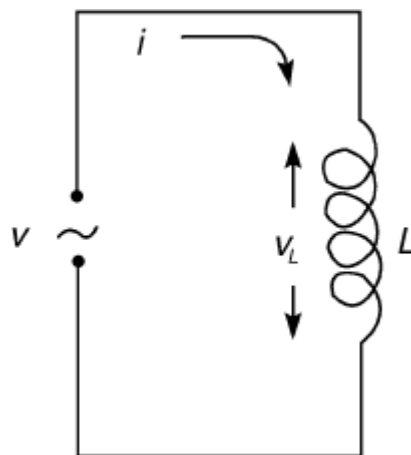
Ou seja, a tensão é função da variação da corrente e da indutância L . A corrente instantânea é:

$$i = I_m \sin \omega t; \quad \text{então, derivando, a Equação (2) dará:}$$

$$v_L = \omega L I_m \cos \omega t.$$

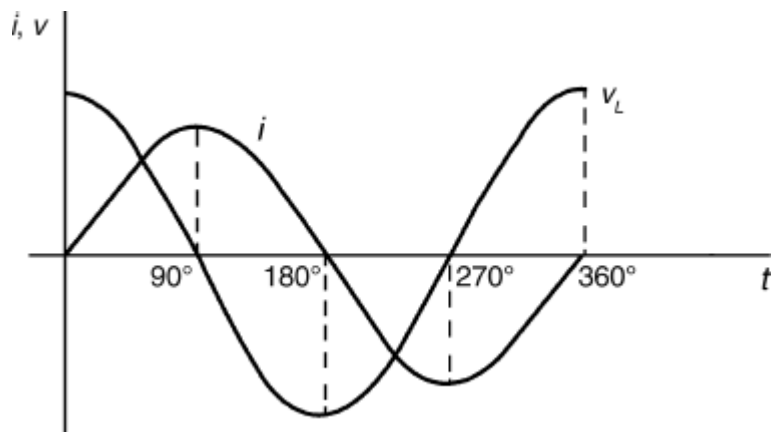
A parcela ωL é a reatância indutiva: $X_L = \omega L$.

A representação em função do tempo será:



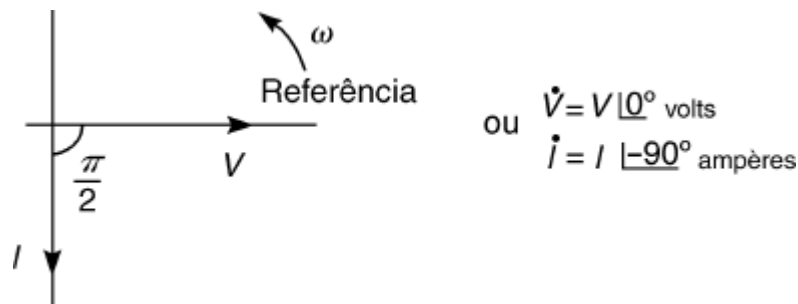
Circuito indutivo.

Figura 2.37



Tensão avançada de 90° sobre a corrente. Representação fasorial.

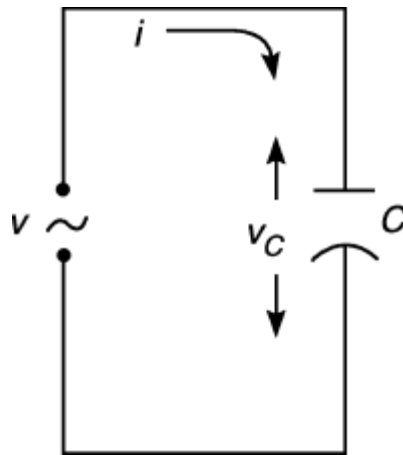
Figura 2.38A



Tensão avançada de 90° em relação à corrente.

Figura 2.38B

Então, a tensão v estará avançada de 90° ou $\frac{\pi}{2}$ em relação à corrente i . Como exemplos de circuitos indutivos, temos: motores, reatores, bobinas, transformadores etc. Na prática, a defasagem é menor que 90° , porque há que se considerar a resistência ôhmica.



Circuito capacitivo.

Figura 2.39

2.22.3 Circuito puramente capacitivo – C

No circuito capacitivo da Figura 2.39, temos a tensão v_c :

$$v_c = \frac{1}{C} \int_0^t i dt,$$

em que C representa a capacitância, ou seja, a capacidade de acumular carga.

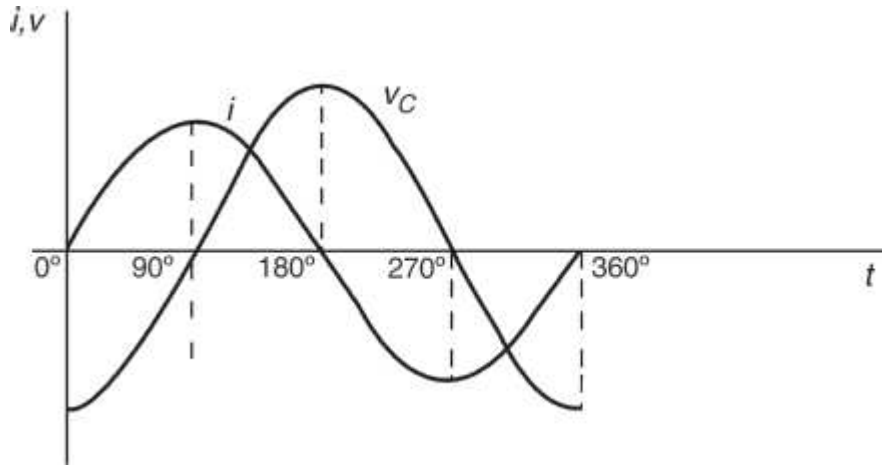
Sabemos que:

$i = I_m \text{ sen } \omega t$. Assim, integrando, teremos a tensão v_c :

$$v_c = \frac{1}{C} \int_0^t I_m \text{ sen } \omega t \, dt \text{ ou } v_c = \frac{1}{\omega C} I_m \cos \omega t.$$

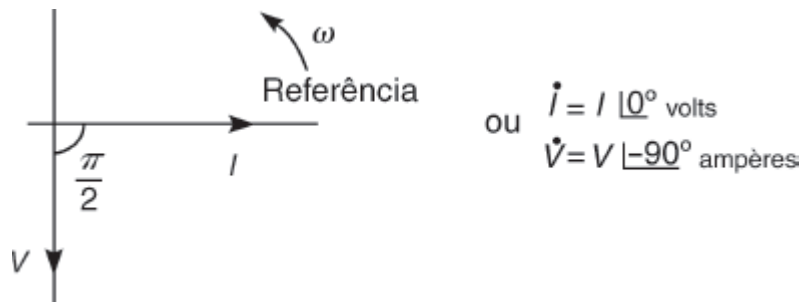
A parcela $\frac{1}{\omega C}$ é a reatância capacitiva. A soma vetorial da resistência e das reatâncias é a impedância Z .

A representação em função do tempo será:



Tensão atrasada de 90° sobre a corrente.

Figura 2.40



Corrente avançada de 90° em relação à tensão representação fasorial.

Figura 2.41

Então, a tensão v estará atrasada de 90° ou $\frac{\pi}{2}$ em relação à corrente.

2.22.4 Circuito RLC

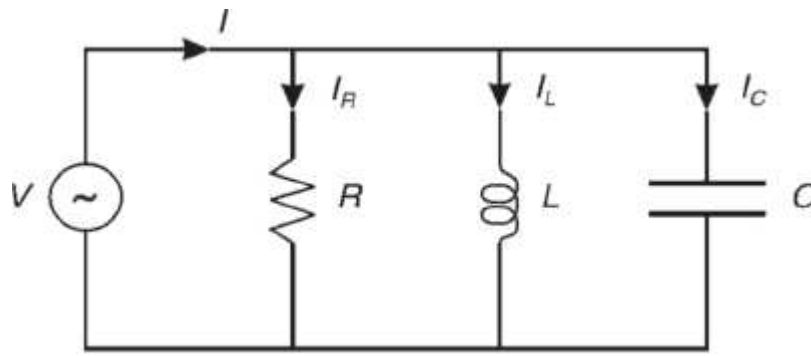
Para o circuito RLC da Figura 2.42 e considerando que:

$$v(t) = V_{\text{máx}} \text{ sen } \omega t,$$

podemos determinar as correntes em cada elemento, assim como a corrente total fornecida pela fonte.

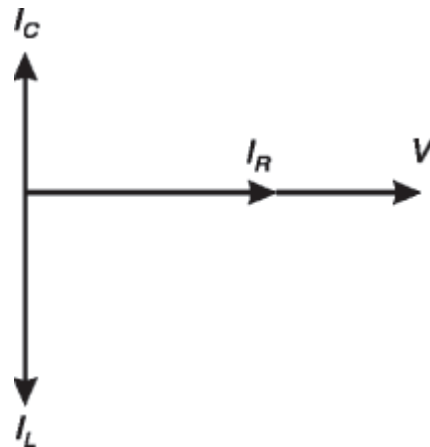
A característica principal no circuito com impedâncias em paralelo é o fato de todas estarem submetidas à mesma diferença de potencial.

Representando as correntes e a tensão sob a forma de fasores, em um mesmo gráfico, teremos as Figuras 2.43 e 2.44:



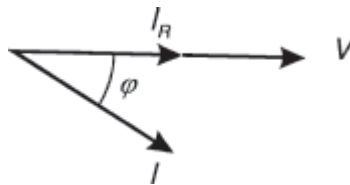
Circuito RLC paralelo.

Figura 2.42



Fasores de correntes do circuito.

Figura 2.43



Fasores de tensão, corrente total.

Figura 2.44

As correntes dos componentes do circuito são determinadas aplicando-se, por exemplo, a Lei de Ohm para cada um, usando o valor eficaz $V = V_{\text{máx}}/\sqrt{2}$

$$I_R = V/R$$

$$I_L = V/X_L, \text{ em que } X_L = \omega L$$

$$I_C = V/X_C, \text{ em que } X_C = 1/\omega \times C.$$

Aplicando a seguir a lei dos nós na forma de fasores, teremos o valor da corrente total a ser fornecida pela fonte.

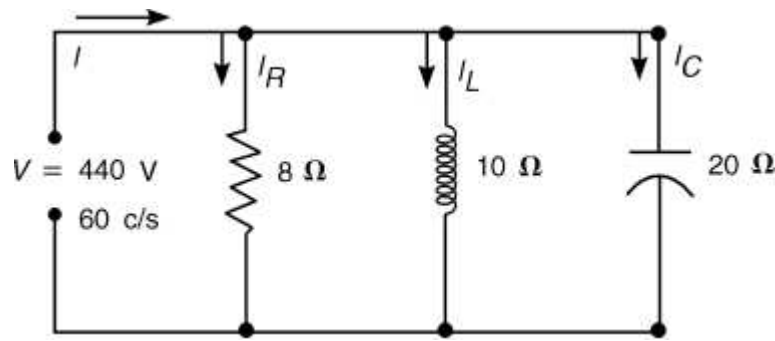
Observe que a corrente do capacitor tem sempre sentido contrário à do indutor. Isso é muito útil em instalações elétricas quando desejamos diminuir os efeitos das correntes indutivas, resultado de cargas como motores, transformadores ou de cargas que os utilizam.

A maneira de se reduzir essas correntes indutivas é adicionar capacitores em paralelo, de modo a minimizar a corrente resultante, diminuindo, portanto, o ângulo de defasagem entre V e I , aumentando, assim, o fator de potência ($\cos \varphi$).

EXEMPLO

Circuito Paralelo RLC

Vamos supor um circuito paralelo com resistências, indutâncias e capacitâncias:



Circuito paralelo RLC.

Figura 2.45

$$I_R = \frac{440}{8} = 55 \text{ A (em fase com } V) \text{ ou } I_R = 55 \angle 0^\circ \text{ ampères}$$

$$I_L = \frac{440}{10} = 44 \text{ A (atrasada } 90^\circ \text{ em relação a } V) \text{ ou } I_L = 44 \angle -90^\circ \text{ ampères}$$

$$I_C = \frac{440}{20} = 22 \text{ A (avançada } 90^\circ \text{ em relação a } V) \text{ ou } I_C = 22 \angle 90^\circ \text{ ampères.}$$

A corrente total / será:

$$I = \sqrt{I_R^2 + (I_L - I_C)^2} = \sqrt{55^2 + (44 - 22)^2} = 59,23 \text{ A}$$

$$\cos \theta = \frac{I_R}{I} = \frac{55}{59,23} = 0,928 \therefore \theta = 21,8^\circ.$$

Quais são as indutâncias e capacitâncias?

$$X_L = \omega \times L \quad \therefore \quad L = \frac{10}{377} = 26 \text{ mH} \quad \omega = 2\pi f = 2\pi \times 60 = 377 \text{ c/s.}$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C} \quad \therefore \quad C = \frac{1}{\omega \cdot X_C} = \frac{1}{377 \times 20} = 132 \mu\text{F.}$$

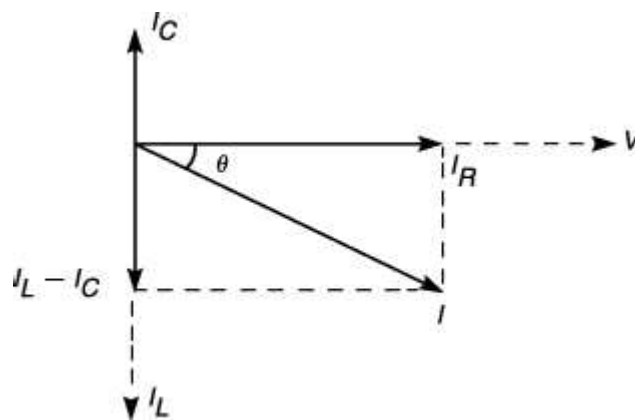


Diagrama fasorial do circuito RLC.

Figura 2.46

Potência ativa:

$$P = VI \cos \theta = 440 \times 59,23 \times 0,928 = 24\,184 \text{ watts}$$

ou

$$P = RI_R^2 = 8 \times 55^2 \cong 24\,184 \text{ watts}$$

$$I = 59,23 \angle -21,8^\circ \text{ A}$$

(corrente atrasada em relação à tensão).

EXEMPLO

Circuito Série RLC

Calcular a impedância de um circuito série de corrente alternada de 60 Hz, com os seguintes componentes:

Resistência de 8 ohms;

Indutância de 500 milihenrys;

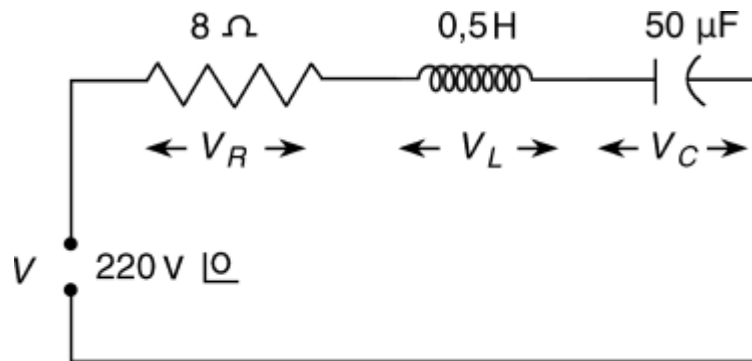
Capacitância de 50 microfarads;

Tensão de 220 volts (valor eficaz).

Solução

$$X_L = \omega L = 377 \times 0,5 = 188,5 \Omega$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{377 \times 50 \times 10^{-6}} = 53,05 \Omega.$$



Circuito série RLC.

Figura 2.47

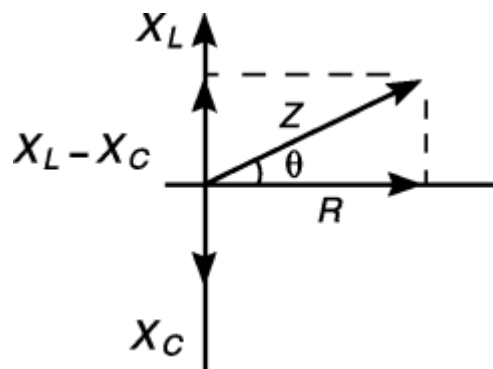


Diagrama de impedâncias.

Figura 2.48

A impedância de um circuito série RLC é:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad \text{ou}$$

$$Z = \sqrt{8^2 + (188,5 - 53,05)^2} = 135,68 \, \Omega$$

$$\cos \theta = \frac{[R]}{[Z]} = \frac{8}{135,68} = 0,058 \quad \text{ou} \quad \theta = 86,6^\circ.$$

Se quisermos calcular a corrente I , temos:

$$I = \frac{V}{Z} = \frac{220}{135,68} = 1,62 \angle -86,6^\circ \text{ A (circuito indutivo).}$$

Queremos saber as tensões nos terminais da resistência, da indutância e da capacitância. Para isso, é preciso verificar a tensão aplicada V .

Solução

$$V_R = RI = 8 \times 1,62 = 12,96 \text{ V (em fase com } I) \text{ ou } V_R = 12,96 \text{ V}$$

$$V_L = X_L I = 188,5 \times 1,62 = 305,37 \text{ (adiantado } 90^\circ \text{ em relação a } I) \text{ ou } V_L = 305,37 \angle 90^\circ \text{ V}$$

$$V_C = X_C I = 53,05 \times 1,62 = 85,94 \text{ (atrasado } 90^\circ \text{ em relação a } I) \text{ ou } V_C = 85,94 \angle 290^\circ \text{ V.}$$

Como se trata de um circuito série, tomamos como referência a corrente. Então, o diagrama de tensões será:

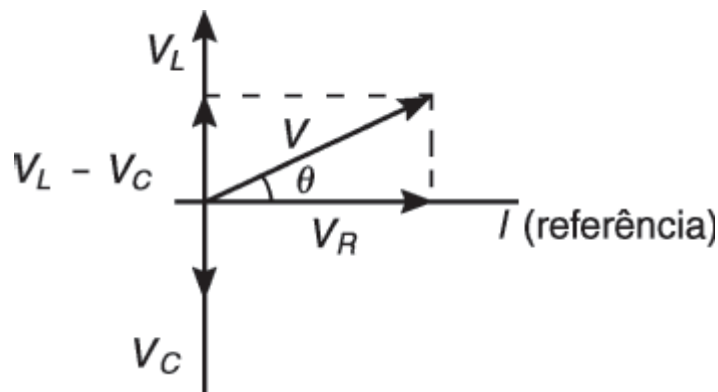


Diagrama de tensões no circuito série RLC.

Figura 2.49

$$V = \sqrt{V_R^2 + (V_L - V_C)^2} = \sqrt{12,96^2 + (305,37 - 85,94)^2} \cong 22 \text{ V}$$

$$\cos \theta = \frac{V_R}{V} = \frac{12,96}{220} = 0,058 \therefore \theta = 86,6^\circ$$

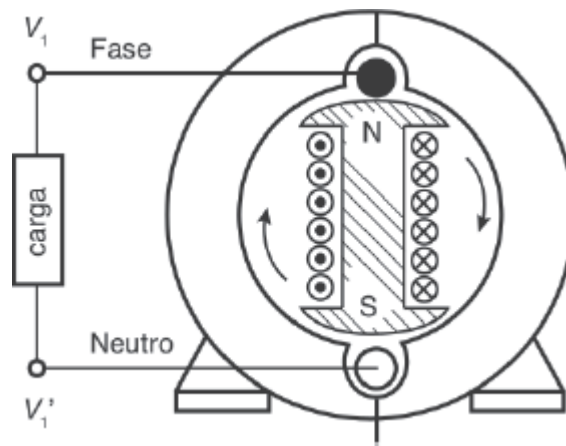
$$P = RI^2 = 8 \times 1,62^2 = 20,99 \text{ W ou}$$

$$P = VI \cos \theta = 220 \times 1,62 \times 0,058 = 20,99 \text{ W.}$$

2.23 Geradores Monofásicos e Trifásicos

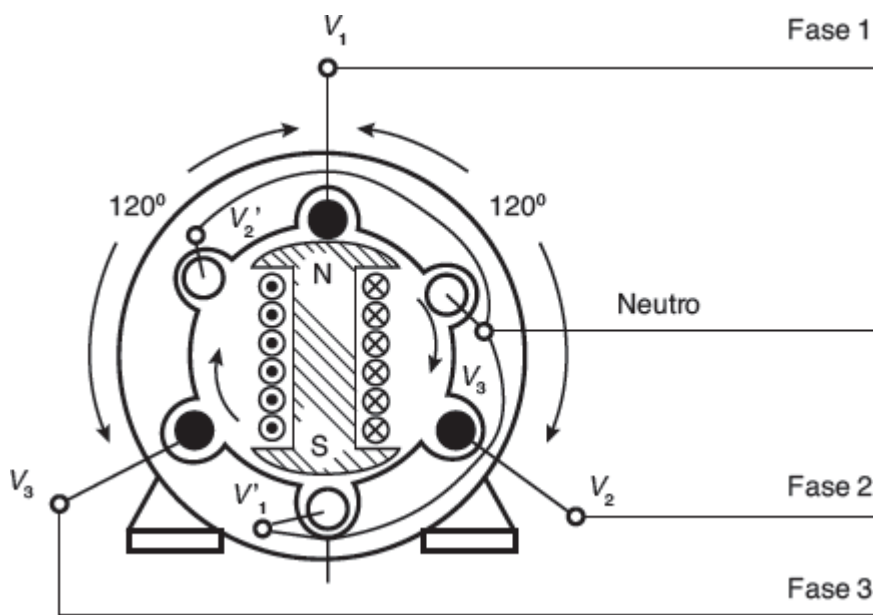
Os pequenos geradores geralmente são compostos por apenas um enrolamento (bobina), que, submetido à ação de um campo magnético, produz somente uma fase e faz o retorno pelo outro condutor (neutro), conforme se pode observar na Figura 2.50.

Os grandes geradores são quase sempre trifásicos. As três fases são compostas por 3 enrolamentos, que estão defasados de 120° (Figura 2.51). Para uma mesma potência, o circuito trifásico é mais econômico que o monofásico.



Gerador monofásico.

Figura 2.50



Gerador trifásico.

Figura 2.51

Já vimos que as grandezas tensão e corrente (amperagem) são representadas por vetores que traduzem as suas variações ao longo do tempo. Assim, a Figura 2.52 apresenta o diagrama vetorial das tensões e correntes de um circuito trifásico.

Se quisermos representar em um gráfico as três ondas de um circuito trifásico, obtemos o gráfico da Figura 2.52.

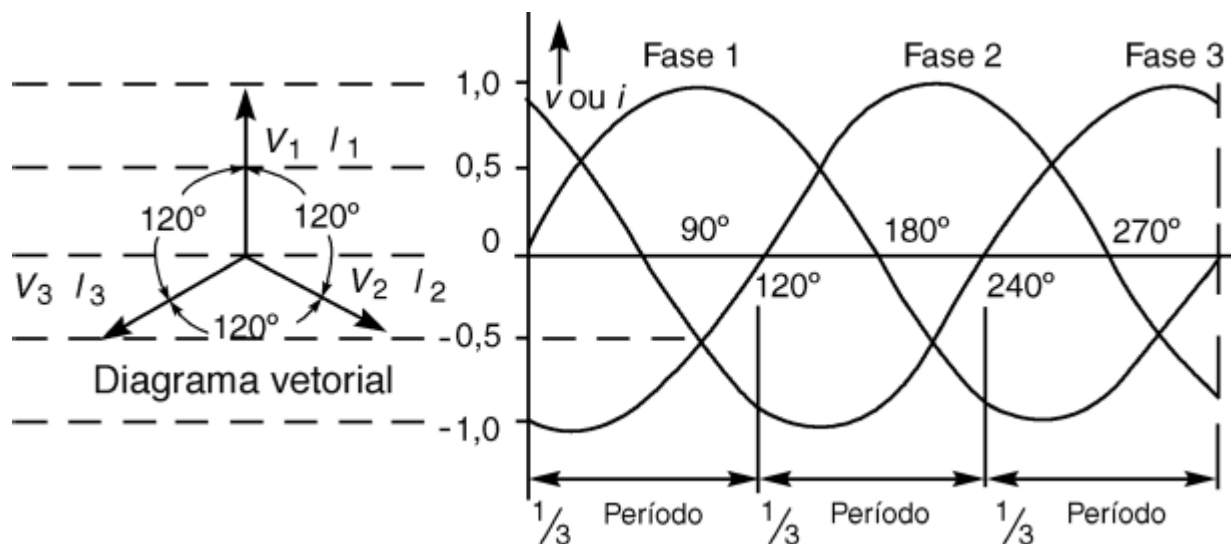


Figura 2.52

2.24 Fator de Potência

Vimos, no item 2.12, que a potência elétrica é o produto da corrente pela tensão, ou seja:

$$P = V \times I$$

P = em watts;

V = em volts;

I = em ampères.

Esta expressão somente é válida para circuitos de corrente contínua ou para circuitos de corrente alternada monofásica, com carga resistiva, isto é, lâmpadas incandescentes, ferro elétrico, chuveiro elétrico etc.

Quando a carga possui motores ou outros enrolamentos, aparece no circuito uma outra potência que o gerador deve fornecer – a potência reativa.

Assim, temos três tipos de potência:

Potência ativa é aquela que produz trabalho – P

Potência reativa é aquela trocada entre gerador e carga devido aos elementos indutivos e capacitivos – Q

Potência aparente é a soma vetorial das duas potências anteriores – N

Assim, podemos considerar a seguinte soma vetorial:

$$\dot{N} = \dot{P} + \dot{Q}$$

Para entendermos tais conceitos, basta imaginarmos que, em circuitos com motores ou outros enrolamentos, a tensão ou voltagem se adianta em relação à corrente de um certo ângulo θ , quando são representados em gráfico. Esses são os circuitos indutivos (Figura 2.53), onde V está sempre avançado em relação a i .

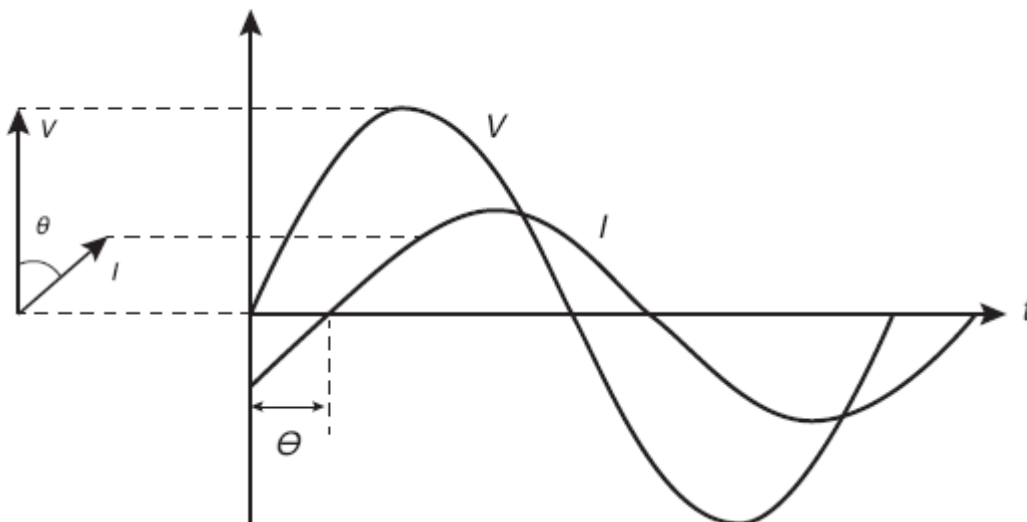


Diagrama de defasagem entre tensão e corrente em circuito indutivo.

Figura 2.53

Chama-se fator de potência o cosseno do ângulo de defasagem entre a corrente e a tensão. A expressão geral da potência em circuitos monofásicos de corrente alternada é a seguinte:

$$P = V \times I \times \text{fator de potência.}$$

Para os circuitos trifásicos, temos outro fator, resultante da composição vetorial das três fases, ou seja:

$$\sqrt{3} = 1,73:$$

$$P = 1,73 \times V \times I \times \text{fator de potência.}$$

Os valores do fator de potência variam desde 0 até 1 ou, em termos percentuais, de 0 a 100%. O valor 0 representa uma indutância ou uma capacitância pura, e o valor 1, um circuito resistivo. Uma indutância ou uma capacitância pura não existe na prática porque é impossível um fio sem alguma resistência; por isso, o valor zero nunca é obtido.

EXEMPLO

Um motor trifásico de 220 volts exige da rede 25 ampères por fase, com fator de potência de 80%. Temos de calcular a potência fornecida pela rede.

Solução

$$P = 1,73 \times V \times I \times \text{fator de potência};$$

$$P = 1,73 \times 220 \times 25 \times 0,8 = 7\,612 \text{ W.}$$

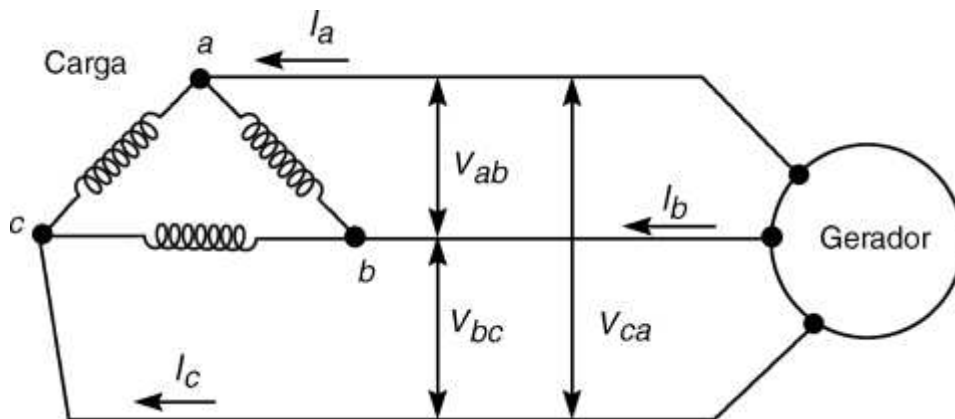
O fator de potência baixo – isto é, menor que 0,92 – pode ocasionar sérios problemas a uma instalação, como aquecimento dos condutores e aumento da conta de energia; por isso, deve ser corrigido com a instalação de capacitores (ver Capítulo 9).

2.25 Ligação em Triângulo e em Estrela

Nos circuitos trifásicos, há dois tipos básicos de ligação, tanto para os geradores e transformadores como para as cargas: são as ligações em triângulo ou em estrela.

2.25.1 Ligação em triângulo ou delta

Nesse tipo de ligação, a associação dos enrolamentos tem um aspecto idêntico ao do triângulo.



Circuito trifásico ligado em triângulo.

Figura 2.54

Para fixarmos ideias, vamos supor que a , b e c sejam os terminais dos enrolamentos de um motor trifásico, recebendo tensões entre fases V_{ab} , V_{bc} , V_{ca} de um gerador, as quais, como já sabemos, estão defasadas de 120° , isto é, estão de acordo com a Figura 2.55.

As correntes I_a , I_b e I_c são chamadas correntes de linha e, no caso presente, são iguais em módulo, porém defasadas de 120° entre si. Dizemos que as correntes são iguais porque o circuito trifásico de um motor é dito equilibrado. O diagrama completo com as correntes e tensões será:

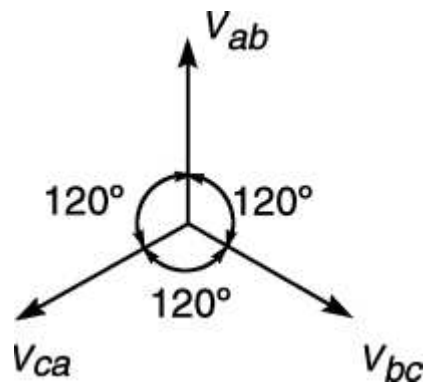


Diagrama vetorial das tensões da Figura 2.54.

Figura 2.55

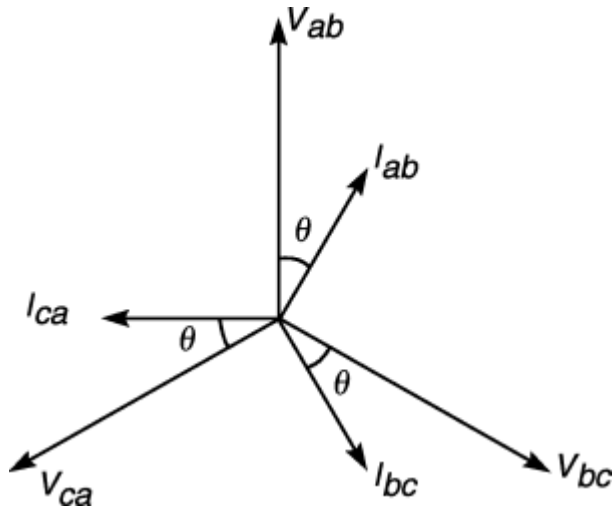


Diagrama vetorial completo da Figura 2.54.

Figura 2.56

As correntes de linha serão a soma vetorial das correntes de fase:

$$\dot{I}_a = \dot{I}_{ab} + \dot{I}_{ac};$$

$$\dot{I}_b = \dot{I}_{ba} + \dot{I}_{bc};$$

$$\dot{I}_c = \dot{I}_{ca} + \dot{I}_{cb}.$$

Outra maneira de representarmos a ligação em triângulo é a seguinte:

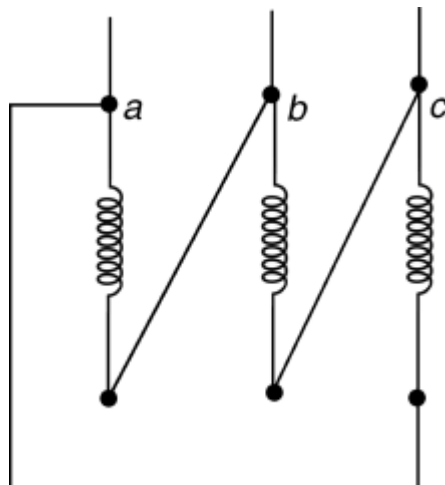
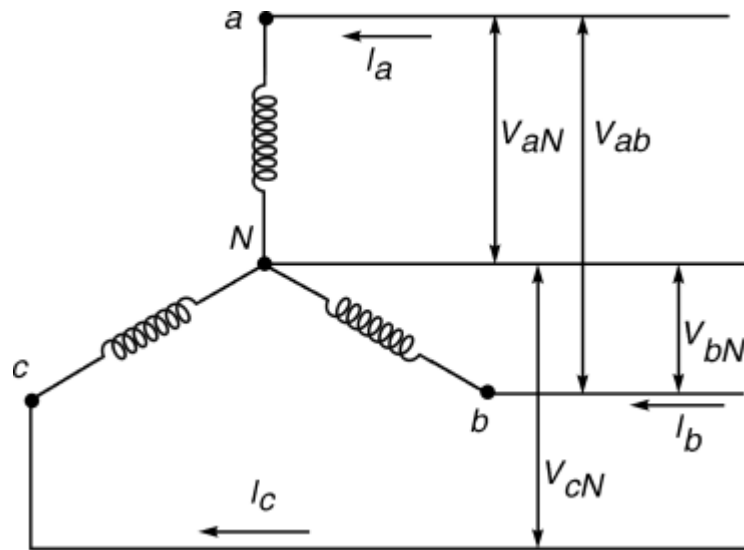


Diagrama de ligações de um circuito trifásico em triângulo.

2.25.2 Ligação em Estrela

É o outro tipo de ligação trifásica na qual se junta, em um único nó, um terminal de cada enrolamento. Na Figura 2.58, vemos uma carga ligada em estrela, que pode ser representada pelas duas formas.



Circuito trifásico ligado em estrela.

Figura 2.58

Esse ponto comum constitui o neutro da ligação, e, nos sistemas elétricos mais usuais no Brasil, o neutro é ligado à terra.

Analogamente, as correntes I_a , I_b e I_c são as correntes de linha; porém, nesta ligação temos dois tipos de tensões:

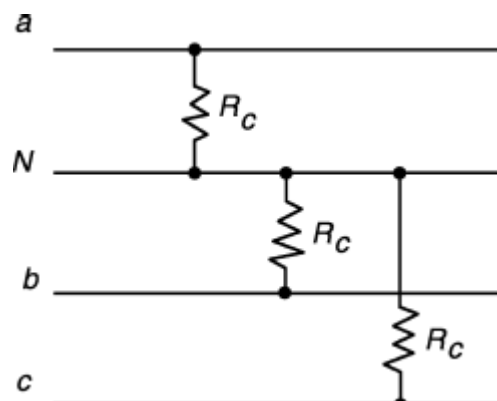
- tensões entre fases, ou tensões compostas V_{ab} , V_{bc} e V_{ca} ;
- tensões entre fase e neutro V_{aN} , V_{bN} e V_{cN} .

A relação entre as tensões de fase e as de fase e neutro é sempre a raiz quadrada de 3, ou seja, 1,73, donde:

$$\begin{aligned} V_{ab} &= 1,73 \times V_{aN} \\ V_{bc} &= 1,73 \times V_{bN} \\ V_{ca} &= 1,73 \times V_{cN} \end{aligned}$$

A ligação em estrela tem essa grande vantagem de termos duas tensões diferentes disponíveis em nossa rede, possibilitando ligar, por exemplo, motores ou lâmpadas em 127 ou 220 volts.

As cargas dos grandes edifícios são quase sempre ligadas em estrela, pois se constituem de diversas cargas monofásicas e, no conjunto, comportam-se como carga trifásica ligada em estrela. Se as cargas estão equilibradas entre as fases, ou seja, se existe o mesmo valor da corrente entre fase e neutro, a corrente resultante no neutro é nula.



Carga trifásica ligada em estrela com neutro.

Figura 2.59

A potência num circuito trifásico equilibrado é três vezes a do circuito monofásico. Na Figura 2.58, temos:

$$P = 3 \times I_a \times V_{aN} \cos \theta = 3 \times I_a \times \frac{V_{ab}}{\sqrt{3}} \cos \theta,$$

em que:

$$P = \sqrt{3} \times V_{ab} \times I_a \cos \theta.$$

EXEMPLO

Um edifício residencial possui 10 apartamentos, cada um com carga monofásica em 127 volts igual a 4 000 watts, somente de iluminação. Como seriam dimensionados os cabos alimentadores do prédio pelo critério da capacidade de corrente?

Solução

Carga total:

$$P = 4\,000 \times 10 = 40\,000 \text{ W};$$

$$P = \sqrt{3} \times V \times I \times \cos \theta; \text{ a alimentação do prédio é trifásica.}$$

$$V = \sqrt{3} \times 127 = 220 \text{ volts.}$$

Para o caso presente, vamos considerar o fator de potências igual a 1 (luz incandescente). Então:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \times V} = \frac{40\,000}{\sqrt{3} \times 220} = 105 \text{ A.}$$

Desse modo, os três condutores de fase e o neutro serão dimensionados para 105 ampères.

Resumo

- Conceito de energia;
- Energia potencial e cinética;
- Composição da matéria;
- Carga elétrica;
- Diferença de potencial;
- Lei de Ohm;
- Ligação em série, paralela e mista;
- Leis de Kirchhoff;
- Potência e energia elétrica;
- Medidores de energia;
- Magnetismo e campo magnético;
- Força eletromotriz;
- Indução eletromagnética;
- Circuitos monofásicos e trifásicos;
- Fator de potência;
- Ligação triângulo-estrela.

Exercícios de Revisão

1. O elemento lítio tem a representação ${}_3\text{Li}^7$. Dizer quantos prótons, nêutrons e elétrons ele possui.
2. Definir o ampère (intensidade de corrente).
3. Dizer quantos elétrons atravessam a seção reta de um condutor em um segundo, no qual a intensidade de corrente é de 10 ampères.
4. Em um gerador, a tensão nos terminais é $V = 220$ volts, a resistência interna é de 2 ohms e a corrente é de 15 ampères. Qual a sua f.e.m.?
5. Um motor é acionado por 380 volts de tensão e 10 ampères de corrente. Se a resistência interna é de 1 ohm, qual a sua f.e.m.?
6. Calcular a energia elétrica paga no fim do mês por uma casa com a potência média utilizada de 2 000 watts ligada durante 300 horas; o preço do kWh é de R\$0,15. (Não levar em conta os impostos que incidem na conta.)
7. Efetuando-se a medição da corrente em nossa residência, com o auxílio de um amperímetro de corrente alternada, foram achados 10 ampères eficazes. Fazer o desenho da onda dessa corrente, sabendo-se que a frequência da rede é de 60 Hz e que a tensão é senoidal. Qual o valor máximo?
8. Calcular a resistência equivalente de um circuito composto de quatro resistências em paralelo, com os seguintes valores:
 $R_1 = 2; R_2 = 8; R_3 = 10; R_4 = 5$.
9. Se, no exercício anterior, ligarmos essas quatro resistências a uma fonte de 120 volts, qual será a corrente circulante?
10. Um transformador abaixador ou YY tem a tensão do lado primário de 13,2 kV e a corrente $I_1 = 2$ A. Se a tensão no secundário é de 220 V, calcular a corrente I_2 , desprezando as perdas.
11. Para uma onda senoidal $i = 100 \cos 628 t$, calcular o valor rms e a frequência.

* George Simeon Ohm (1789-1854).

* Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887).

³ À energia térmica não se aplica esse conceito.