

## Capítulo

# 16

# Noções de corrente alternada

Quando se mantém uma corrente alternada em um circuito, os elétrons livres nos condutores oscilam com amplitudes de milésimos de milímetro.

### ▶ 16.1 Conceitos básicos

*A fem induzida numa espira, que gira com velocidade angular constante num campo magnético uniforme, estabelece na espira uma corrente elétrica que varia periodicamente em intensidade e sentido.*

### ▶ 16.2 Alternadores e dínamos. Transformadores

*Os alternadores são geradores de corrente alternada e os dínamos, de corrente contínua.*

*Os transformadores modificam uma ddp alternada, aumentando-a ou diminuindo-a, conforme seja necessário.*

A transmissão de energia elétrica por longas distâncias – partindo da usina geradora até seu destino final nas casas, nas indústrias e em outros estabelecimentos –, sem que ocorram grandes perdas, tornou-se possível com o uso de correntes alternadas que possibilitam aumentar ou diminuir as tensões elétricas por meio de transformadores.



## Conceitos básicos

### Objetivos

▶ Analisar a variação da fem induzida em uma espira que gira com velocidade angular constante em um campo magnético uniforme.

▶ Caracterizar a corrente alternada e compreender como ocorre a sua geração em um circuito.

### Termos e conceitos

- fem induzida em espira girante num campo magnético
- pulsação da corrente

Considere, em um campo magnético uniforme de indução  $\vec{B}$ , uma espira de área  $A$  que pode girar graças a um dispositivo mecânico qualquer, em torno do eixo  $XY$ , com velocidade angular  $\omega$  constante (fig. 1). Seja  $\theta$  o ângulo entre a normal  $\vec{n}$  ao plano da espira e o vetor  $\vec{B}$ . Admita que, no instante  $t = 0$ , a espira esteja perpendicular às linhas de indução. Nesse instante,  $\theta = 0$  e o fluxo magnético é máximo:

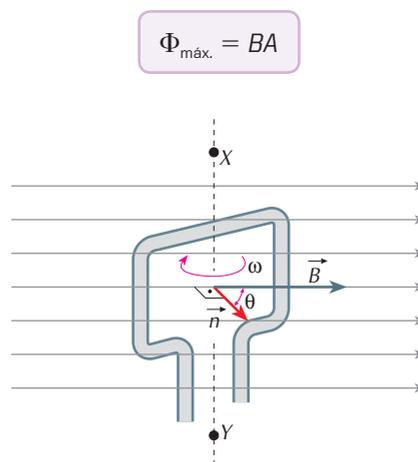


Figura 1. Espira girando em campo magnético uniforme, com velocidade angular constante.

Em um instante  $t$  posterior, a espira gira de um ângulo  $\theta = \omega t$ , sendo que o fluxo magnético nesse instante valerá  $\Phi = BA \cdot \cos \theta$ , podendo ser escrito na forma:

$$\Phi = \Phi_{\text{máx.}} \cdot \cos \omega t$$

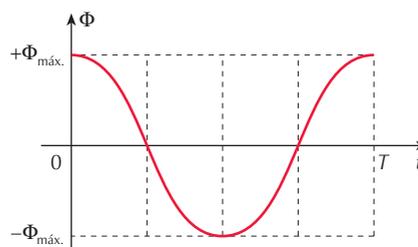


Figura 2. Gráfico da variação de  $\Phi$  com o tempo em um período  $T$ .

No gráfico da figura 2, representamos a variação de  $\Phi$  com o tempo para um período  $T$ , lembrando que  $\omega = \frac{2\pi}{T}$ .

Como o fluxo magnético varia com o tempo, existe, entre os terminais da espira, uma fem induzida  $e$ . Pode-se demonstrar que o valor instantâneo da fem induzida é:

$$e = \Phi_{\text{máx.}} \cdot \omega \cdot \sin \omega t$$

Essa função  $e = f(t)$  é uma função senoidal do tempo cujo valor máximo é:

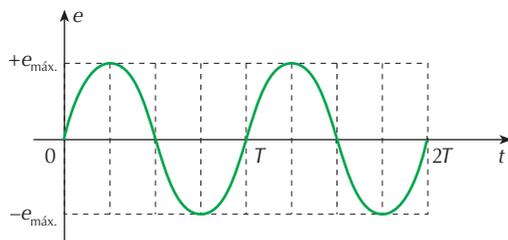
$$e_{\text{máx.}} = \Phi_{\text{máx.}} \cdot \omega$$

Portanto:

$$e = e_{\text{máx.}} \cdot \text{sen } \omega t$$

O gráfico de  $e$ , em função de  $t$ , está representado na **figura 3**.

A fem assume, periodicamente, valores positivos e negativos. Essa fem lança, em um circuito, uma corrente denominada **corrente alternada**, que varia, periodicamente, em intensidade e sentido.



◀ **Figura 3.** Gráfico da fem induzida entre os terminais da espira, em função do tempo, para dois períodos  $T$ .

Ao ligar um resistor de resistência  $R$  aos terminais da espira da **figura 1**, pela lei de Ohm, temos:

$$i = \frac{e}{R} \Rightarrow i = \frac{e_{\text{máx.}}}{R} \cdot \text{sen } \omega t$$

Mas  $\frac{e_{\text{máx.}}}{R}$  representa a máxima intensidade da corrente, isto é:

$$i_{\text{máx.}} = \frac{e_{\text{máx.}}}{R}$$

Nessas condições, a intensidade da corrente  $i$  é dada por:

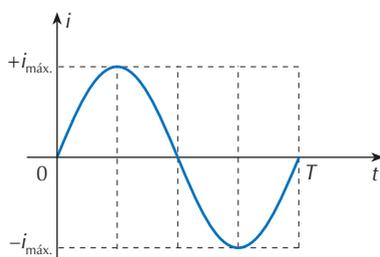
$$i = i_{\text{máx.}} \cdot \text{sen } \omega t$$

O gráfico de  $i$ , em função do tempo  $t$ , está representado na **figura 4**. Quando se mantém uma corrente alternada em um circuito, os elétrons livres oscilam nos condutores com amplitudes de milésimos de milímetros.

A grandeza  $\omega$ , dada por:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$$

denomina-se **pulsção da corrente**. A frequência da corrente alternada é fixada em algumas dezenas de hertz; no caso da energia elétrica distribuída comercialmente no Brasil,  $f = 60$  Hz.



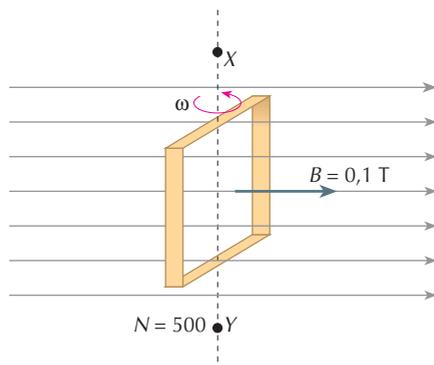
◀ **Figura 4.** Gráfico da intensidade de corrente alternada em um resistor, em função do tempo.



## EXERCÍCIO RESOLVIDO

**R. 150** Uma bobina chata, formada de 500 espiras quadradas de área igual a  $6 \text{ cm}^2$ , gira em torno de um eixo  $XY$  em um campo magnético uniforme, de intensidade  $0,1 \text{ T}$ . Se a espira efetua 3.600 revoluções por minuto, determine:

- a velocidade angular  $\omega$  da bobina;
- o valor máximo da fem induzida.



### Solução:

a) Como a bobina efetua 3.600 revoluções por minuto, a frequência do movimento vale:

$$f = \frac{3.600}{60} \text{ Hz} \Rightarrow f = 60 \text{ Hz}$$

A velocidade angular da bobina será:

$$\omega = 2\pi f \Rightarrow \omega = 2\pi \cdot 60 \Rightarrow \omega = 120\pi \text{ rad/s}$$

b) Em cada espira da bobina de área  $A = 6 \text{ cm}^2 = 6 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ , o fluxo magnético máximo é dado por  $\Phi_{\text{máx.}} = BA$ , sendo induzida a fem máxima:  $\Phi_{\text{máx.}} \cdot \omega$ .

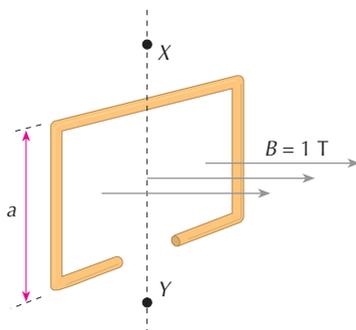
Como a bobina tem  $N = 500$  espiras, o valor máximo da fem induzida será:

$$e_{\text{máx.}} = N \cdot \Phi_{\text{máx.}} \cdot \omega = NBA\omega \Rightarrow e_{\text{máx.}} = 500 \cdot 0,1 \cdot 6 \cdot 10^{-4} \cdot 120\pi \Rightarrow e_{\text{máx.}} \approx 11,3 \text{ V}$$

**Resposta:** a)  $120\pi \text{ rad/s}$ ; b)  $\approx 11,3 \text{ V}$

## EXERCÍCIO PROPOSTO

**P. 393** (PUC-SP) Uma bobina de uma só espira, quadrada, de lado  $a = 0,1 \text{ m}$ , gira, com velocidade angular  $\omega$ , em torno do eixo  $XY$  num campo magnético uniforme de intensidade  $1 \text{ T}$ . Para que seja induzida nessa bobina uma fem de valor máximo  $10 \text{ V}$ , calcule a velocidade angular da bobina.



## Alternadores e dinamos. Transformadores

### Objetivos

- ▶ Conhecer os elementos e o funcionamento dos alternadores e dos dinamos.
- ▶ Definir valor eficaz e potência média da corrente alternada.
- ▶ Conhecer os elementos e o funcionamento de um transformador.
- ▶ Definir a razão de transformação de um transformador.
- ▶ Conhecer o esquema de transformação e transporte de energia da usina até o consumo.

### Termos e conceitos

- corrente pulsante
- corrente retificada
- efeito Joule
- corrente de Foucault

O esquema da **figura 5** representa um gerador de corrente alternada, denominado **alternador**. O conjunto de espiras é chamado armadura e seus terminais são soldados a anéis metálicos.

Em cada anel apoia-se uma escova, geralmente de grafite; a corrente é entregue ao circuito por essas escovas. Denomina-se coletor o conjunto formado pelos anéis e pelas escovas.

Nos circuitos, usamos o símbolo  $\sim$  para indicar que, entre os terminais do gerador, temos uma ddp alternada.

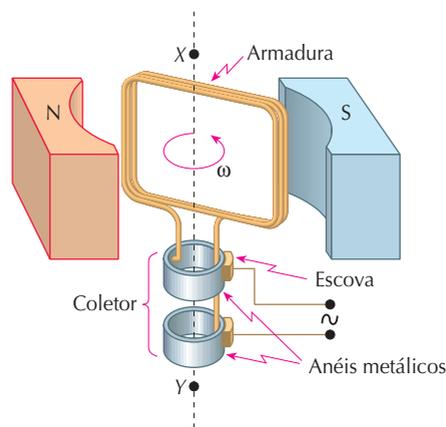


Figura 5. Esquema de um alternador.

Numa usina de geração de energia elétrica, a rotação da armadura é originada pela energia mecânica de uma turbina. Essa energia é obtida por meio da energia potencial do desnível de uma queda-d'água, em uma usina hidrelétrica (**fig. 6**). Já em uma usina termelétrica, a energia é produzida por meio de uma máquina a vapor.

Um grande avanço tecnológico foi conseguido pela construção de muitos acessórios que aperfeiçoaram o funcionamento dos alternadores. Chegou-se, então, aos enormes geradores das grandes centrais elétricas, que possibilitaram a utilização da energia elétrica em larga escala. Por mais complicados que sejam esses geradores, seu funcionamento baseia-se no alternador que acabamos de descrever.

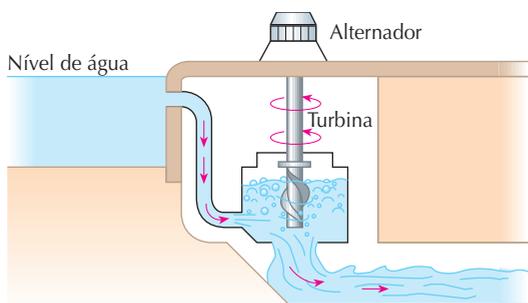


Figura 6. A rotação da armadura pode ser obtida a partir da energia potencial do desnível de uma queda mediante uma turbina.



Usina hidrelétrica de Itaipu (Paraná), exemplo de central de geração de energia elétrica. Na foto, em primeiro plano vê-se o vertedouro, por onde a água escoo do reservatório (a montante da barragem) para a saída de água (a jusante), controlando o desnível. Esse controle é fundamental para o funcionamento da usina.

Nesse tipo de alternador, a substituição do par de anéis por um comutador é um artifício simples, que permite manter a corrente em um mesmo sentido (fig. 7). O comutador é um anel metálico dividido em dois setores, cada um ligado aos terminais da armadura. Em cada meia-volta da armadura, o comutador troca o terminal ligado ao circuito externo. Isso origina uma corrente de mesmo sentido, apesar de variar de intensidade. Tal corrente é denominada corrente pulsante (fig. 7A).

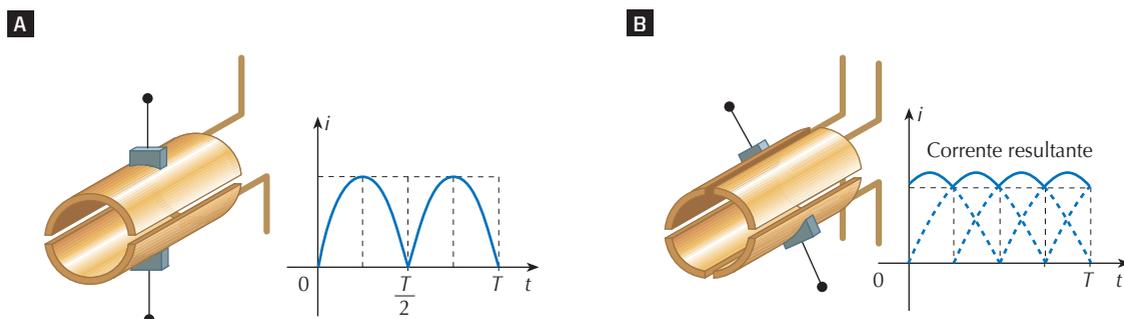


Figura 7. A substituição do par de anéis por um comutador permite obter corrente no mesmo sentido. (A) Corrente pulsante. (B) Corrente praticamente contínua.

Aumentando o número de setores do comutador, o que é possível pelo maior número de armaduras utilizadas, obtemos uma corrente praticamente contínua no circuito externo (fig. 7B). Dizemos que a corrente está retificada e o aparelho constitui um **dinamo**.

**Entre na rede** No endereço eletrônico <http://micro.magnet.fsu.edu/electromag/java/generator/ac.html> (acesso em agosto/2009), você visualiza um gerador de corrente alternada em funcionamento. Na simulação, você pode alterar a frequência e ver como se modifica a ddp, por meio de um gráfico.

## 1 Valor eficaz e potência média da corrente alternada

Denomina-se **valor eficaz** da corrente alternada a intensidade  $i_{\text{ef.}}$  de uma corrente contínua que, em intervalo de tempo igual ao período  $T$  da corrente alternada, dissipa igual quantidade de energia em um mesmo resistor.

Demonstra-se que:

$$i_{\text{ef.}} = \frac{i_{\text{máx.}}}{\sqrt{2}}$$

Os valores eficazes estendem-se às fems alternadas:

$$e_{\text{ef.}} = \frac{e_{\text{máx.}}}{\sqrt{2}}$$

Esses valores são tão importantes que servem para especificar as propriedades dos circuitos de corrente alternada. Por exemplo, em São Paulo, a distribuição domiciliar de energia elétrica é feita segundo 127 V eficazes, isto é, segundo uma fem alternada cujo valor eficaz é 127 V.

Em um aparelho elétrico, define-se **potência média ( $Pot_m$ ) da corrente alternada** como a energia elétrica trocada em um período dividida por esse período. No caso de um resistor, prova-se que a potência média vale:

$$Pot_m = e_{\text{ef.}} \cdot i_{\text{ef.}}$$

## EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

**R. 151** Um resistor, de resistência elétrica  $R = 20 \Omega$ , é submetido a uma fem alternada  $e = e_{\text{máx.}} \cdot \text{sen } \omega t$ , em que  $e_{\text{máx.}} = 100 \text{ V}$  e  $\omega = 2\pi \cdot 60 \text{ rad/s}$ . Calcule a potência média dissipada no resistor.

**Solução:**

Sendo  $e = e_{\text{máx.}} \cdot \text{sen } \omega t$ , com  $e_{\text{máx.}} = 100 \text{ V}$ , o valor eficaz da fem será:  $e_{\text{ef.}} = \frac{e_{\text{máx.}}}{\sqrt{2}}$

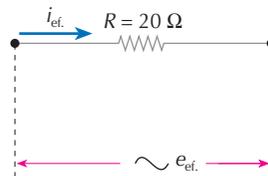
No resistor  $R = 20 \Omega$ , a corrente eficaz será  $i_{\text{ef.}} = \frac{e_{\text{ef.}}}{R}$  e a potência média vale:

$$\text{Pot}_m = e_{\text{ef.}} \cdot i_{\text{ef.}} \Rightarrow \text{Pot}_m = \frac{e_{\text{ef.}} \cdot e_{\text{ef.}}}{R} \Rightarrow \text{Pot}_m = \frac{e_{\text{ef.}}^2}{R}$$

Assim:

$$\text{Pot}_m = \frac{\left(\frac{e_{\text{máx.}}}{\sqrt{2}}\right)^2}{R} \Rightarrow \text{Pot}_m = \frac{e_{\text{máx.}}^2}{2R} \Rightarrow \text{Pot}_m = \frac{(100)^2}{2 \cdot 20} \Rightarrow \text{Pot}_m = 250 \text{ W}$$

**Resposta:** 250 W



**R. 152** Um resistor  $R = 50 \Omega$ , percorrido por uma corrente alternada senoidal, de frequência 60 Hz, dissipa a potência média de 800 W. Determine como varia em função do tempo a fem alternada aplicada no resistor.

**Solução:**

A fem instantânea aplicada ao resistor será dada por uma função do tipo:

$$e = e_{\text{máx.}} \cdot \text{sen } \omega t \quad \textcircled{1}$$

Como a frequência é 60 Hz, temos:

$$\omega = 2\pi f \Rightarrow \omega = 2\pi \cdot 60 \Rightarrow \omega = 120\pi \text{ rad/s} \quad \textcircled{2}$$

Por outro lado, a potência média no resistor é dada por:

$$\text{Pot}_m = \frac{e_{\text{ef.}}^2}{R} \Rightarrow e_{\text{ef.}}^2 = \text{Pot}_m \cdot R \Rightarrow e_{\text{ef.}} = \sqrt{\text{Pot}_m \cdot R} \Rightarrow e_{\text{ef.}} = \sqrt{800 \cdot 50} \Rightarrow e_{\text{ef.}} = 200 \text{ V}$$

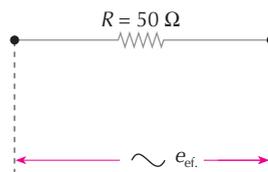
Sendo  $e_{\text{máx.}} = e_{\text{ef.}} \cdot \sqrt{2}$ , temos:

$$e_{\text{máx.}} = 200\sqrt{2} \text{ V} \quad \textcircled{3}$$

Substituindo os resultados de ② e ③ em ①, vem:

$$e = 200\sqrt{2} \cdot \text{sen } (120\pi t) \quad (\text{em volts})$$

**Resposta:**  $e = 200\sqrt{2} \cdot \text{sen } (120\pi t)$ , em volts



## EXERCÍCIOS PROPOSTOS

**P. 394** Determine a expressão da intensidade instantânea de uma corrente alternada senoidal de frequência  $f = 60 \text{ Hz}$  e intensidade eficaz 4 A.

**P. 395** Um resistor de resistência  $R = 10 \Omega$  é percorrido por uma corrente alternada  $i = i_{\text{máx.}} \cdot \text{sen } \omega t$ , em que  $i_{\text{máx.}} = 5 \text{ A}$  e  $\omega = 2\pi \cdot 60 \text{ rad/s}$ . Calcule a potência média dissipada no resistor.

**P. 396** Uma fem alternada  $e = 60 \cdot \text{sen } (2\pi \cdot 60t)$ , em volts, é aplicada num resistor de  $20 \Omega$ . Determine a potência média dissipada no resistor.

**P. 397** (Mackenzie-SP) Uma bobina chata, formada de 500 espiras quadradas, de lado  $a = 20 \text{ cm}$ , gira em torno de um eixo XY com velocidade angular  $\omega$ . A bobina encontra-se em uma região onde existe um campo magnético uniforme de intensidade 0,2 T, perpendicular a XY. Cada espira tem uma resistência de 0,04  $\Omega$ . Quando os terminais da bobina estão em curto-circuito, ela é percorrida por uma corrente elétrica de valor eficaz igual a 3,5 A. Calcule a velocidade angular  $\omega$  da bobina.

O **transformador** é um aparelho que permite modificar uma ddp alternada, aumentando-a ou diminuindo-a conforme a conveniência (**fig. 8**).

O transformador consta de duas bobinas independentes, enroladas sobre um mesmo núcleo de ferro. Este é laminado para minimizar as correntes de Foucault. A bobina que recebe a ddp a ser transformada chama-se **primário (P)** e a outra, que fornece a ddp transformada, chama-se **secundário (S)**. A corrente alternada no primário origina um fluxo magnético alternado no núcleo. Esse fluxo atravessa o secundário, originando nele uma corrente alternada induzida. Na **figura 8**, abaixo de um transformador, representamos seu símbolo convencional.

Se  $N_p$  o número de espiras do primário e  $N_s$  o do secundário, e, ainda,  $U_p$  e  $U_s$  os valores eficazes das respectivas ddp, demonstra-se a seguinte relação:

$$\frac{U_p}{U_s} = \frac{N_p}{N_s}$$

chamada **razão de transformação**.

- Se  $N_s > N_p$ , o transformador é um elevador de ddp.
- Se  $N_s < N_p$ , o transformador é um abaixador de ddp.

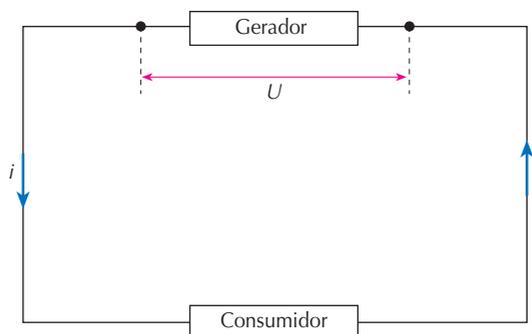
Nos bons transformadores, a potência média no primário é aproximadamente igual àquela que alimenta o secundário:  $Pot_p \approx Pot_s$

Portanto:  $U_p \cdot i_p \approx U_s \cdot i_s$

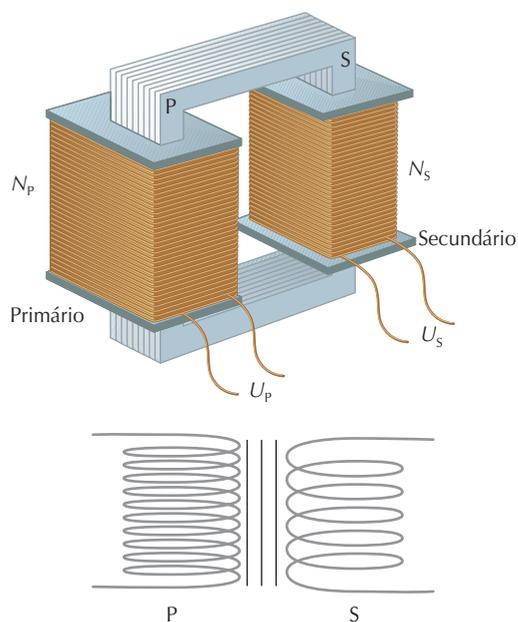
A dissipação de energia nos transformadores é devida, principalmente, ao efeito Joule nos condutores dos enrolamentos e às correntes de Foucault no núcleo do transformador.

O fato de um transformador poder modificar a ddp de uma corrente alternada encontra aplicações importantes. Uma das principais aplicações é no transporte da energia elétrica através de enormes distâncias, a partir de usinas geradoras até os grandes centros urbanos.

Para compreender melhor essa aplicação, considere o circuito simples da **figura 9**. A potência lançada pelo gerador  $Pot_\ell = U \cdot i$  deve chegar ao consumidor através de uma linha cujos fios condutores têm resistência  $R$ . A potência dissipada nessa linha será  $Pot_d = R \cdot i^2$ , devendo ser a menor possível. Isso poderia ser obtido utilizando-se fios de resistência muito pequena.



◀ **Figura 9.** Circuito simples, formado por gerador, consumidor e linha de transmissão.



▶ **Figura 8.** Acima, um transformador e, abaixo, sua representação convencional.

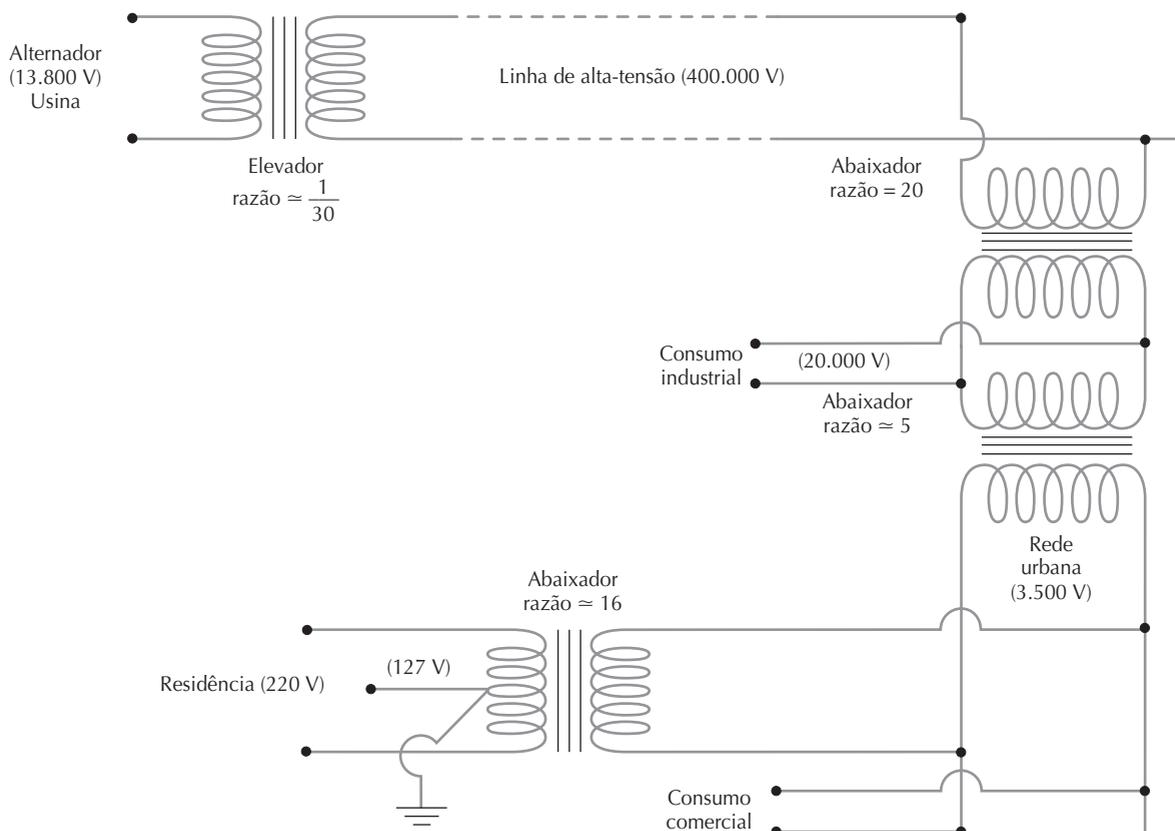
Lembrando que  $R = \rho \cdot \frac{L}{A}$ , teremos  $R$  pequeno, quando  $\rho$  for pequeno, ou  $A$  grande, já que o comprimento  $L$  não pode ser modificado.

Para se obter  $R$  pequeno, em função daquelas variáveis ( $\rho$  e  $A$ ), têm-se os seguintes inconvenientes: primeiro, o elevado custo do material, pois quanto menor a resistividade mais caro será o fio; segundo, uma área  $A$  maior exigiria fios muito grossos e, em consequência, grande peso por linha.

Procura-se, então, diminuir o valor da corrente  $i$ , mas, para que a potência lançada  $Pot_e = U \cdot i$  não diminua, a ddp  $U$  deve ser bastante elevada.

Isso é exatamente o que se faz nas linhas de transmissão, ou seja, utilizam-se altas ddp para transmitir energia elétrica. Na prática, isso só é possível com a corrente alternada e com o uso de transformadores.

Na **figura 10**, esquematizamos uma seqüência de transformações que ocorrem em uma linha de transmissão de energia, desde a usina até o consumo. O alternador da usina fornece energia elétrica, sob ddp eficaz, relativamente baixa (cerca de 13.800 V). Um transformador, de razão aproximadamente  $\frac{1}{30}$ , eleva a ddp para 400.000 V, possibilitando o transporte de energia elétrica a centenas de quilômetros de distância, com dissipações não excessivas. Em uma subestação, um transformador, de razão 20, abaixa a ddp eficaz para 20.000 V, valor utilizado para fins industriais. Em seguida, já na cidade, outra subestação, com transformador de razão aproximadamente 5, abaixa a ddp para 3.500 V, valor usado para fins comerciais. Finalmente, outro transformador, de razão aproximadamente 16, reduz essa ddp a 220 V, para uso residencial. Obtém-se ainda uma ddp de 127 V com a utilização de uma derivação no secundário do transformador.



▲ **Figura 10.** Esquema de um transporte de energia elétrica da usina até o consumo. Os transformadores estão representados pelos seus símbolos convencionais.

**Entre na rede** No endereço eletrônico <http://www.micro.magnet.fsu.edu/electromag/java/transformer/index.html> (acesso em agosto/2009), você pode analisar o funcionamento de um transformador.