



>> capítulo 8

Correntes e tensões alternadas

A maior parte da energia elétrica no mundo é transmitida e distribuída na forma de tensões e correntes alternadas. Nossas casas e indústrias são ambas alimentadas por eletricidade CA. Obviamente, esses são a maior parte dos consumidores de energia elétrica.

OBJETIVOS

Após o estudo deste capítulo, você será capaz de:

- >> *Diferenciar* as várias formas de correntes alternadas e contínuas.
- >> *Explicar e usar* as relações entre tempo e frequência.
- >> *Descrever* quatro maneiras de expressar a amplitude de uma corrente alternada.
- >> *Entender* como uma onda senoidal pode ser gerada.
- >> *Entender* a diferença entre, e a relação entre, graus mecânicos e elétricos.
- >> *Ilustrar* como tensões alternadas trifásicas são produzidas.
- >> *Explicar* as características e aplicações das conexões delta e estrela em sistemas CA.
- >> *Explicar* as vantagens de sistemas trifásicos em relação a sistemas monofásicos.

» Terminologia CA

Correntes alternadas mudam periodicamente o sentido em que elas estão fluindo. Elas também mudam a amplitude (valor), continuamente ou periodicamente. Na maior parte das correntes alternadas, a amplitude é alterada continuamente.

Obviamente, se há uma **CORRENTE ALTERNADA**, também deve existir **TENSÃO ALTERNADA** e potência associada. Geralmente, nos referimos a uma tensão alternada como tensão CA, embora essa expressão soe estranho se considerarmos um português rigoroso. Observe que escrito ou falado na forma abreviada, o termo *tensão CA* soa bem. Porém, quando enunciamos o termo como *tensão corrente alternada*, ele parece estranho e confuso. Portanto, o termo deve ser falado na forma abreviada, que é uma maneira muito comum de se referir a uma tensão alternada na prática. Uma tensão alternada é uma tensão que produz uma corrente alternada, quando essa tensão é usada para alimentar um circuito. De modo similar, **POTÊNCIA CA** se refere à potência que é produzida por uma corrente alternada e tensão alternada.

» Formas de onda

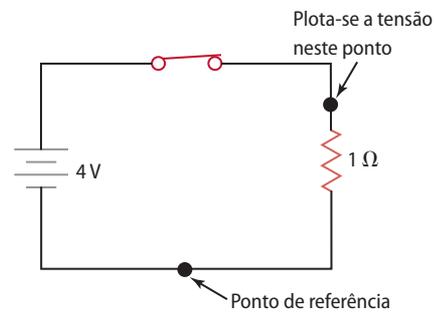
Uma **FORMA DE ONDA ELÉTRICA** é representada por uma linha sobre um gráfico, como ilustrado na Figura 8-1(a). A linha é obtida plotando pontos em um gráfico e depois conectando esses pontos. Os pontos representam o valor de alguma grandeza elétrica em diferentes instantes de tempo. A amplitude e o sentido da grandeza elétrica (por exemplo, tensão ou corrente) são indicados no eixo vertical do gráfico. O tempo é indicado no eixo horizontal.

A forma de onda mostrada na Figura 8-1(a) poderia representar a tensão através do resistor no circuito da Figura 8-1(b). Nesse caso, os valores indicados no eixo vertical estariam em volts. A forma de onda mostra que a tensão cresce rapidamente para seu valor máximo (4 V), quando o circuito é energizado. A tensão permanece nesse valor máximo até o circuito ser aberto (desenergizado). Quando o circuito é aberto, a tensão através do resistor cai rapidamente para zero.

A forma de onda da Figura 8-1(a) poderia também representar a corrente circulando pelo circuito da Figura 8-1(b). A única coisa que mudaria seria a unidade dos valores indicados



(a) Forma de onda



(b) Circuito que produz a forma de onda

Figura 8-1 Plotando a forma de onda. Uma grandeza elétrica como a tensão é plotada em função do tempo.

no eixo vertical. Para forma de onda de corrente, a unidade seria ampères.

Observe na Figura 8-1(a) que a forma de onda está sempre acima da linha zero de referência. Isso significa que a polaridade da tensão é sempre positiva com relação a algum ponto de referência. Ou, no caso de uma forma de onda de corrente, significa que a corrente nunca tem seu sentido invertido. Em outras palavras, a Figura 8-1(a) é a forma de onda de uma tensão ou corrente contínua pura. A amplitude da tensão ou corrente muda apenas quando o circuito é ligado ou desligado.

Outras formas de onda típicas são mostradas na Figura 8-2. A **CORRENTE CONTÍNUA FLUTUANTE** na Figura 8-2(a) é o tipo de corrente produzida em um transistor amplificador. A forma de onda pulsante da Figura 8-2(b) representa o tipo de corrente (ou tensão) produzida por um carregador de bateria. Observe que a **CORRENTE CONTÍNUA PULSANTE** se reduz a zero periodicamente, o que não acontece no caso da corrente contínua flutuante. A Figura 8-2(c) mostra outro tipo de corrente

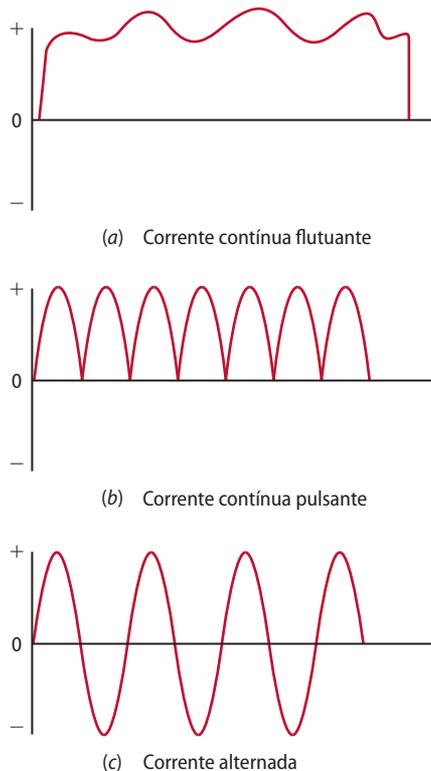


Figura 8-2 Formas de onda de corrente elétrica.

alternada. Observe que essa forma de onda CA se estende para baixo da linha zero de referência. Isso significa que a polaridade da tensão é alterada e o sentido de circulação da corrente é invertido.

»» Tipos de formas de onda CA

O tipo de forma de onda CA mais comum é a **ONDA SENO**, ilustrada na Figura 8-3(a). Uma corrente alternada com esse tipo de forma de onda é referida como corrente alternada *senoidal*. A corrente (e a tensão) alternada que alimenta nossas casas e as indústrias é senoidal. Uma onda senoidal pura tem uma forma bastante específica, que pode ser matematicamente definida de forma precisa (através da função seno). Todas as fórmulas que vamos utilizar para resolver problemas em circuitos de corrente alternada serão baseadas na onda seno. Portanto, é muito importante frisar que essas fór-

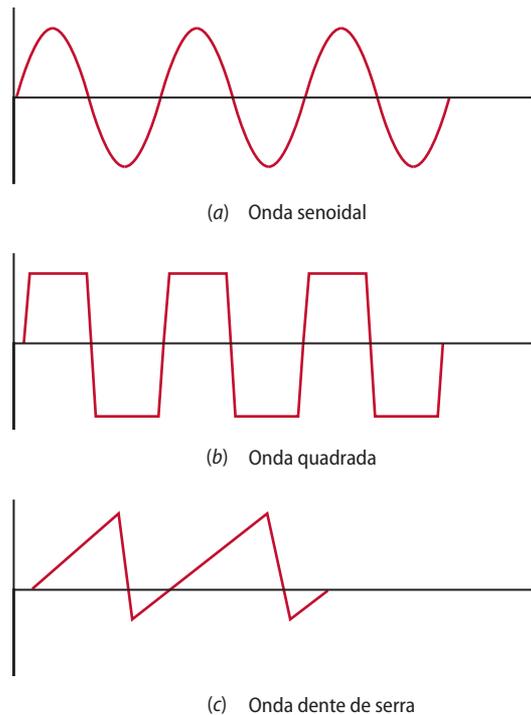


Figura 8-3 Formas de onda típicas de corrente alternada.

mulas são apropriadas apenas quando estamos trabalhando com correntes alternadas senoidais.

A Figura 8-3(b) mostra uma **ONDA QUADRADA**. Esse tipo de forma de onda CA é extensivamente utilizada em circuitos de computador. Com uma onda quadrada, a amplitude da corrente (ou tensão) não varia continuamente. Porém, tanto a amplitude como o sentido de circulação da corrente (ou polaridade no caso da tensão) mudam periodicamente.

A **FORMA DE ONDA DENTE DE SERRA** da Figura 8-3(c) é usada em receptores de televisão, radares e outros dispositivos eletrônicos. Tensões e correntes dente de serra são usadas nos circuitos que produzem a imagem na tela dos televisores de tubo de raios catódicos.

Outras formas de onda diferentes daquelas ilustradas na Figura 8-3 podem existir. Na verdade, correntes alternadas podem ser eletronicamente produzidas em uma variedade de formas de onda quase infinita. Por exemplo, músicas eletrônicas podem ser criadas produzindo e misturando uma grande variedade de formas de onda.

Teste seus conhecimentos

Responda às seguintes questões.

1. Falso ou verdadeiro? O eixo vertical do gráfico de uma forma de onda (de alguma grandeza elétrica) é usualmente caracterizado em unidades de tempo.
2. Falso ou verdadeiro? O eixo horizontal do gráfico de uma forma de onda (de alguma grandeza elétrica) é usualmente caracterizado em unidades de potência.
3. Falso ou verdadeiro? Uma forma de onda CC pulsante retorna periodicamente ao eixo zero.
4. Falso ou verdadeiro? Uma corrente contínua flutuante “flutua” periodicamente acima e abaixo da linha zero de referência.
5. Uma _____ é produzida quando valores de tensão e tempo são plotados em um gráfico.
6. Três tipos típicos de corrente alternada são _____, _____ e _____.

»» Caracterizando a corrente alternada

A descrição completa de uma corrente alternada (ou de uma tensão CA) requer o uso de uma série de termos. Alguns desses termos têm significados gerais, porém, quando usados em eletricidade, apresentam significação bastante específica.

»» Ciclo

A forma de onda na Figura 8-4 mostra quatro **CICLOS** de uma corrente alternada. Um ciclo é a parte de uma forma de onda que não se repete ou não se duplica. Cada ciclo na Figura 8-4 é uma réplica de todos outros ciclos na figura.

A parte do ciclo acima da linha (eixo) horizontal na Figura 8-4 é chamada semiciclo positivo. Um semiciclo é também chamado **ALTERNAÇÃO**. Assim, o semiciclo positivo também pode ser chamado de alternância positiva. De modo similar, chama-se semiciclo negativo a parte do ciclo abaixo da linha horizontal de referência.

»» Período

O tempo necessário para completar um ciclo é chamado **PERÍODO (T)** de uma forma de onda. Na Figura 8-4, o tempo necessário para completar um ciclo é 0,25 s. Portanto, o período T dessa forma de onda é 0,25 s.

»» Frequência

A taxa na qual os ciclos são produzidos é chamada **FREQUÊNCIA (F)** de uma corrente ou tensão CA. Desse modo, a frequência

nos fornece informação sobre a rapidez com que a corrente inverte o sentido ou com que frequência a polaridade da tensão muda.

»» Unidade de frequência – o hertz

A unidade básica de frequência é o **HERTZ (Hz)**. Um hertz é igual a um ciclo por segundo. A onda senoidal na Figura 8-4 passa por quatro ciclos em 1 s. Assim, ela tem uma frequência f de 4 Hz.

A distribuição de energia elétrica no Brasil é feita em corrente alternada e na frequência de 60 Hz. Em muitos países da Europa e da América Latina a frequência utilizada na distribuição da energia elétrica é 50 Hz.

Circuitos eletrônicos usam uma ampla faixa de frequências. Por exemplo, um amplificador de áudio geralmente amplifica sinais com frequências entre 20 Hz e 20 kHz. Frequências entre 540 e 1600 kHz são utilizadas pelas rádios AM. Os canais de televisão (no caso do Brasil, situados na faixa de VHF e UHF) usam frequências entre aproximadamente 50 MHz até aproximadamente 800 MHz.

A frequência e o período de uma onda são relacionados. A frequência é o inverso do período e vice-versa, isto é:

$$T = \frac{1}{f} \quad \text{e} \quad f = \frac{1}{T}$$

LEMBRE-SE

...1 Hz é igual a um ciclo por segundo. Portanto, o período está em segundos quando a frequência está em hertz.

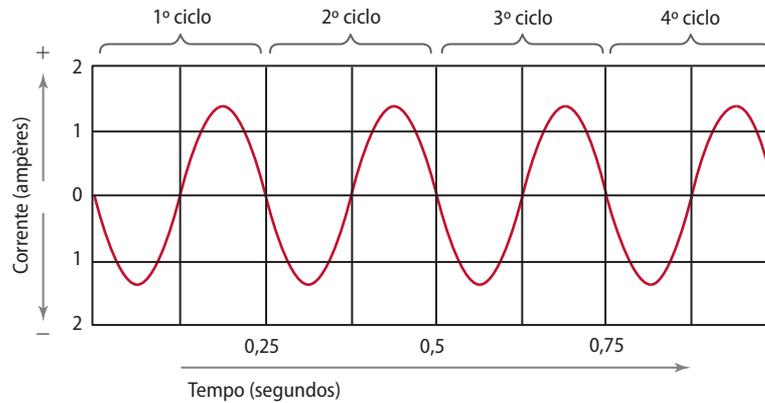
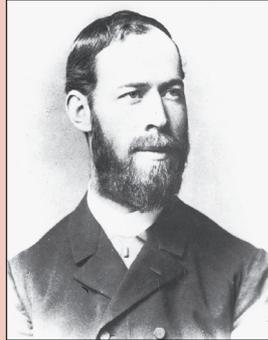


Figura 8-4 Ciclo, período e frequência. A forma de onda tem um período de 0,25s e completa 4 ciclos por segundo.

História da eletrônica

Heinrich Hertz

Em 1887, o físico alemão Heinrich Hertz demonstrou a propagação de ondas eletromagnéticas (EM) a partir de um protótipo experimental, que permitia transmitir e receber ondas EM entre pequenas distâncias. Em sua homenagem, o hertz (Hz) é a unidade padrão para medição de frequência (1Hz equivale a um ciclo completo por segundo).



EXEMPLO 8-2

Qual é o período de uma onda senoidal de 2 MHz?

Dados: $f = 2 \text{ MHz}$

Encontrar: T

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

Solução: $T = \frac{1}{2.000.000} = 0,0000005 \text{ s}$

Resposta: O período é 0,0000005s ou $0,5 \mu\text{s}$.

Se expressarmos os dados do Exemplo 8-2 em potências de 10, a solução é:

$$T = \frac{1}{2 \times 10^6} = 0,5 \times 10^{-6} \text{ s}$$

Observe que a utilização de potências de 10 pode simplificar as operações com números muito grandes ou muito pequenos.

EXEMPLO 8-1

Qual é o tempo necessário para completar um ciclo se a frequência é 60 Hz?

Dados: $f = 60 \text{ Hz}$

Encontrar: T

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

Solução: $T = \frac{1}{60 \text{ Hz}} = 0,0167 \text{ s}$

Resposta: O tempo necessário é 0,0167 s ou 16,7 ms.

EXEMPLO 8-3

Qual é a frequência de uma forma de onda que requer 0,01s para completar um ciclo?

Dados: $T = 0,01 \text{ s}$

Encontrar: f

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

Solução: $f = \frac{1}{0,01} = 100 \text{ Hz}$

Resposta: A frequência é 100 Hz.

» Especificando a amplitude

A **AMPLITUDE** de uma forma de onda CA pode ser especificada de diferentes maneiras, como ilustrado na Figura 8-5. Essas maneiras de se especificar a amplitude são apropriadas tanto para tensão como para corrente.

Para formas de ondas simétricas, o **VALOR DE PICO** (V_p) (também chamado valor máximo) do semiciclo positivo e do semiciclo negativo são iguais. Assim, o **VALOR DE PICO A PICO** (V_{pp}) é duas vezes o valor de pico. Para uma tensão CA senoidal podemos escrever

$$V_{pp} = 2 V_p$$

Muitas das formas de onda presentes em circuitos eletrônicos não são simétricas. Tais formas de onda podem ser especificadas em termos do valor de pico ou do valor de pico a pico. Quando o valor de pico for especificado, deve-se indicar se ele se refere ao pico positivo ou negativo (como a onda não é simétrica, o pico positivo é diferente do pico negativo).

O **VALOR MÉDIO** (V_{MED}) de uma forma de onda é a média aritmética de seus valores. A determinação da média aritmética de uma forma de onda é ilustrada na Figura 8-6(a). O valor instantâneo da forma de onda é determinado em instantes de tempo com intervalos igualmente espaçados no eixo horizontal. Após, todos os valores instantâneos são somados e

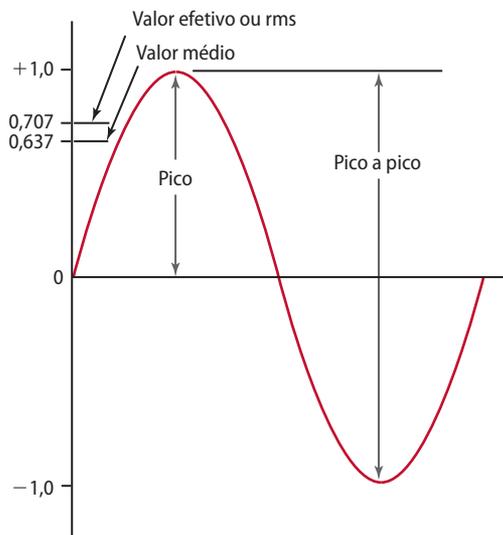
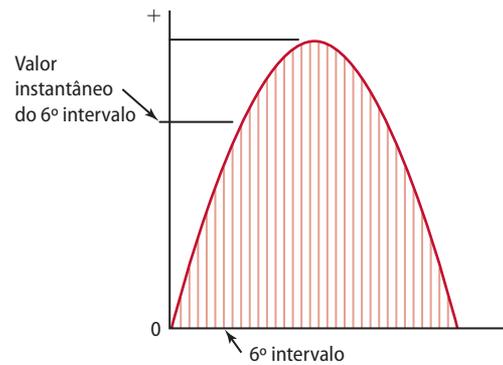
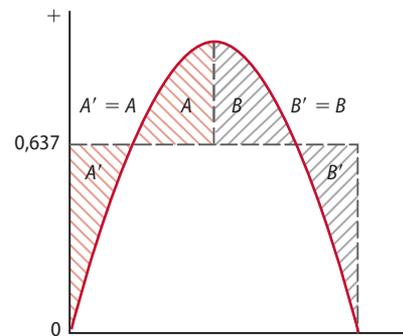


Figura 8-5 Parâmetros de uma onda senoidal. A amplitude de uma onda senoidal pode ser especificada em qualquer uma das quatro maneiras indicadas na figura.



(a) Método de determinação do valor médio



(b) Significado do valor médio

Figura 8-6 Valor médio de uma forma de onda. A soma das áreas A e B é igual à soma das áreas A' e B'.

o resultado é dividido pelo número total de intervalos. Quanto menor for o tamanho dos intervalos, mais precisa é a estimativa do valor médio de uma forma de onda. A Figura 8-6(b) fornece uma ideia complementar do significado do valor médio de uma forma de onda. A área da forma de onda acima do valor médio é igual às áreas "faltantes" abaixo do valor médio. No caso da Figura 8-6(b), a área A (área da forma de onda acima do valor médio, à esquerda) é igual a A' (área da parte "faltante" da forma de onda à esquerda). De modo similar, a área B é igual à área B'.

Para uma onda senoidal, a relação entre o valor de pico e o valor médio* está indicada na Figura 8-5. Para tensão, a relação pode ser escrita como

$$V_{MED} = 0,637 V_p$$

* N. de T.: O valor médio da onda senoidal indicado na Figura 8-5 considera apenas um semiciclo da onda. Caso sejam considerados os dois semiciclos (positivo e negativo), o valor médio da onda senoidal é nulo.

Ou, resolvendo para V_p , a relação é

$$V_p = 1,57 V_{\text{med}}$$

A relação entre os valores de pico e médio da tensão é usada quando analisamos circuitos que convertem uma tensão CA para uma tensão CC pulsante.

EXEMPLO 8-4



Qual é o valor médio de uma onda de tensão senoidal com valor de pico a pico de 300 V?

Dados: $V_{pp} = 300 \text{ V}$

Encontrar: V_{med}

Conhecido: $V_p = \frac{V_{pp}}{2}$

$$V_{\text{med}} = 0,637 V_p$$

Solução: $V_p = \frac{300 \text{ V}}{2} = 150 \text{ V}$

$$V_{\text{med}} = 0,637 \times 150 \text{ V} = 95,6 \text{ V}$$

Resposta: O valor médio de tensão é 95,6 V.

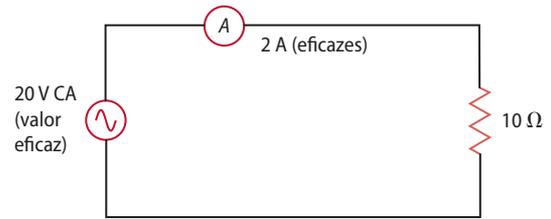
A maneira mais comum de se especificar uma corrente ou tensão alternada é informando seu **VALOR EFICAZ** ou **VALOR RMS***. Considere um circuito composto por um resistor ligado a uma fonte de tensão CA. Nesse caso, temos a circulação de uma corrente CA pelo circuito que causa aquecimento (dissipação de potência) do resistor. O valor de corrente CC (e tensão CC associada) que causaria a mesma dissipação de potência no resistor é chamado valor eficaz de corrente (e valor eficaz da tensão associada). Na Figura 8-7(a), uma fonte de tensão CA com 20 V eficazes força a circulação de uma corrente de 2 A através do resistor de 10 Ω. Isso produz uma dissipação de 40 W no resistor:

$$\begin{aligned} P &= IV \\ &= 2 \text{ A} \times 20 \text{ V} = 40 \text{ W} \end{aligned}$$

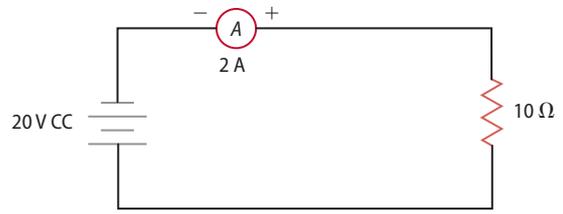
Como ilustrado na Figura 8-7(b), uma tensão CC de 20 V através de um resistor de 10 Ω, também dissiparia uma potência de 40 W.

Agora que você sabe o que significa o *valor eficaz*, vamos examinar porque ele também é chamado de *valor rms*. O valor eficaz de uma forma de onda pode ser determinado por

* N. de T.: Do inglês *Root Mean Square*.



(a) A potência dissipada é 40 W



(b) A potência dissipada é 40 W

Figura 8-7 Valores eficazes de corrente e tensão. Uma corrente contínua com valor igual ao valor eficaz de uma corrente alternada causa a mesma dissipação de potência em um resistor.

um processo matemático conhecido como raiz das médias quadráticas (raiz quadrada da média aritmética dos elementos ao quadrado). Nesse processo, a forma de onda é dividida em vários intervalos, assim como foi feito na Figura 8-6(a). O valor instantâneo de cada intervalo é elevado ao quadrado. Após, a média dos quadrados dos valores instantâneos é determinada. Finalmente, a raiz quadrada dessa média é calculada. Quando muitos intervalos são utilizados (ou seja, intervalos bem pequenos), esse processo fornece o valor eficaz da forma de onda.

Vamos utilizar um exemplo para esclarecer melhor como esse processo matemático fornece o valor eficaz. Suponhamos uma onda senoidal que representa a corrente através de um resistor de 1 Ω. Dado que $P = I^2 R$ e $R = 1 \Omega$, o valor ao quadrado em qualquer intervalo dessa onda representa a potência instantânea nesse intervalo. Assim, a média de todos esses valores ao quadrado fornece a potência média. Resolvendo $P = I^2 R$ para I , temos $\sqrt{P/R}$. Mas, como $R = 1 \Omega$, a raiz quadrada de P fornece o valor eficaz de I . Assim, podemos usar ambos os termos *valor eficaz* ou *valor rms* com o mesmo significado.

Para uma corrente CA senoidal, o valor rms (eficaz) e o valor de pico estão relacionados pelas seguintes fórmulas:

$$V_{\text{RMS}} = 0,707 V_p \quad \text{e} \quad V_p = 1,414 V_{\text{RMS}}$$

EXEMPLO 8-5

Qual é o valor de pico associado a uma tensão com valor eficaz de 127 V?

Dados: $V_{\text{rms}} = 127 \text{ V}$

Encontrar: V_p

Conhecido: $V_p = 1,414 V_{\text{rms}}$

Solução: $V_p = 1,414 \times 127 \text{ V}$
 $= 179,6 \text{ V}$

Resposta: O valor de pico da tensão é 179,6 V.

Correntes e tensões alternadas são geralmente especificadas em termos de valores rms. Desse modo, é prática bastante comum assumir que um dado valor de corrente CA está em unidades rms, mesmo que um subscrito não seja incluído (por exemplo, p, pp, med ou rms). Por exemplo, a tensão nas tomadas de nossas casas é especificada como 127 V ou 220 V (dependendo do estado brasileiro e do tipo de instalação elétrica). Esse é o valor rms da tensão.

Teste seus conhecimentos

Responda às seguintes questões.

- A unidade básica de frequência é o _____ e sua abreviatura é _____.
- Um ciclo por segundo é igual a 1 _____.
- A parte de uma forma de onda que não se repete é chamada um _____.
- A parte de uma forma de onda abaixo da linha de zero de referência é a _____ negativa ou o _____ negativo.
- A rapidez com que os ciclos de uma forma de onda são produzidos é determinada pela _____ da forma de onda.
- O valor _____ de uma forma de onda é também conhecido como valor eficaz.
- O símbolo para frequência é _____.
- Determine os seguintes parâmetros para uma onda senoidal de 28 V e 400 Hz.
 - Período.
 - V_{med} .
 - V_{pp} .
- Determine o valor de pico de corrente quando $I_{\text{med}} = 6 \text{ A}$.
- Determine o valor rms de corrente quando $I_p = 8 \text{ A}$.
- Determine a frequência de uma forma de onda que requer 0,005 s para completar uma alternância.

»» A onda senoidal

Para compreender como uma onda senoidal é produzida, precisamos entender um pouco mais sobre as tensões induzidas.

»» Tensão e corrente induzidas

Quando um condutor atravessa (corta) um fluxo magnético, uma tensão é induzida nele. Caso esse condutor complete (feche) um circuito, essa tensão induzida promove a circulação de uma corrente. Dessa forma, também podemos dizer que uma corrente foi induzida no condutor.

O valor da **TENSÃO INDUZIDA** é uma função da quantidade de fluxo cortado pelo condutor por unidade de tempo. Por sua vez, o **FLUXO CORTADO POR UNIDADE** de tempo depende:

- Da velocidade do condutor.
- Da densidade do fluxo.
- Do ângulo em que o condutor corta o fluxo magnético.

Como mostrado na Figura 8-8(a), nenhuma tensão (nem corrente) é induzida quando o condutor se move paralelamente ao fluxo. Isso porque nenhuma linha de fluxo é atravessada ou cortada. Quando a direção do movimento faz um ângulo de 45° com as linhas de fluxo, como na Figura 8-8(b), alguma tensão é induzida, pois o condutor corta algumas linhas de fluxo. Para um condutor com certa velocidade, a máxima **TENSÃO INDUZIDA** é obtida quando a direção do movimento faz um ângulo de 90° com as linhas de fluxo, como ilustrado na Figura 8-8(c).

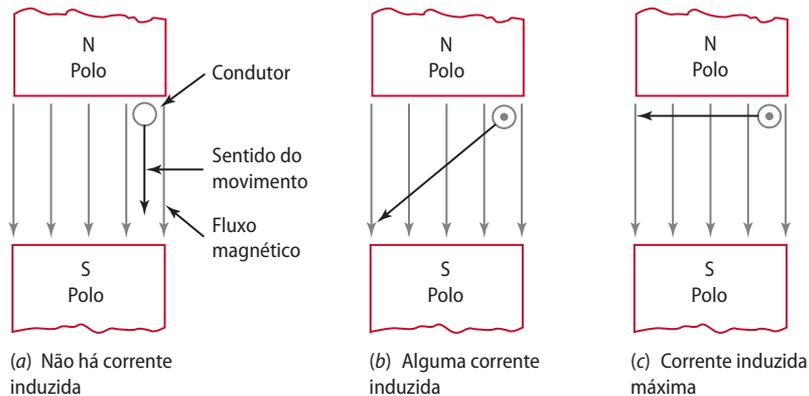


Figura 8-8 Movimento de um condutor em um campo magnético. Os valores de tensão e corrente induzidas dependem do ângulo segundo o qual o condutor corta as linhas de fluxo.

LEMBRE-SE

...o \times e \bullet no centro dos condutores nas figuras 8-8 e 8-9 indicam o sentido da corrente, como explicado no capítulo anterior.

O sentido de uma corrente induzida (ou a polaridade da tensão induzida) é determinado por dois fatores:

1. O sentido em que o condutor está se movendo.
2. A polaridade do campo magnético ou o sentido do fluxo.

A Figura 8-9 mostra as quatro possibilidades de combinação de movimento do condutor e polaridade do campo magnético.

O sentido da corrente induzida pode ser determinado usando a **REGRA DA MÃO DIREITA**, que está ilustrada na Figura 8-10. Nessa figura, o dedo polegar indica o sentido do movimento do condutor, o dedo indicador (apontado diretamente) está alinhado com a direção do fluxo e o dedo médio, fazendo um ângulo de 90° com a palma da mão, indica o sentido de circulação da corrente elétrica induzida. Aplique a regra da mão direita aos diagramas na Figura 8-9. Seu dedo médio deve apontar para dentro da página naqueles diagramas com um \times no condutor.

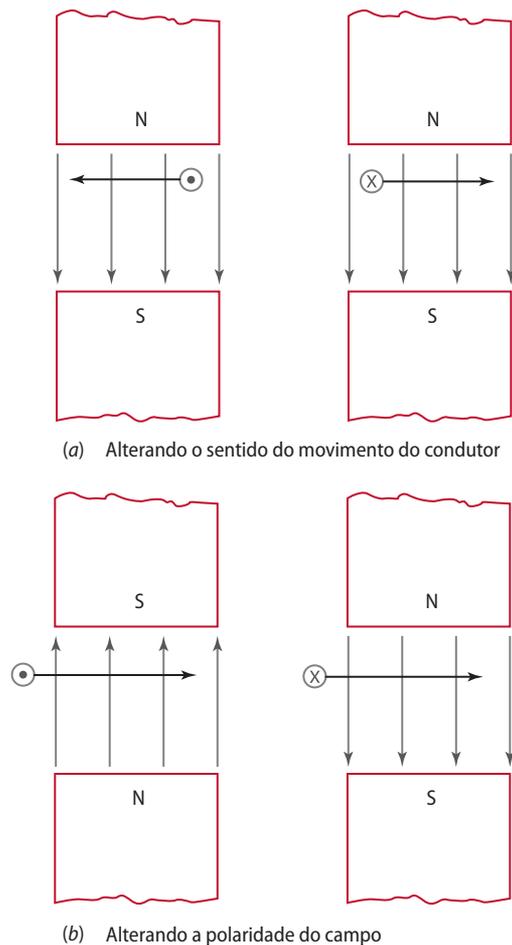


Figura 8-9 Alterando o sentido do movimento e/ou a polaridade do campo, o sentido da corrente induzida é modificado.

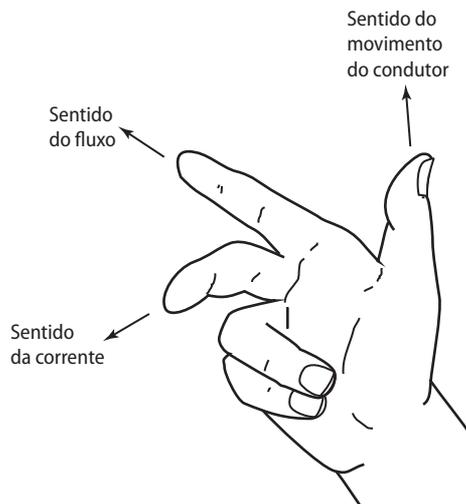


Figura 8-10 Determinação do sentido da corrente induzida utilizando a regra da mão direita.

» Produzindo uma onda senoidal

Uma onda senoidal é produzida quando um condutor é girado em um campo magnético. O condutor deve ser girado em um círculo perfeito e a uma velocidade constante. Também, o campo magnético deve ter uma densidade de fluxo uniforme. A geração de uma onda senoidal é ilustrada na Figura 8-11. Na posição 1, o condutor está se movendo paralelamente ao fluxo e não há tensão induzida nele. (Os sentidos instantâneos de movimento do condutor estão indicadas pelas setas na Figura 8-11.) À medida que o condutor gira da posição 1 para a posição 2, ele começa a cortar o fluxo segundo um pequeno ângulo. Desse modo, uma pequena tensão é induzida no condutor. A corrente produzida por essa tensão está fluindo para fora da página, como indicado pelo ponto (•) no condutor. À medida que o condutor gira da posição 3 para a posição 4, o ângulo no qual o condutor corta o fluxo aumenta. Na posição 4, o condutor se move perpendicularmente às linhas de fluxo. Nessa situação, o condutor corta o máximo de fluxo por unidade de tempo. Portanto, temos um máximo na tensão induzida (V_p), conforme ilustra a Figura 8-11(b), e o pico positivo da onda senoidal é produzido. À medida que o condutor continua seu movimento passando pelas posições 5 e 6, menos fluxo é cortado. Isso acontece porque a direção do movimento do condutor tende novamente a ter uma componente paralela ao fluxo. No instante de tempo em que o condutor chega à posição 7 (ou

Sobre a eletrônica

Faróis HID e faróis de halogênio

Os novos faróis HID* geram luz a partir de um arco criado entre dois eletrodos dentro de uma lâmpada preenchida com gases. Comparado com os faróis de halogênio, os HIDs produzem uma intensidade de luz três ou mais vezes maior, abrangem uma distância cerca de duas vezes maior, consomem aproximadamente dois terços menos energia e possuem vida útil até três vezes maior. Além disso, esses faróis tornam mais visíveis os refletores embutidos nas faixas das rodovias.

seja, direção do movimento novamente paralela ao fluxo), não há tensão induzida no condutor. A primeira alternância (semiciclo positivo) da onda senoidal foi produzida. Observe na Figura 8-11(a) que o sentido em que o condutor corta o fluxo é invertido quando o condutor deixa a posição 7. Assim, a polaridade da tensão induzida é invertida e o semiciclo negativo se inicia. Na posição 10, o máximo de tensão negativa é induzida no condutor. Finalmente, quando o condutor retorna à posição 1, a tensão induzida cai para zero. O primeiro ciclo é completado; uma onda senoidal foi produzida. Cada nova revolução (rotação completa) do condutor produz outro ciclo da onda senoidal.

» Graus elétricos e mecânicos

Observe na Figura 8-11(a) que o condutor gira 360° (uma revolução) na produção de um ciclo de uma onda senoidal. Desse modo, os valores no eixo horizontal da forma de onda podem ser especificados em graus ao invés de unidades de tempo. Isso é feito na Figura 8-12 para cada uma das 12 posições do condutor na Figura 8-11. No gráfico da Figura 8-12, pode-se observar que a onda senoidal alcança seu valor máximo (pico) em 90° e 270° e que seu valor é nulo nos ângulos 0° (360°) e 180° . Quando graus são utilizados para especificar o eixo horizontal de uma forma de onda, eles são chamados **GRAUS ELÉTRICOS**. Uma alternância (semiciclo) de uma onda senoidal contém 180 graus elétricos; um ciclo tem 360 graus elétricos.

A vantagem de se especificar o eixo horizontal em graus (em vez de segundos) é que os graus elétricos são indepen-

* N. de T.: A sigla inglesa HID – *High Intensity Discharge* – significa Descarga de Alta Intensidade.

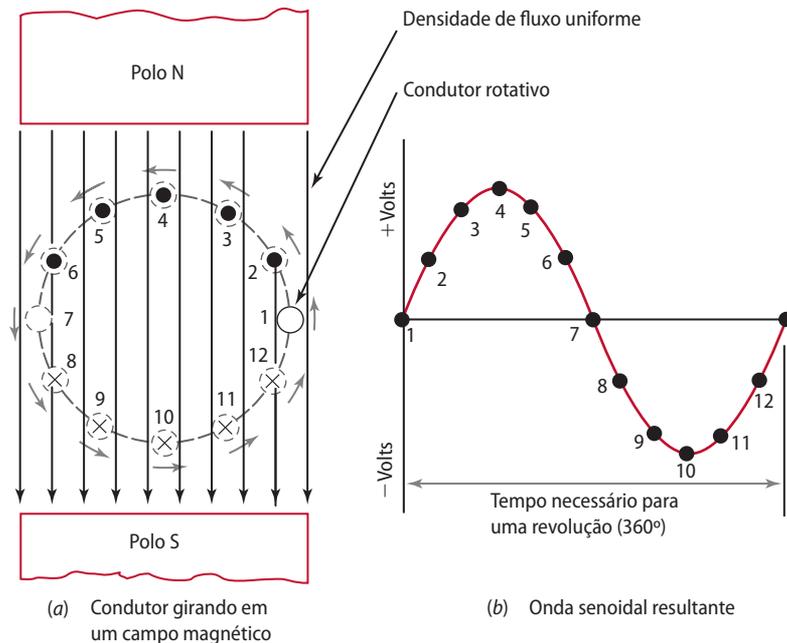


Figura 8-11 Gerando uma onda senoidal pelo movimento de rotação de um condutor através de um campo magnético.

dentes da frequência. Um ciclo tem 360° independentemente de sua frequência. No entanto, o tempo necessário para um ciclo completo (isto é, o período) é totalmente dependente da frequência. Quando o eixo horizontal é especi-

ficado em segundos (ou unidades de tempo), os valores são diferentes para cada frequência. Assim, podemos concluir que a utilização de graus elétricos é bastante conveniente e prática.

Na Figura 8-11, o número de graus elétricos é igual ao número de **GRAUS MECÂNICOS**, isto é, o condutor gira 360° graus mecânicos para produzir 360° graus elétricos da onda senoidal. Essa relação de um para um entre graus mecânicos e elétricos não é geral. Na realidade, a maior parte dos geradores CA produz mais que um ciclo por revolução.

A Figura 8-13 mostra o campo magnético produzido por um par de polos magnéticos. Esse campo produz dois ciclos por revolução do condutor. Cada 45° de rotação (por exemplo, da posição 1 para posição 2) produz 90° graus elétricos. O condutor na Figura 8-13 corta o fluxo sob o polo sul e o polo norte para cada 180° de rotação. Isso produz um ciclo (360° graus elétricos) para cada 180° graus mecânicos.

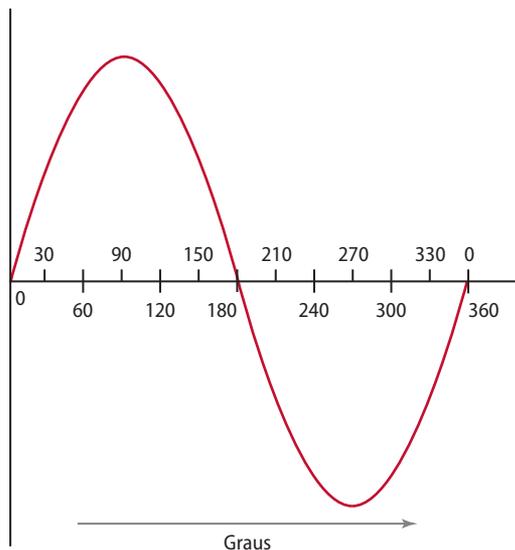
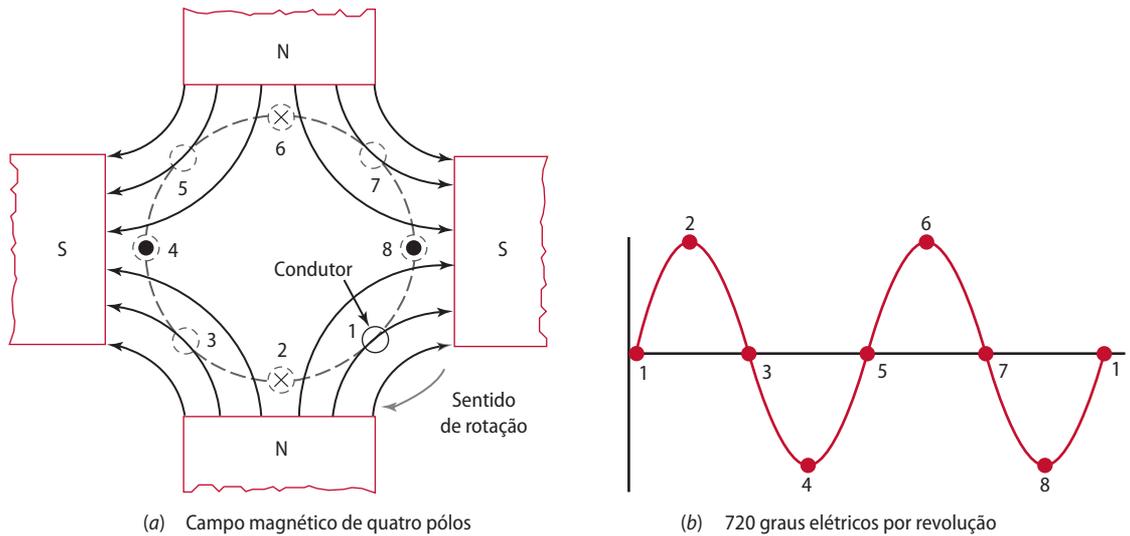


Figura 8-12 Graus de uma forma de onda. Um ciclo tem 360° graus elétricos.

» Gerador CA

Na seção anterior vimos como um condutor girando em campo magnético produz uma tensão alternada. Agora, vamos ver como essa tensão pode ser aplicada a uma carga.



(a) Campo magnético de quatro pólos

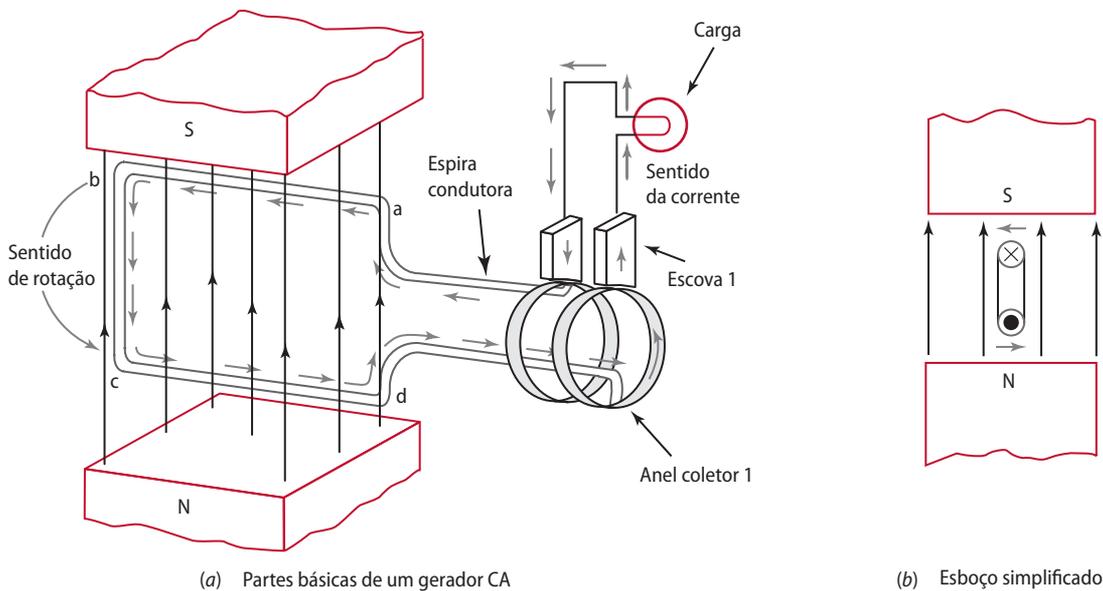
(b) 720 graus elétricos por revolução

Figura 8-13 Graus elétricos e mecânicos. Os graus mecânicos e elétricos de um gerador não precisam ser necessariamente iguais (em geral, não são iguais!).

As partes elétricas essenciais de um **GERADOR CA** estão ilustradas na Figura 8-14(a). No desenho, para fins didáticos, apenas uma espira de fio (condutor) é mostrada. Em um gerador real, temos uma bobina com muitas espiras. Essa bobina é chamada de **ENROLAMENTO**. O enrolamento é enrolado

em torno de um núcleo de aço-silício chamado **ARMADURA**. O enrolamento da armadura é composto de diversas bobinas (bobinas da armadura).

Na Figura 8-14 temos uma espira, formada pelos condutores *ab* e *cd*, que se move através de um campo magnético. A



(a) Partes básicas de um gerador CA

(b) Esboço simplificado da espira condutora

Figura 8-14 Um gerador CA. A espira condutora rotativa é conectada à carga através dos anéis coletores e das escovas.

tensão induzida na parte superior (condutor *ab*) da espira se soma à tensão induzida na parte inferior (condutor *cd*) da espira. Ambas as tensões forçam a circulação de uma corrente no mesmo sentido através da carga. A Figura 8-14(b) mostra os condutores superior (*ab*) e inferior (*cd*) da espira e o sentido da corrente utilizando a simbologia já apresentada anteriormente*. Esse esboço mostra novamente que as tensões (e correntes) induzidas nos condutores da espira girante se reforçam mutuamente.

Observe na Figura 8-14(a) que o condutor inferior *cd* está sempre em contato com o **ANEL COLETOR** 1. Esse anel sempre gira sobre a **ESCOVA** 1. Adicionalmente, observe que a escova 1 é positiva em relação à outra escova, quando a espira está na posição ilustrada. Ela permanece positiva até que a espira gire mais 90°. Depois disso, ela se torna negativa à medida que o condutor inferior *cd* começa a se mover em direção ao polo sul. A escova 1 permanece negativa nos próximos 180°, enquanto o condutor *cd* estiver sob a influência do polo sul. Após, ela se torna novamente positiva, enquanto o condutor *cd* começa a se mover em direção ao polo norte. Assim, a polaridade dos terminais de um gerador CA se inverte a cada 180 graus elétricos.

Na Figura 8-14 o campo magnético do gerador é criado por um ímã permanente. Em muitos geradores, o campo magnético é criado por um eletroímã. As bobinas que criam o eletroímã são chamadas de **BOBINAS DE CAMPO**. As bobinas de campo são alimentadas por uma corrente contínua de modo que a polaridade do campo gerado é sempre a mesma. Também, em muitos geradores de grande porte os condutores (espiras) não giram. Ao invés disso, eles são mantidos fixos e o campo magnético é girado em torno deles. O resultado final é o mesmo: uma tensão é induzida nos condutores.

»» Gerador de tensão

LEMBRE-SE

...a tensão induzida em um condutor rotativo é determinada pela densidade de fluxo e pela velocidade de rotação.

* N. de T.: Observe que a Figura 8-14(b) corresponde a uma vista lateral da Figura 8-14(a).

Em um gerador, o enrolamento rotativo consiste de bobinas com várias espiras. A tensão induzida em cada espira de uma bobina soma-se com a tensão induzida em outra espira. Assim, a tensão de saída de um gerador depende:

1. Do número de espiras nas bobinas rotativas (armadura).
2. Da velocidade na qual as bobinas giram.
3. Da densidade de fluxo do campo magnético.

»» Frequência do gerador

A velocidade na qual as bobinas do gerador giram influencia a frequência bem como a tensão de saída de um gerador. A frequência da onda senoidal produzida por um gerador é determinada por (1) o número de **PAR DE POLOS MAGNÉTICOS** e (2) a velocidade de rotação das bobinas (revoluções por minuto do eixo do gerador).

Um gerador de dois polos (um par de polos), como aquele ilustrado na Figura 8-14, produz um ciclo para cada revolução. Se esse gerador está girando a 60 rotações por minuto (rpm), que corresponde a 1 rotação por segundo (rps), a frequência é 1 Hz (um ciclo por segundo). Um gerador de quatro polos girando a uma velocidade de 60rpm produz uma onda senoidal com frequência de 2 Hz. A seguinte fórmula define a frequência de saída do gerador de acordo com sua velocidade de rotação e número de par de polos:

$$\text{Frequência} = \frac{\text{rpm}}{60} \times \text{par de polos}$$

Usando essa fórmula, a frequência é dada em hertz.

EXEMPLO 8-6



Qual é a frequência da tensão de saída de um gerador de seis polos girando a uma velocidade de 1200 rpm?

Dados: Par de polos = 3
Velocidade = 1200 rpm

Encontrar: f

Conhecido: $f = \frac{\text{rpm}}{60} \times \text{par de polos}$

Solução: $f = \frac{1200}{60} \times 3 = 60 \text{ Hz}$

Resposta: A frequência da tensão de saída do gerador é 60 Hz.

» Vantagens da corrente alternada

Uma das grandes vantagens dos sistemas em corrente alternada é a facilidade de se elevar (ou abaixar) os níveis de tensão CA por meio dos transformadores*. Essa é a principal razão pela qual a energia elétrica é transmitida (e distribuída) na forma de corrente alternada. A energia elétrica produzida nas usinas é transmitida através de linhas de transmissão que operam em altas tensões (da ordem de 500.000 V ou

superior), minimizando as perdas elétricas. Quando essas linhas se aproximam das cidades, os níveis de tensão são reduzidos (utilizando-se um transformador) para alguns milhares de volts (geralmente 13.800 V). Utilizando esse nível de tensão, a energia elétrica é distribuída na cidade através das chamadas redes de distribuição.

Outra vantagem da corrente alternada é que os motores CA são menos complexos que os motores CC. A maioria dos motores de corrente alternada podem ser construídos sem escovas e comutadores. Isso reduz de forma significativa a quantidade de manutenção necessária no motor CA.

Teste seus conhecimentos

Responda às seguintes questões.

18. Falso ou verdadeiro? Quando operado na mesma velocidade, um gerador de oito polos produz uma frequência mais elevada que um gerador de seis polos.
19. Falso ou verdadeiro? As bobinas de campo de um gerador CA são excitadas com corrente alternada.
20. Falso ou verdadeiro? Nenhuma tensão é induzida quando um condutor se move paralelamente às linhas de fluxo.
21. Falso ou verdadeiro? Um condutor cortando as linhas de fluxo segundo um ângulo de 30° produz mais tensão que um condutor cortando em um ângulo de 60° .
22. Duas revoluções de um condutor em um gerador de quatro polos produzem _____ graus elétricos.
23. Em um gerador CA, a tensão é induzida nas bobinas da _____.
24. As escovas em um gerador CA fazem contato com os _____.
25. Um gerador de seis polos girando a uma velocidade de 1000 rpm produz uma frequência de _____.
26. O que determina o valor da tensão induzida em um condutor?
27. Determine a velocidade (rpm) de um gerador de oito polos que produz uma onda senoidal de 80 V e 400 Hz.
28. Cite os fatores que determinam a polaridade de uma tensão induzida.
29. Cite as condições necessárias para indução de uma onda senoidal em um condutor.
30. Cite os fatores que determinam a tensão de saída de um gerador.
31. Cite os fatores que determinam a frequência de saída de um gerador.
32. Cite duas vantagens da corrente alternada em relação à corrente contínua.

» Corrente alternada trifásica

A eletricidade é produzida em uma usina elétrica na forma de **CORRENTE ALTERNADA TRIFÁSICA**. A fase de uma corrente trifásica é geralmente abreviada com o símbolo ϕ . Assim, um sistema trifásico é muitas vezes identificado como 3ϕ . Em um sistema alternado trifásico (Figura 8-15), cada fase é uma onda senoidal. Cada fase é *defasada* de **120 GRAUS ELÉTRICOS** das outras duas fases. Por exemplo, a fase 2 na Figura 8-15 inicia seu semiciclo positivo 120° depois da fase 1, porém 120° antes da fase 3.

A Figura 8-15 mostra que a soma algébrica das três fases em qualquer instante de tempo é zero. Por exemplo, em 60° , a fase 1 vale $+8,66$ V, a fase 2 vale $-8,66$ V e a fase 3 vale zero; logo, a soma das três fases é igual a zero. Em 150° , as fases 1 e 2 valem ambas $+5$ V, enquanto a fase 3 vale -10 V. Novamente a soma algébrica vale zero. Em 260° , a soma das tensões positivas das fases 2 e 3 é exatamente cancelada pela tensão negativa da fase 1. Escolha qualquer instante de tempo para comparar as três fases. Você perceberá que a soma da tensão de duas das fases é sempre igual em módulo à tensão da fase restante, porém com o sinal oposto.

* N. de T.: Para maiores detalhes sobre os transformadores veja o Capítulo 12.

Sobre a eletrônica

A força do vento

A força do vento pode ser utilizada como uma fonte de eletricidade. Seu aproveitamento ocorre por meio da conversão da energia cinética de translação em energia cinética de rotação, com o emprego de turbinas eólicas, também denominadas aerogeradores, para a geração de eletricidade, ou cataventos (e moinhos), para trabalhos mecânicos, como bombeamento d'água (Energia eólica, Aneel – www.aneel.gov.br). O estudante pode consultar o site a Agência Nacional de Energia Elétrica (www.aneel.gov.br) para maiores informações sobre a geração de energia eólica, o potencial eólico brasileiro e os custos envolvidos.



» Geração de uma corrente alternada trifásica

Suponha três espiras condutoras (Figura 8-16) espaçadas de 120° e girando em um campo magnético. Se as espiras são eletricamente isoladas entre si e cada uma tem seus próprios anéis coletores e escovas, então cada espira produz uma onda senoidal. Nesse caso, as três ondas senoidais estão defasadas de 120° elétricos entre si. Em outras palavras, temos um **GERADOR TRIFÁSICO**.

A ilustração da Figura 8-16 representa o início (zero graus elétricos da fase 1) das formas de onda na Figura 8-15. Na Figura 8-16, a extremidade sombreada de um condutor é considerada como o ponto de referência para aquela fase. Assim, considerando o instante ilustrado na Figura 8-16, a fase 2 é negativa e se tornará mais negativa à medida que o gerador girar mais alguns poucos graus. A fase 1 é zero e se tornará positiva e a fase 3 é positiva, mas decrescerá em valor (ampli-

tude). Observe que a análise anterior concorda com a Figura 8-15. Quando a fase 1 na Figura 8-15 torna-se positiva, a fase 3 torna-se menos positiva e a fase 2 torna-se mais negativa. Após o gerador na Figura 8-16 girar de 90° , a fase 1 estará no pico positivo, a fase 3 será negativa (e aumentando em módulo) e a fase 2 estará menos negativa.

As três fases de um gerador podem ser conectadas de modo que a carga pode ser alimentada utilizando-se somente três fios (condutores). Assim, apenas três condutores são necessários para transmitir a potência trifásica gerada em uma usina elétrica para os locais de consumo. Como veremos a seguir, as três fases do gerador podem ser conectadas em **DELTA** ou **ESTRELA**.

» Conexão delta ou triângulo

A conexão delta ou triângulo está ilustrada na Figura 8-17. Nessa figura, cada símbolo do gerador representa uma das

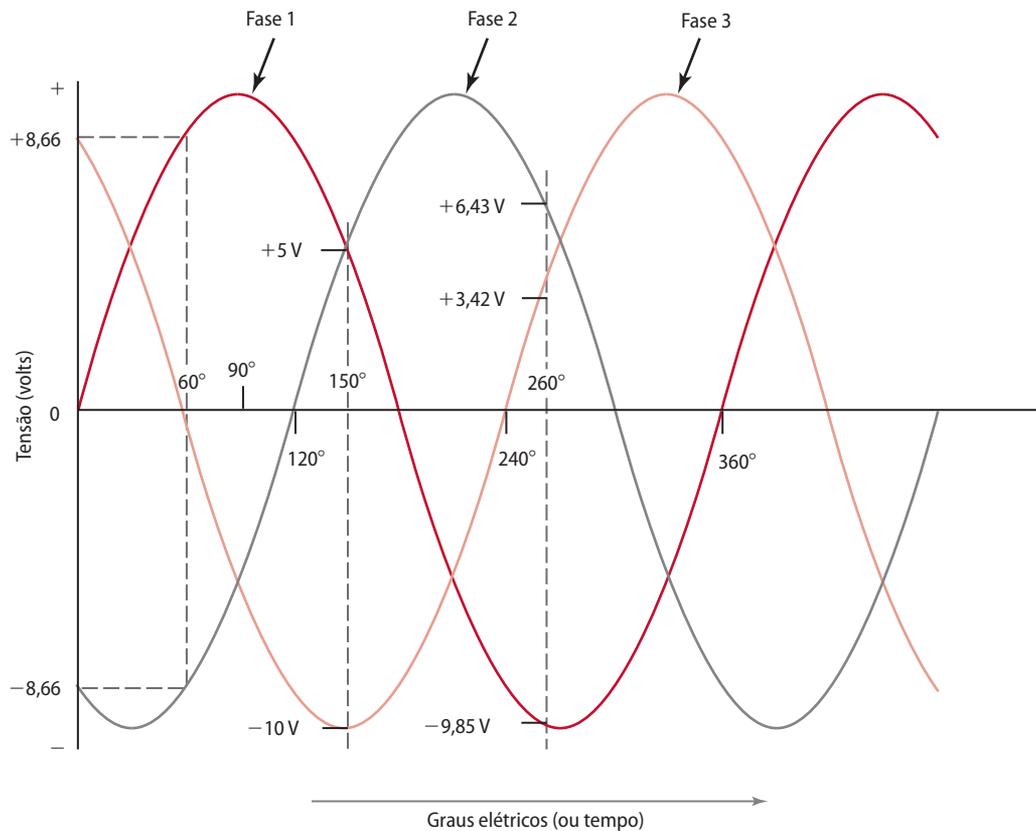


Figura 8-15 Forma de onda trifásica CA. Cada fase é defasada das outras duas de 120° elétricos.

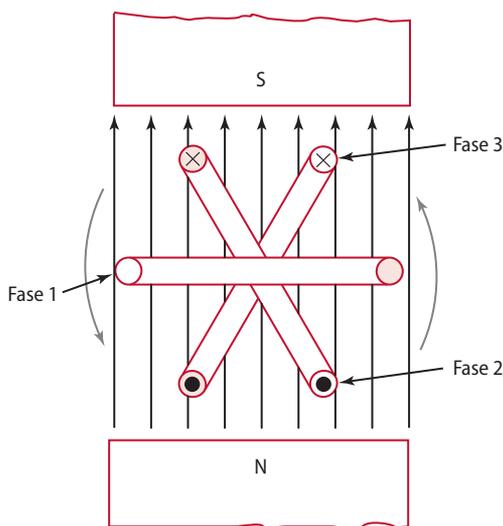


Figura 8-16 Gerador trifásico. Os condutores rotativos são ligados mecanicamente, porém isolados eletricamente.

fases de um gerador trifásico. O ponto em uma extremidade do símbolo do gerador indica o **TERMINAL DE REFERÊNCIA** do **ENROLAMENTO DE FASE**. Observe que os terminais de referência (de cada fase) não estão conectados entre si. As polaridades e os valores de tensão indicados para o gerador são instantâneos. Eles ocorrem para o ângulo de 150° na Figura 8-15. Na discussão a seguir, assumiremos um sistema balanceado (ou sistema equilibrado), isto é, todas as **TENSÕES DE FASE** são iguais e todas as cargas conectadas nos terminais do gerador são iguais.

Na conexão delta, as três fases são conectadas em uma malha contínua. Nenhuma corrente circula pela malha até uma carga ser conectada aos terminais de saída do gerador. Isso porque a soma das tensões de duas fases quaisquer é igual em módulo, porém, de sinal oposto à tensão da outra fase. Por exemplo, considerando a situação ilustrada na Figura 8-17, as tensões das fases 1 e 2 estão adicionando uma a outra. A soma dessas duas tensões é 10 V, que cancela exatamente os -10 V da fase 3.

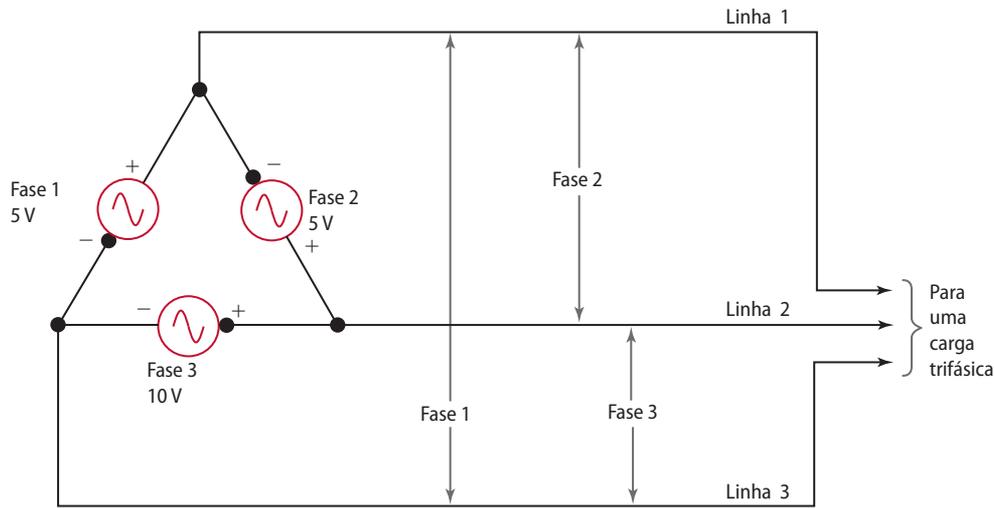


Figura 8-17 Conexão delta do gerador. As tensões de linha são iguais às tensões de fase.

Apesar das três tensões se cancelarem dentro da malha contínua (fechada), cada fase dispõe de uma tensão individual. Observe que a tensão senoidal produzida pela fase 1 do gerador está completamente disponível entre as linhas 1 e 3. De modo similar, a tensão senoidal da fase 2 está disponível entre as linhas 1 e 2 e a tensão da fase 3 está disponível entre as linhas 2 e 3. Assim, as três fases podem alimentar uma carga com um total de três linhas (ou três fios).

Observe ainda na Figura 8-17 que a tensão entre duas linhas quaisquer é exatamente igual à tensão da fase correspondente. Em outras palavras, as **TENSÕES DE LINHA** são iguais às correspondentes tensões de fase. Para uma conexão delta:

$$V_{\text{linha}} = V_{\text{fase}}$$

Quando um gerador conectado em delta alimenta uma carga trifásica (Figura 8-18), temos correntes fluindo pelas cargas, pelas linhas e pelos enrolamentos das fases. No entanto, as **CORRENTES DE LINHA** e as **CORRENTES DE FASE** não são iguais. Considerando cargas iguais conectadas a cada fase (carga balanceada ou equilibrada), a corrente de linha é $\sqrt{3}$ vezes maior que a corrente em cada fase. Para uma conexão delta

$$I_{\text{linha}} = \sqrt{3}I_{\text{fase}}$$

As correntes nas fases do gerador e as correntes nas fases correspondentes da carga são iguais. Desse modo, as correntes de linha também são $\sqrt{3}$ vezes maiores que as correntes na carga. As correntes de linha não são iguais às correntes de fase, pois cada linha drena corrente associada a duas fases diferentes. Também é importante ressaltar que, assim como as

tensões senoidais geradas, as correntes de duas fases quaisquer estão defasadas de 120° .

Observe na Figura 8-18 que nem a polaridade da tensão nem o sentido da corrente estão indicados. Isso porque em um sistema CA a polaridade da tensão e o sentido da corrente se invertem periodicamente. Nas discussões ao longo desse livro assumiremos que os valores de tensão e de corrente são valores eficazes ou rms, a menos que existam informações contrárias.

Lembre-se dos seguintes aspectos principais sobre uma conexão **DELTA BALANCEADA** ou *equilibrada*:

1. Não há corrente circulando nos enrolamentos das fases até uma carga ser conectada.
2. As tensões de linha e de fase são iguais.
3. A corrente de linha é $\sqrt{3}$ vezes maior que a corrente de fase e/ou que a corrente em cada fase da carga.

» Conexão estrela ou Y

A Figura 8-19 ilustra um gerador e uma carga trifásica, ambos conectados em **ESTRELA** ou Y. Novamente, nesse diagrama, cada símbolo do gerador representa uma das fases do gerador trifásico. As tensões e as correntes estão indicadas em valores rms (eficazes). Com a conexão estrela e cargas balanceadas (iguais), todas as correntes são iguais (a menos de um defasamento angular). Para uma conexão estrela:

$$I_{\text{linha}} = I_{\text{fase}}$$

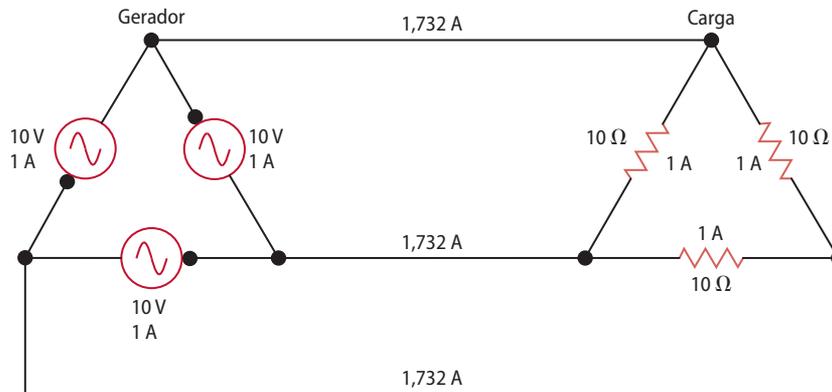


Figura 8-18 Correntes em um sistema trifásico conectado em delta. As correntes de linha são $\sqrt{3}$ vezes maiores que as correntes de fase.

No entanto, observe na Figura 8-19 que as tensões de linha são $\sqrt{3}$ vezes maiores que as tensões de fase. Para uma conexão estrela:

$$V_{\text{linha}} = \sqrt{3}V_{\text{fase}}$$

A tensão entre duas linhas é a composição de duas tensões de fase*. Como as duas tensões de fase são defasadas de 120 graus elétricos, não podemos simplesmente adicionar os valores de pico de tais tensões (caso contrário, poderíamos imaginar que $V_{\text{linha}} = 2V_{\text{fase}}$, o que não é verdade). Na realidade, a tensão de linha resultante corresponde à soma das duas tensões de fase em cada instante de tempo.

A adição de tensões de fase para obter as tensões de linha é um processo um pouco complicado devido aos diferentes pontos de referência utilizados para as tensões de fase. A Figura 8-20 vai ajudá-lo a compreender melhor os pontos de referência e a adição de tensões de fase. A Figura 8-20(b) mostra que a fase 1 vale +0,5 V em 30° elétricos. Mas, o que “+0,5 V” significa? Nada, a menos que tenhamos um ponto de referência.

LEMBRE-SE

...a tensão corresponde à *diferença de potencial entre dois pontos*.

* N. de T.: Por isso, a tensão entre linhas ou simplesmente tensão de linha é também conhecida como tensão fase-fase.

O **PONTO DE REFERÊNCIA** para as três tensões de fase é o ponto central da estrela na Figura 8-20(a). Definido esse ponto de referência, as tensões lidas da forma de onda na Figura 8-20(b) têm significado. Em 30°, a tensão de ambas as fases 1 e 3 vale 0,5 V em relação ao ponto central da estrela. Nesse mesmo ângulo, a fase 2 vale 1 V negativo, também em relação ao ponto central da estrela. Esses valores de tensão e as polaridades correspondentes estão indicados no diagrama da Figura 8-20(a). Considerando essa figura, observe que as **TENSÕES INSTANTÂNEAS** das fases 1 e 2 estão em série entre as linhas 1 e 2 (imagine um fio condutor conectando essas duas linhas). Essas duas tensões (fases 1 e 2) estão se somando nesse instante e podem, então, ser adicionadas. Juntas elas produzem 1,5 V entre as linhas 1 e 2. Considerando a Figura 8-20(b), observe que as tensões das fases 1 e 2 em 30° tem polaridades opostas. No entanto, quando conectadas em uma configuração estrela, as duas tensões têm seus efeitos somados. Observe ainda na Figura 8-20(a) que as fases 1 e 3 em série têm um efeito subtrativo. As tensões instantâneas dessas fases se anulam de modo que a tensão (instantânea) resultante entre as linhas 1 e 3 é zero.

Na Figura 8-20 estamos considerando apenas os valores instantâneos tomados em 30° na forma de onda trifásica. Obviamente, esses valores instantâneos são diferentes para cada grau (ou instante de tempo associado) da forma de onda. Se todos os valores instantâneos entre duas linhas são plotados em um gráfico, o resultado é uma onda senoidal que é $\sqrt{3}$ vezes maior que as ondas senoidais das fases correspondentes. Ao plotar a forma de onda da tensão de

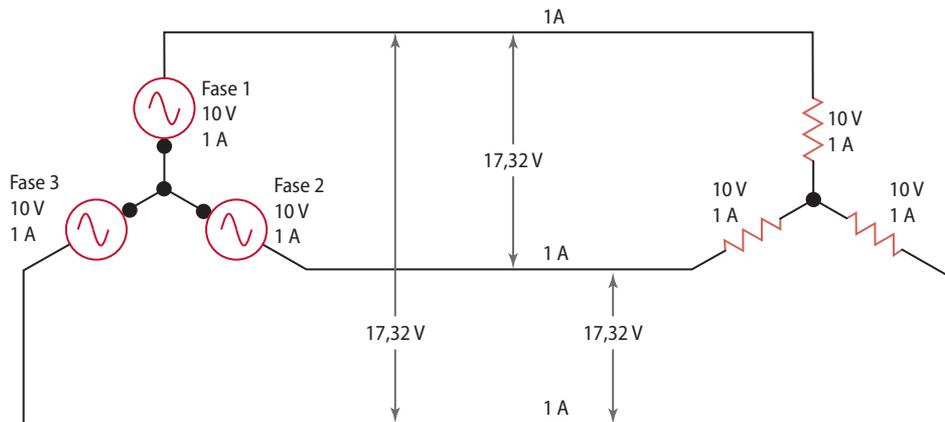
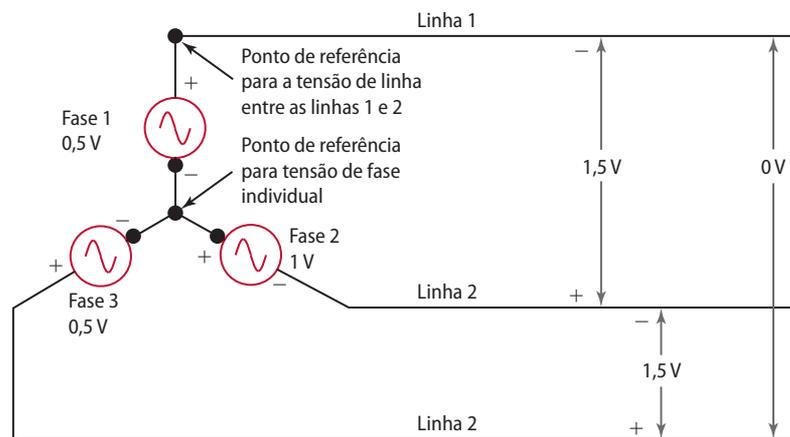


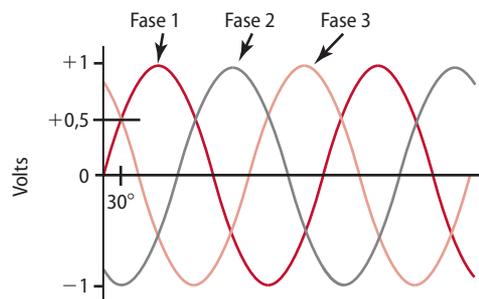
Figura 8-19 Sistema trifásico conectado em estrela. As tensões de linha são $\sqrt{3}$ maiores que as tensões de fase.

linha, é necessário escolher um ponto de referência. A seleção desse ponto é arbitrária. Vamos escolher a linha 1 como o ponto de referência. Então, podemos plotar a forma de onda

da tensão de linha entre as linhas 1 e 2. Essa forma de onda é ilustrada na Figura 8-21(a) juntamente com as formas de onda das tensões das fases 1 e 2. A tabela na Figura 8-21(b)



(a) Tensões de fase e linha instantâneas (30°) e respectivas polaridades



(b) Tensões de fase

Figura 8-20 Tensões instantâneas em um sistema conectado em estrela.



Graus elétricos	Valores instantâneos (volts)		
	Fase 1	Fase 2	Linha
0	0	-0,866	-0,866
30	+0,5	-1	-1,5
60	+0,866	-0,866	-1,732
90	+1	-0,5	-1,5
120	+0,866	0	-0,866
150	+0,5	+0,5	0
180	0	+0,866	+0,866
210	-0,5	+1	+1,5
240	-0,866	+0,866	+1,732

(b)

Figura 8-21 Adicionando as tensões de fase em um sistema estrela para obter as tensões de linha.

apresenta alguns dos valores instantâneos utilizados para plotar a forma de onda da tensão de linha. Observe, ainda, na Figura 8-21, que a tensão de linha está deslocada de 30° da tensão da fase 2. Mais precisamente a tensão de linha está atrasada da tensão da fase 2 de 30° . Em outras palavras, o pico negativo da tensão de linha ocorre 30° depois do pico negativo da tensão de fase.

Suponha agora que a linha 2 tenha sido usada como ponto de referência para a tensão de linha na Figura 8-20. Nessa situação, a polaridade da tensão seria invertida e ela começaria de valores positivos em vez de negativos. Em outras palavras, a forma de onda da tensão de linha na Figura 8-21

seria totalmente invertida. Ela começaria em $+0,866$ V, e não em $-0,866$ V. Nesse caso, a **TENSÃO DE LINHA** estaria adiantada da fase 1 de um ângulo de 30° .

Em resumo, as principais características do sistema trifásico **BALANCEADO** (equilibrado) conectado em estrela são:

1. As correntes de linha e de fase são iguais.
2. As tensões de linha são $\sqrt{3}$ maiores que as tensões de fase.
3. As tensões de linha e de fase são defasadas de 30° .

Se o valor de uma das cargas resistivas na Figura 8-19 for alterado, todas as correntes de linha e as tensões na carga também serão alteradas. Se uma das cargas resistivas tiver seu valor reduzido, então todas as correntes de linha aumentam e a tensão através da resistência reduzida diminui, enquanto a tensão através das duas resistências não modificadas aumenta. Os efeitos de se aumentar o valor de uma das resistências da carga são exatamente o contrário daqueles indicados para uma diminuição da resistência.

» Sistema estrela a quatro fios

A Figura 8-22 ilustra um sistema **ESTRELA A QUATRO FIOS** (também chamado de sistema trifásico a quatro fios ou simplesmente sistema a quatro fios). Na figura, o símbolo do gerador para cada fase foi substituído pelo símbolo de uma bobina. O símbolo da bobina representa uma das fases em um gerador trifásico. Essa é a maneira mais tradicional de se representar um gerador trifásico.

O quarto fio do sistema a quatro fios vem do ponto central comum (**PONTO CENTRO-ESTRELA**) de conexão das bobinas de fase. Esse quarto fio é geralmente chamado de **FIO NEUTRO**, pois ele é conectado eletricamente à terra. Assim, o quarto fio é neutro (não tem tensão) *em relação à terra*.

Há corrente circulando pelo fio neutro em duas condições. A primeira é quando uma única carga (monofásica) é conectada entre o neutro e uma linha. A segunda condição é quando uma carga trifásica desequilibrada conectada em estrela tem seu ponto comum ligado ao fio neutro. Nesse caso, temos uma corrente chamada corrente de desequilíbrio, que retorna ao gerador através do fio neutro.

Uma inspeção da Figura 8-22 revela a principal característica do sistema estrela a quatro fios. Esse sistema pode fornecer (com apenas quatro fios) todas as tensões necessárias em

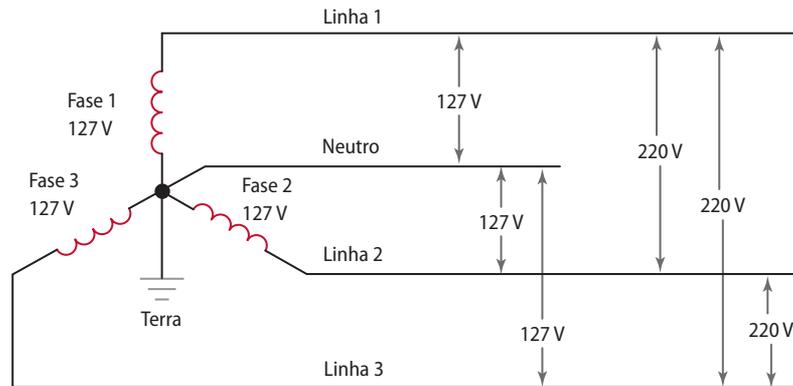


Figura 8-22 Sistema estrela a quatro fios. O sistema a quatro fios fornece 127 V fase-neutro (cargas monofásicas), 220 V fase-fase (cargas bifásicas) e 220 V de tensão de linha para cargas trifásicas.

uma pequena instalação industrial. No caso de circuitos monofásicos alimentados em 127 V, as cargas podem ser ligadas entre o neutro e qualquer uma das linhas*. No caso de circuitos bifásicos alimentados em 220 V, as cargas podem ser ligadas entre duas linhas quaisquer**. No caso de circuitos trifásicos alimentados em 220 V (tensão de linha), as cargas são ligadas às três linhas (a carga pode ser ligada em delta ou estrela). No Brasil, as tensões encontradas nos sistemas a quatro fios são 127/220 V e 220/380 V. O primeiro valor em cada caso corresponde à tensão fase-neutro. O segundo valor em cada caso é a tensão fase-fase (ou tensão de linha). Observe que a tensão fase-fase é $\sqrt{3}$ a tensão fase-neutro.

Qualquer combinação de cargas monofásicas, bifásicas e trifásicas pode ser conectada ao sistema de quatro fios sem causar uma alteração significativa nas tensões fornecidas pelo sistema. As cargas trifásicas podem ser conectadas em delta ou estrela. Essas cargas podem ser equilibradas ou desequilibradas (cargas por fase diferentes). Cargas desequilibradas alteram as correntes de linha no sistema, mas não alteram significativamente as tensões fornecidas***.

* N. de T.: A tensão entre uma linha qualquer e o neutro é também conhecida como tensão fase-neutro.

** N. de T.: Como já mencionado anteriormente, a tensão entre linhas ou simplesmente tensão de linha é também conhecida como tensão fase-fase. Repare que $127 \times \sqrt{3} \approx 220$ V.

*** N. de T.: Quando se afirma que uma carga desequilibrada não altera as tensões no sistema, estamos assumindo que o gerador que alimenta as cargas é robusto de tal maneira que as tensões fornecidas por ele são independentes da carga ligada em seus terminais.

»» Vantagens dos sistemas trifásicos

O sistema trifásico tem algumas vantagens em relação ao sistema monofásico. O sistema trifásico:

1. Torna mais eficiente o uso do cobre.
2. Fornece uma potência mais constante a uma carga ligada a um gerador trifásico.
3. Utiliza motores menos complexos e fornece um conjunto mais constante no eixo desses motores.
4. Produz uma tensão CC (e corrente resultante) mais suave quando as tensões trifásicas CA são retificadas.

Suponha um sistema monofásico e um sistema trifásico transmitindo a mesma quantidade de potência, considerando uma linha de transmissão de mesmo comprimento. O sistema de transmissão monofásico precisa de aproximadamente 1/4 a mais de cobre que o sistema trifásico, para transmitir a mesma potência e com a mesma eficiência.

A potência dissipada por uma carga resistiva é igual a I^2R . Com uma corrente monofásica, a potência requerida do gerador segue as variações da corrente. Assim, a potência na carga ligada ao gerador vai de zero até um valor máximo e volta a zero novamente em cada alternância (semiciclo da onda senoidal). Com correntes trifásicas, pelo menos duas fases estão fornecendo corrente (e, portanto, potência) em qualquer instante de tempo. Desse modo, a potência fornecida por um gerador trifásico nunca se reduz a zero. Quanto mais uniforme é a potência na carga, mais suave é a operação mecânica do gerador.

A maioria dos motores CA pode dar partida apenas se o campo magnético se comporta como se estivesse girando. Com sistemas CA monofásicos, esse campo magnético girante é criado por meio da utilização de circuitos auxiliares no motor. Depois que o motor partir, esse circuito auxiliar é desconectado por uma chave operada mecanicamente. Em um motor trifásico, o campo girante é criado como resultando da combinação dos campos magnéticos pulsantes defasados gerados pelas correntes trifásicas CA que circulam nos enrolamentos das fases. Nenhuma chave interna (ou mecanismo para operá-la) é necessária com o motor trifásico. Também é importante ressaltar que, de maneira similar ao descrito no parágrafo anterior para os geradores, os motores trifásicos fornecem um conjugado no eixo mais uniforme, pois pelo menos duas fases estão sempre produzindo campos magnéticos.

Tensões/correntes alternadas podem ser convertidas para tensões/correntes contínuas por um processo conhecido como **RETIFICAÇÃO**. O diodo retificador de silício, ilustrado na Figura 8-23(a) é um dispositivo bastante popular utilizado para retificar tensões CA. Um diodo retificador permite o fluxo de corrente apenas em um sentido. Considerando um diodo ideal, quando a tensão no anodo é negativa em relação ao catodo, o diodo apresenta resistência praticamente

infinita e não permite o fluxo de corrente. Quando a tensão no anodo é positiva em relação ao catodo, o diodo tem resistência praticamente nula e permite a circulação de corrente. Assim, considerando uma tensão CA monofásica e o circuito *retificador de MEIA ONDA* ilustrado na Figura 8-23(b), a corrente flui somente no sentido indicado nessa figura. Observe que apenas um semiciclo da tensão de entrada (o semiciclo positivo) produz um pulso de saída.

A Figura 8-24 compara as formas de onda de saída de um retificador trifásico de meia onda e de um retificador monofásico de meia onda. As formas de onda de saída estão sobrepostas às formas de onda de entrada. Observe que no caso do retificador monofásico uma tensão CC pulsante é produzida. Já no retificador trifásico uma tensão CC fluante é produzida e esta se reduz para apenas 50% do seu valor de pico.

Uma tensão CA também pode ser retificada utilizando um circuito chamado *retificador de onda completa* de modo a se obter uma saída CC mais suave. A Figura 8-25 compara as formas de onda de saída de retificadores monofásico e trifásico de onda completa. Observe que a saída do retificador trifásico nunca se reduz abaixo de 0,866 do seu valor de pico. Também, pela Figura 8-25 fica claro que o sistema trifásico produz uma saída CC com muito menos flutuação que o monofásico*.

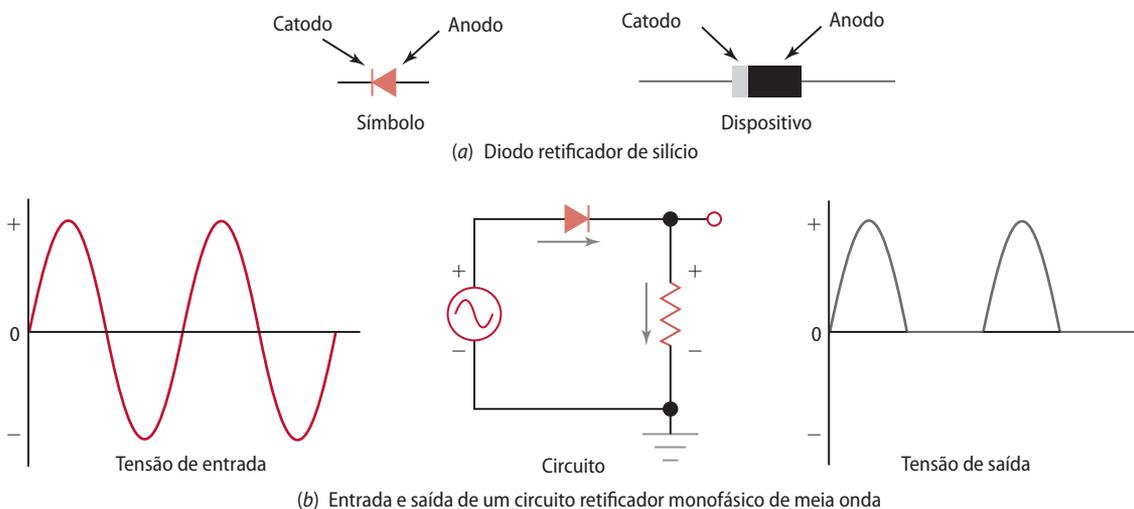


Figura 8-23 Um circuito retificador monofásico de meia onda produz um pulso de saída CC para cada ciclo da entrada CA.

* N. de T.: Essa flutuação da tensão é frequentemente chamada de *ripple*.

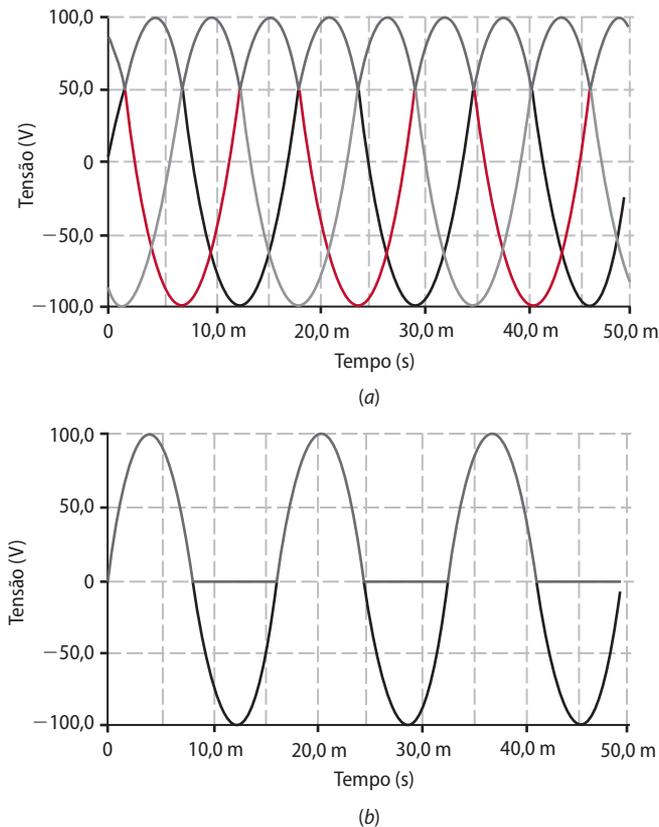


Figura 8-24 Comparação das saídas de retificadores monofásico e trifásico de meia onda. (a) Forma de onda de saída do retificador trifásico (vermelho) para três ciclos de uma entrada trifásica com $200 V_{pp}$. (b) Forma de onda de saída do retificador monofásico (vermelho) para três ciclos de uma entrada monofásica com $200 V_{pp}$.

Teste seus conhecimentos

Responda às seguintes questões.

33. As ondas senoidais de um sistema trifásico são defasadas de _____ graus elétricos.
34. A tensão instantânea da fase 2 vale _____ quando a tensão na fase 1 é $-67 V$ e na fase 3 é $+18 V$.
35. Os enrolamentos de um gerador trifásico são conectados em _____ ou em _____.
36. A transmissão de potência em um sistema trifásico requer _____ condutores.
37. Na conexão _____, os três enrolamentos de fase estão conectados em uma malha contínua (fechada).
38. Na conexão _____, a corrente de fase é igual a corrente de linha.
39. Na conexão _____, a corrente de linha é _____ vezes maior que a corrente de fase.
40. Na conexão _____, as três fases são conectadas juntas no ponto _____.
41. Na conexão _____, a tensão de linha é _____ vezes a tensão de fase.
42. Em um sistema trifásico a quatro fios, o quarto fio é chamado _____.
43. Em quais condições há corrente circulando pelo fio neutro de um sistema trifásico?
44. Cite quais são as tensões disponíveis em um sistema trifásico a quatro fios com tensão de linha de $220 V$.
45. Suponha que um gerador trifásico produz uma tensão de fase igual a $220 V$. Qual é o maior valor de tensão de linha produzida por esse mesmo gerador?
46. Que tipo de saída CC um retificador monofásico de meia onda fornece?

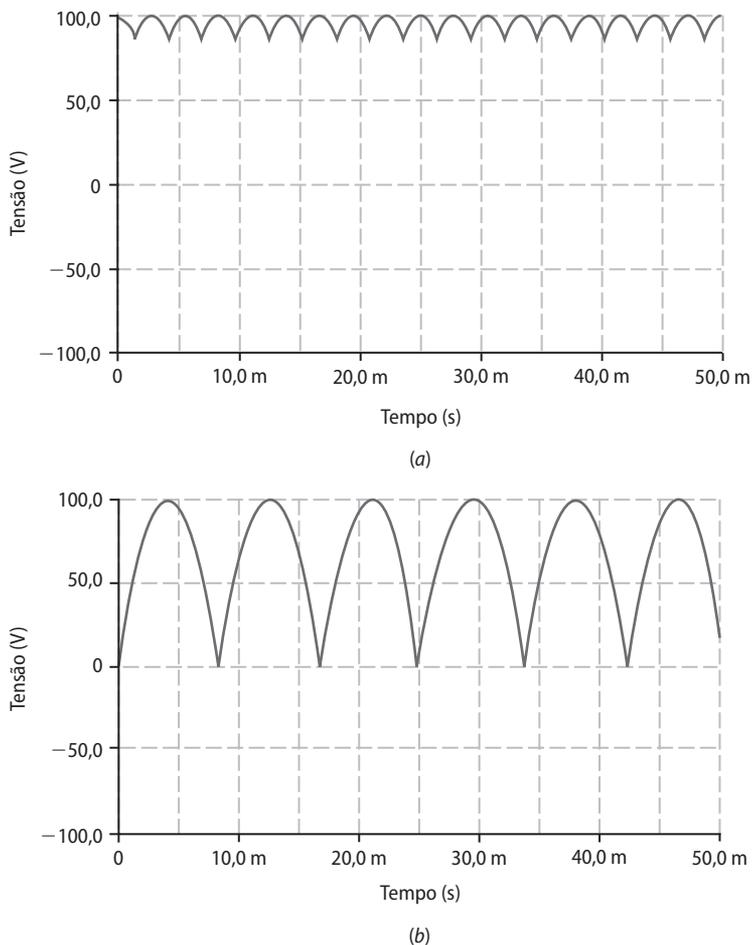


Figura 8-25 Comparação das saídas de retificadores monofásico e trifásico de onda completa. (a) Forma de onda de saída do retificador trifásico com uma entrada trifásica de $200V_{pp}$. (b) Forma de onda de saída do retificador monofásico com uma entrada monofásica de $200V_{pp}$.

Fórmulas e expressões relacionadas

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

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

$$f = \frac{\text{rpm}}{60} \times \text{par de pólos}$$

Para uma onda senoidal:

valor de pico = $1,414 \times$ valor rms

valor médio = $0,637 \times$ valor de pico

valor rms = $0,707 \times$ valor de pico

Em uma conexão delta:

$$V_{\text{linha}} = V_{\text{fase}}$$

$$I_{\text{linha}} = \sqrt{3}I_{\text{fase}}$$

Em uma conexão estrela:

$$I_{\text{linha}} = I_{\text{fase}}$$

$$V_{\text{linha}} = \sqrt{3}V_{\text{fase}}$$

Respostas

1. F
2. F
3. V
4. F
5. forma de onda
6. onda quadrada, onda senoidal, onda dente de serra
7. hertz, Hz
8. hertz
9. ciclo
10. alternância, semiciclo
11. frequência
12. rms
13. f
14. 2,5 ms; 25,2 V_{med} ; 79,2 V_{pp}
15. 9,42 A_(pico)
16. 5,656 A
17. 100 Hz
18. V
19. F
20. V
21. F
22. 1440
23. armadura
24. anéis coletores
25. 50 Hz
26. O fluxo cortado por unidade de tempo.
27. 6000 rpm
28. A polaridade do campo magnético e o sentido de movimento do condutor.
29. Campo magnético uniforme, velocidade constante de rotação do condutor e rotação em um círculo perfeito.
30. Número de espiras nas bobinas da armadura, intensidade dos polos (ou seja, do fluxo magnético resultante) e velocidade na qual a armadura gira
31. Número de polos magnéticos e rotações por minuto da armadura
32. As tensões alternadas são mais fáceis de serem elevadas e abaixadas e os motores CA apresentam menores complexidades de construção e manutenção.
33. 120
34. +49 V
35. delta, estrela
36. três
37. delta
38. estrela
39. delta, $\sqrt{3}$
40. estrela, comum ou centro-estrela
41. estrela, $\sqrt{3}$
42. neutro
43. Quando as cargas ligadas em cada fase não são iguais (ou seja, no caso de uma carga trifásica desequilibrada).
44. 127 – fase-neutro (cargas monofásicas); 220 V – fase-fase (cargas bifásicas); 220 V – tensão de linha (cargas trifásicas).
- 450 ~380 V
46. Pulsante.



Para resumo do capítulo, questões de revisão e problemas para formação de pensamento crítico, acesse www.grupoa.com.br/tekne