

# ELETROTÉCNICA

Felipe de Oliveira Baldner



SOLUÇÕES  
EDUCACIONAIS  
INTEGRADAS



# Análise de geração de corrente contínua e alternada I

## Objetivos de aprendizagem

Ao final deste texto, você deve apresentar os seguintes aprendizados:

- Identificar formas de onda em corrente contínua (CC) e corrente alternada (CA), bem como os tipos de geração.
- Distinguir sistemas CA monofásicos de trifásicos, além de suas vantagens e padrões.
- Relacionar os valores eficaz, médio, de pico e pico a pico de uma forma de onda senoidal.

## Introdução

Neste capítulo, você conseguirá distinguir formas de onda em corrente contínua (CC) e corrente alternada (CA), identificar as principais formas de geração e os parâmetros controláveis para obtenção de energia nessas formas.

Atualmente, com a existência de diversos tipos de formas de geração de energia, tanto as mais tradicionais quanto as sustentáveis, é necessário identificar parâmetros de cada tipo de geração em CA, trifásica ou monofásica, para uma instalação residencial, comercial ou até mesmo industrial.

Por fim, as formas de onda senoidais serão estudadas de modo a extrair todas as características presentes e entender suas aplicações.

## Geração de energia

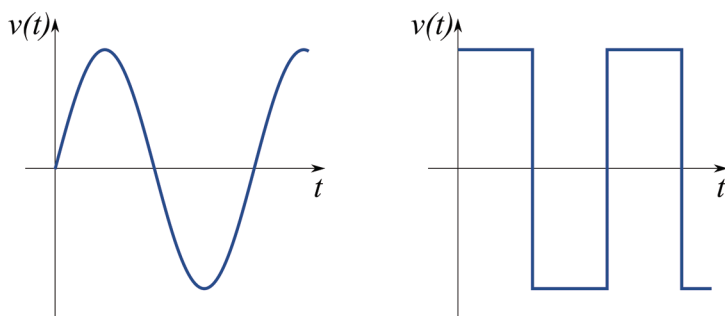
Hoje, os equipamentos elétrico-eletrônicos são onipresentes em todos os tipos de ambientes — do celular às máquinas de cartão de crédito em um estabelecimento comercial, além dos motores elétricos que permitem a produção industrial, sem contar os sistemas de iluminação que possibilitam a realização de tudo isso. Por mais que todas essas atividades não pareçam se relacionar, há um ponto em comum entre todas: a energia. Todas essas atividades se caracterizam por apresentar uma fonte de energia acoplada, seja esta móvel, como no caso das baterias, seja fixa, como tomadas e pontos de ligação.

Assim, torna-se necessário compreender os modos como a energia é fornecida aos diferentes tipos de cargas, bem como a maneira como essa energia é gerada.

A corrente alternada (CA) se caracteriza por um sinal elétrico que:

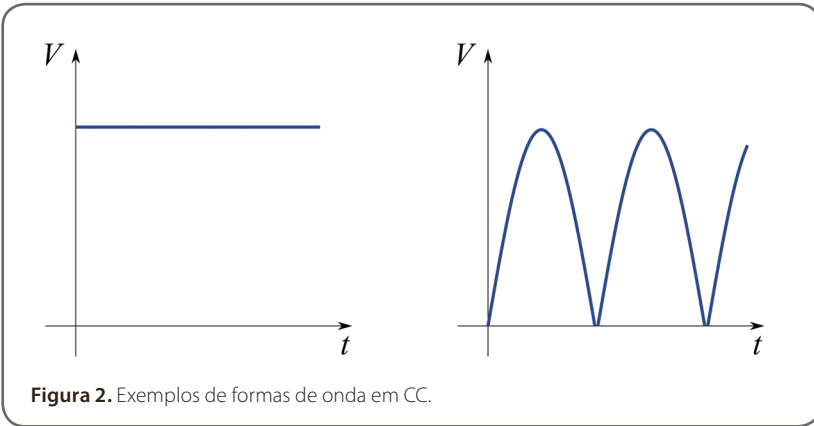
- seja periódico, ou seja, que se repita a cada período  $T$  (em segundos);
- seja simétrico, em que a forma de onda em metade do período é igual à forma de onda da outra metade, mas com sinal negativo;
- tenha a mesma amplitude positiva e negativa.

A partir dessas características, pode-se visualizar dois tipos de formas de onda alternadas na Figura 1, uma com forma senoidal e a outra, quadrada (PETRUZELLA, 2013).



**Figura 1.** Exemplos de formas de onda em CA.

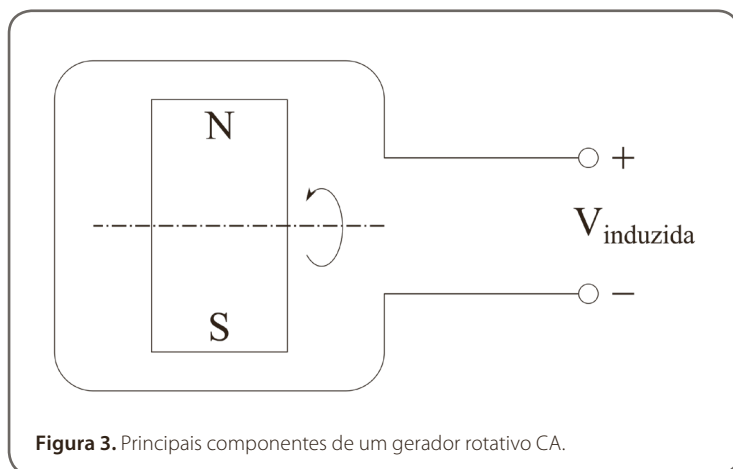
Já a energia gerada em corrente contínua (CC) tem uma forma de onda que se caracteriza por ter apenas um sinal, ou positivo ou negativo, constante ou variante no tempo, como pode ser visto nos exemplos da Figura 2 (PETRUZELLA, 2013).



## Geração de corrente alternada

A geração de CA é um processo eletromecânico que se dá pelo movimento de um campo magnético em um condutor estacionário. O condutor estacionário (estator do gerador) é composto por uma bobina com  $N$  espiras, enquanto a parte móvel (rotor do gerador) constitui-se por um ímã ou eletroímã que gerará o campo magnético. O movimento do rotor no interior da bobina faz com que, a cada instante, o ímã esteja em uma posição diferente, para que uma quantidade diferente de fluxo magnético passe pela bobina. Pela lei de Faraday, a tensão (também denominada força eletromotriz) induzida por esse processo é dada pela equação (1), em que o fluxo é descrito matematicamente por uma função senoidal, que gira em uma frequência angular  $\omega$  (UMANS, 2014). A Figura 3 exhibe esquematicamente os principais componentes de um gerador rotativo de CA.

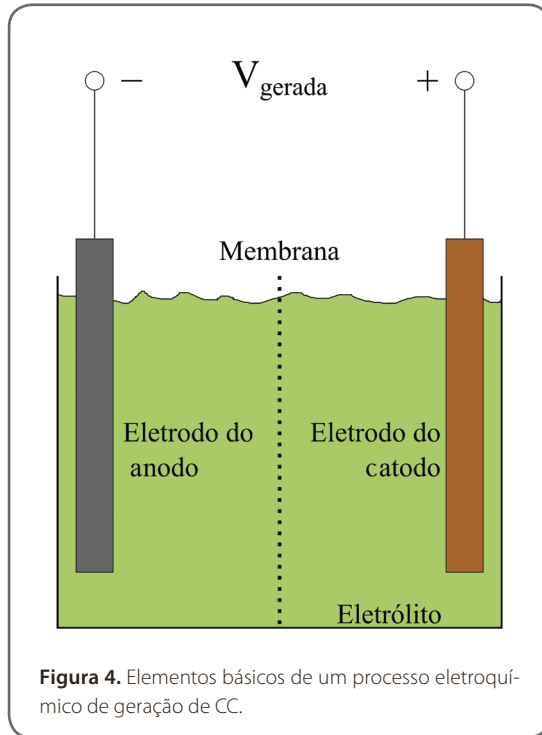
$$V_{\text{induzida}} = N \frac{d\phi}{dt} = N \frac{d}{dt} [\phi_{\text{máx}} \sin(\omega t)] = N \omega \phi_{\text{máx}} \cos(\omega t) \therefore V_{\text{induzida}} = V_{\text{máx}} \cos(\omega t) \quad (1)$$



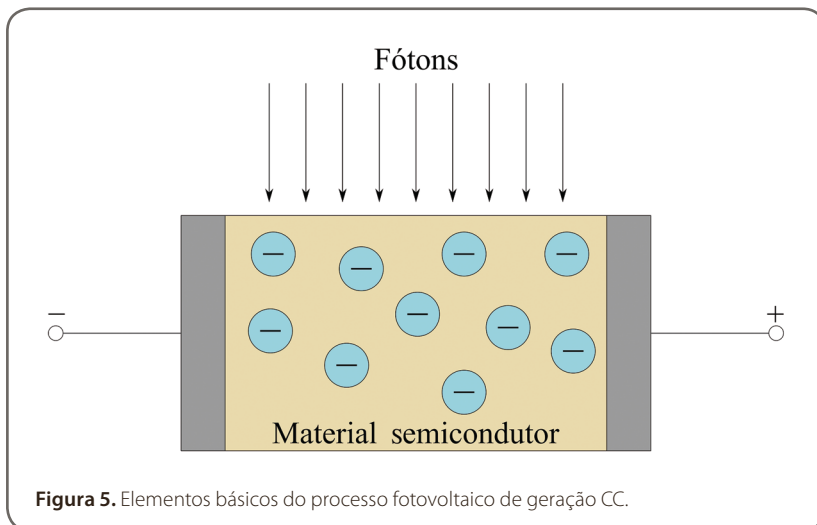
## Geração de corrente contínua

A CC pode ser gerada de diversas maneiras, como a partir de reações químicas (baterias), exposição de certos materiais à luz (efeito fotovoltaico), transformação da tensão CA (processo de retificação) ou utilização de geradores CC.

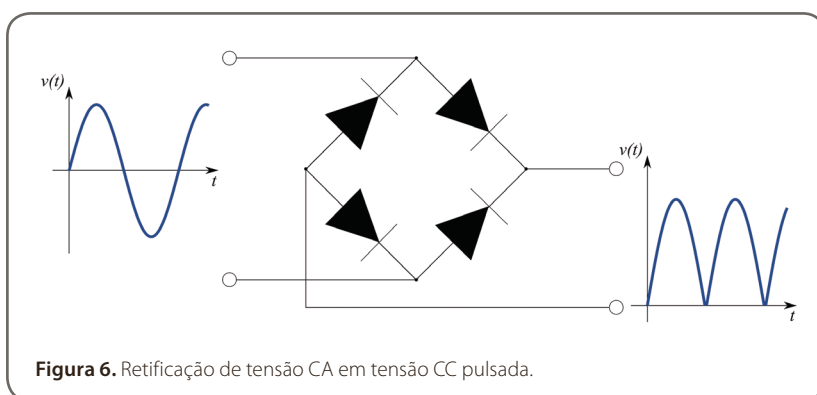
As baterias são compostas por dois eletrodos de material metálico imersos em um eletrólito, com uma membrana separando-os, como mostra a Figura 4. Nesse meio, ocorre um processo de oxirredução desses materiais, fazendo com que haja um fluxo de elétrons saindo do material sofrendo oxidação (anodo) em direção ao material sofrendo redução (catodo). A membrana evita que seja fechado um curto-circuito entre o anodo e catodo, além de ajudar no fluxo de íons. Como o sentido da corrente elétrica é dado pelos materiais empregados como eletrodos, não haverá mudança de seu sentido.



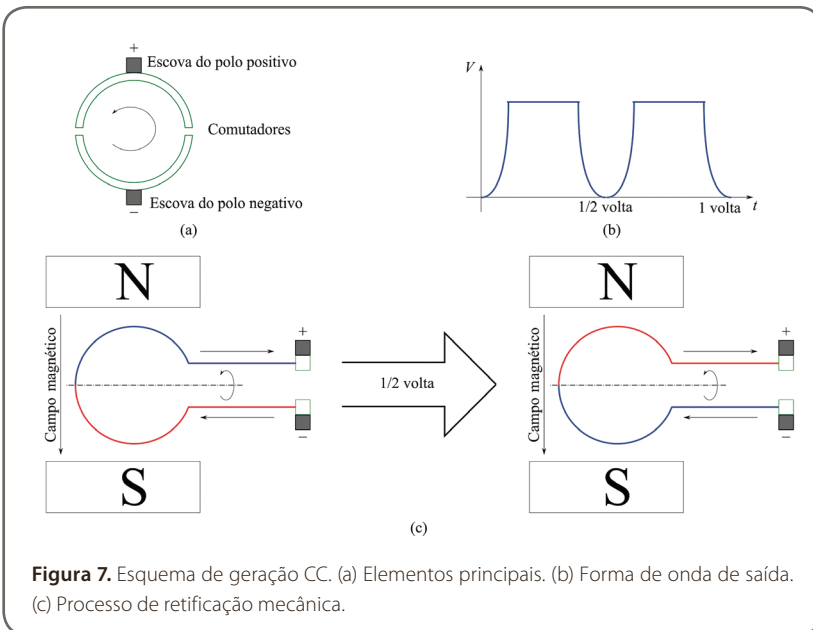
O processo de geração fotovoltaica consiste na excitação de cargas pelos fótons presentes na luz solar, fazendo com que essas cargas ganhem energia cinética e produzam corrente elétrica dentro de um material semicondutor. Cada pequeno pedaço de material é chamado de célula fotovoltaica e seu arranjo em série e paralelo forma as placas fotovoltaicas, gerando CC em seus terminais. A Figura 5 apresenta de forma esquemática seus componentes.



O processo de transformação de energia de CA para CC é chamado de retificação. Utilizando uma ponte de diodos, como mostrado na Figura 6, o sinal CA é transformado em um sinal CC pulsado. Adicionalmente, podem ser adicionados capacitores e circuitos reguladores de tensão para uma tensão CC constante (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013).



Um gerador CC tem estrutura similar a um gerador CA. Contudo, uma de suas diferenças reside na construção, já que o ímã permanente está presente no estator, enquanto a bobina na qual a tensão é induzida fica no rotor. Os terminais de saída estão ligados a escovas que fazem contato com o rotor por meio de um anel segmentado, onde cada parte faz contato com uma extremidade da bobina. Como o ímã é fixo, a corrente induzida pelo fluxo magnético terá sempre um mesmo sentido. Assim, cada escova sempre terá contato com a corrente induzida pelo mesmo polo: a escova positiva com o polo norte e a negativa com o polo sul. Esse processo também é conhecido como retificação mecânica. Dessa forma, a tensão gerada nos terminais das escovas terá sempre o mesmo sinal, como pode ser visto no esquema da Figura 7 (UMANS, 2014).



**Figura 7.** Esquema de geração CC. (a) Elementos principais. (b) Forma de onda de saída. (c) Processo de retificação mecânica.

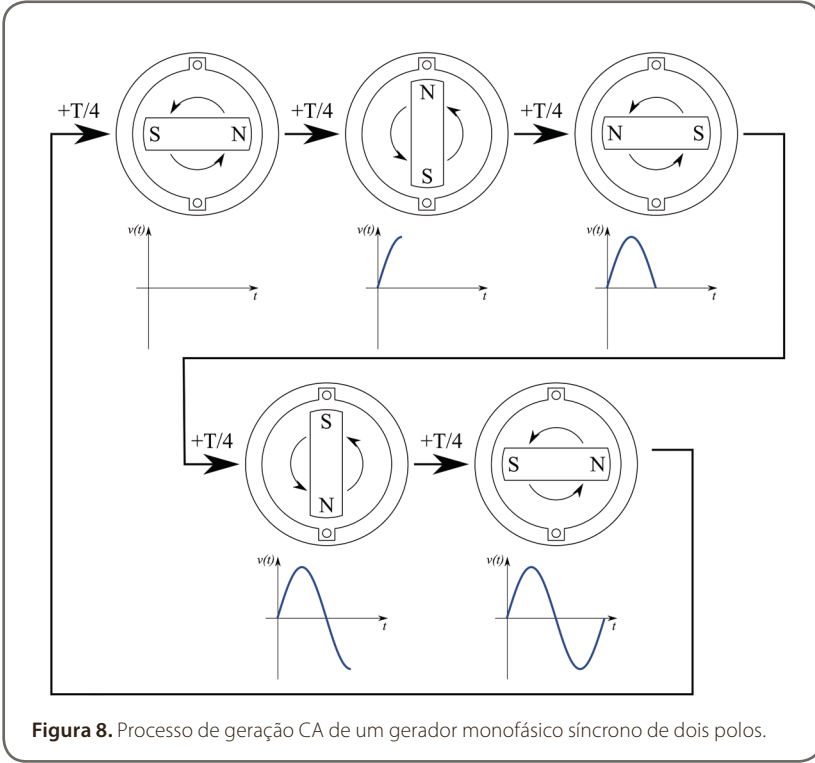


## Sistemas CA monofásicos e trifásicos

Um gerador CA tem como saída um único sinal senoidal de tensão para alimentar cargas, passando por dois condutores, a fase e o neutro. Outro tipo de sistema CA empregado é o trifásico, que apresenta as seguintes vantagens em relação ao monofásico (KELJIK, 2013; MEIER, 2006; MORRIS, 1996):

- um gerador trifásico a quatro fios, três fases e um neutro, fornece três vezes mais energia do que um gerador monofásico a dois fios;
- a eficiência de um gerador trifásico é maior, ou seja, produz mais energia, proporcionalmente;
- em um gerador trifásico o torque de saída é praticamente constante, enquanto no monofásico é pulsado;
- geradores trifásicos são de fácil paralelização e sincronização em comparação ao monofásico.

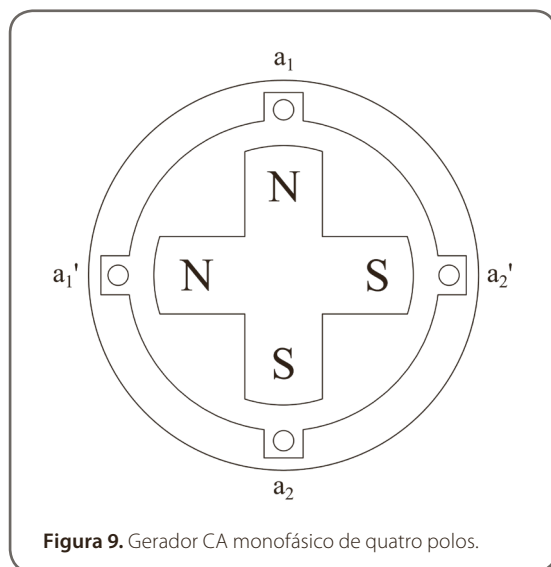
Construtivamente, um gerador CA é composto por uma parte fixa, o estator, e uma parte rotativa, o rotor. O tipo mais comum de gerador CA, o síncrono, constitui-se por um ímã permanente ou eletroímã no rotor que gera um campo magnético responsável por induzir tensão elétrica nos enrolamentos do estator. O gerador mais simples é composto por um ímã permanente de dois polos no rotor e dois enrolamentos no estator. O rotor, sofrendo ação externa, girará e induzirá uma tensão em cada enrolamento. Conforme o polo do rotor se afasta do enrolamento do estator, a tensão induzida diminui até chegar a zero. A partir desse instante, a tensão continua a diminuir até que o outro polo do rotor (de sentido oposto) esteja próximo ao enrolamento. Nesse momento, a tensão induzida é mínima. O processo então se repete, como se observa no esquema da Figura 8 (UMANS, 2014).



**Figura 8.** Processo de geração CA de um gerador monofásico síncrono de dois polos.

Observando a curva da tensão induzida da Figura 8, pode-se perceber que, se o tempo que um polo do rotor leva até obter uma revolução completa for menor, a frequência da tensão induzida será maior. Outra maneira de obter esse mesmo resultado é aumentando a quantidade de polos do rotor e enrolamentos do estator. Assim, a frequência  $f$  (em hertz) de um gerador CA de  $P$  polos (lembrando que  $P$  pode ser apenas números pares) pode ser encontrada pela equação (2), em que  $n$  é a velocidade angular mecânica do motor em rotações por minuto. A Figura 9 exemplifica um gerador CA de quatro polos. Nesse caso, os enrolamentos  $a_1-a_1'$  e  $a_2-a_2'$  devem ser ligados em série para a obtenção da tensão induzida (UMANS, 2014).

$$f = \left(\frac{P}{2}\right) \left(\frac{n}{60}\right) \quad (2)$$



**Figura 9.** Gerador CA monofásico de quatro polos.



### Exemplo

Ao projetar um gerador CA monofásico para uma frequência de 60 Hz, qual deve ser a velocidade angular mecânica da fonte de energia mecânica para um rotor com (a) dois polos, (b) quatro polos e (c) seis polos?

Utilizando a equação (2) e resolvendo para a velocidade angular mecânica  $n$ :

$$n = \frac{120f}{P}$$

Para um rotor com dois polos:

$$n = \frac{120(60 \text{ Hz})}{2} \therefore n = 3600 \text{ rpm}$$

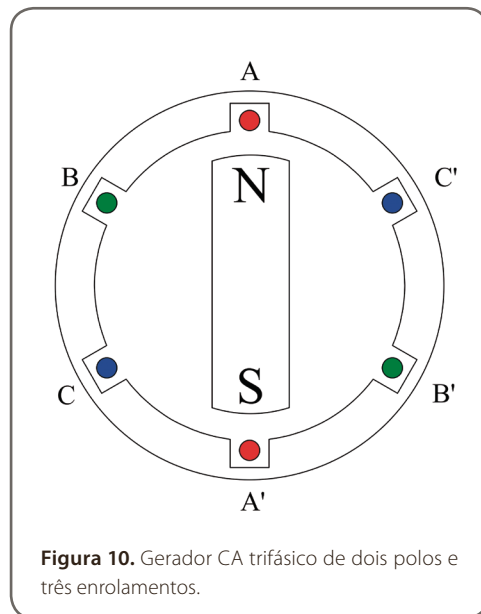
Para um rotor com quatro polos:

$$n = \frac{120(60 \text{ Hz})}{4} \therefore n = 1800 \text{ rpm}$$

Para um rotor com seis polos:

$$n = \frac{120(60 \text{ Hz})}{6} \therefore n = 1200 \text{ rpm}$$

Os geradores CA trifásicos têm estrutura similar, embora haja uma diferença inicial na quantidade de polos e enrolamentos. Enquanto a quantidade de polos deve ser múltipla de 2, em razão da fonte de campo magnético, os enrolamentos devem ser múltiplos de 3. Para prover energia de forma simétrica, as tensões induzidas de cada fase serão defasadas de  $120^\circ$  em unidades de tempo. Para isso, os enrolamentos de cada fase também deverão estar afastados de  $120^\circ$  mecânicos, como pode ser observado no esquema da Figura 10 (FLARYS, 2013; PETRUZELLA, 2013).



A energia CA que chega a residências, comércios e indústria é gerada, transmitida e distribuída pelo Sistema Elétrico de Potência (SEP), constituído, por sua vez, de geradoras de energia, linhas de transmissão, subestações transformadoras e linhas de distribuição. Em cada uma dessas etapas, a tensão tem diferentes níveis. A baixa tensão (BT) é aquela presente nas cidades e tem valores inferiores a 1.000 V. Os principais níveis de tensão BT existentes são o 127 V/220 V e o 220 V/380 V, operando em 60 Hz ou 50 Hz de acordo com o país. Nestes, o primeiro valor refere-se à tensão entre fase e neutro, também conhecida como tensão de fase, enquanto o segundo faz menção à tensão entre duas fases, também conhecida como tensão de linha. A média tensão (MT) é aquela cuja tensão tem valores entre 1.000 V e 50 kV e a alta tensão (AT) valores entre 50 kV e 230 kV. Adicionalmente, existem duas faixas, a extra alta tensão (EAT), compreendendo tensões entre 230 kV e 750 kV, e a ultra alta tensão (UAT), com tensões acima de 750 kV (MONTICELLI; GARCIA, 2011).



### Link

O Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) é responsável por coordenar e controlar todas as atividades relacionadas às etapas de geração e transmissão de energia no Brasil, conforme observado no *link* a seguir.

<https://qrqo.page.link/3sN9B>

Já a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) regula todas as atividades associadas ao SEP no Brasil, fiscalizando as concessionárias de energia das cidades:

<https://qrqo.page.link/Z9JdG>

## Parâmetros de formas de onda CA senoidais

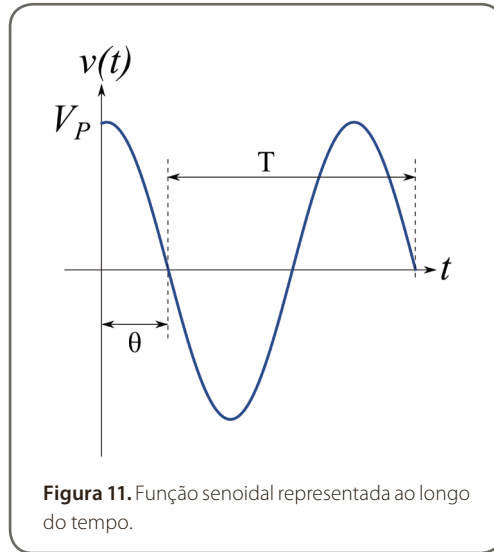
Uma forma de onda senoidal varia ao longo do tempo, com valor instantâneo  $v(t)$  (na unidade da grandeza senoidal) em um instante  $t$  (em segundos) e tem como parâmetros sua amplitude ( $V_{\max}$ , na unidade da grandeza senoidal — também conhecida como valor de pico), sua frequência angular ( $\omega$ , em rad/s) e uma defasagem ( $\theta$ , em rad). Matematicamente, pode ser descrita com esses parâmetros, pela equação (3). A frequência angular relaciona-se à frequência  $f$

e ao período  $T$ , como mostram as equações (4) e (5), respectivamente. O valor de pico a pico de uma função senoidal é o dobro de sua amplitude. Graficamente, a função senoidal da equação (3) é mostrada na Figura 11 (HAYT JR.; KEMMERLY; DURBIN, 2014).

$$v(t) = V_{\max} \sin(\omega t + \theta) \quad (3)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (4)$$

$$T = \frac{1}{f} = \frac{2\pi}{\omega} \quad (5)$$



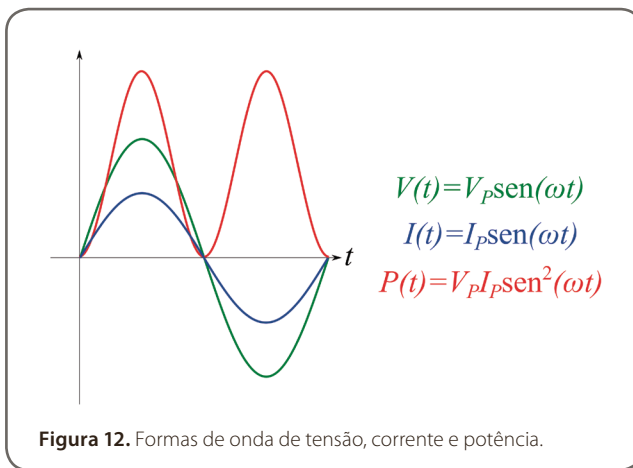
Os sinais de tensão e corrente fornecidos por um gerador a uma carga também terão a mesma forma matemática da equação (3). Assim, em um sistema monofásico, a tensão e a corrente que alimentam uma carga resistiva são dadas pelas equações (6) e (7), respectivamente. A potência instantânea fornecida por este gerador é oferecida pelo produto entre sua tensão e corrente, como mostra a equação (8).

$$v(t) = V_{\max} \text{sen}(\omega t) \quad (6)$$

$$i(t) = I_{\max} \text{sen}(\omega t) \quad (7)$$

$$p(t) = v(t)i(t) = V_{\max} I_{\max} \text{sen}^2(\omega t) \quad (8)$$

Essas três formas de onda podem ser vistas no gráfico da Figura 12.



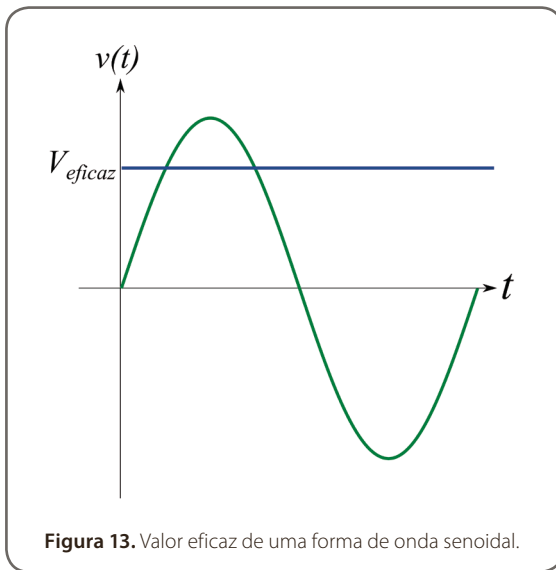
É possível perceber que, como os valores de tensão e corrente variam no tempo, a potência fornecida também se altera. Em comparação a sistemas CC, há apenas um valor constante para tensão, corrente e potência. Chama-se valor eficaz de uma corrente ou tensão senoidal aquele que é numericamente igual a uma tensão e corrente CC por dissiparem a mesma potência em uma carga resistiva. É importante notar que a potência não tem um valor eficaz, pois, matematicamente, é representada pela função senoidal ao quadrado. Matematicamente, o valor eficaz de qualquer função que varia periodicamente no tempo é encontrado pela equação (9) (HAYT JR.; KEMMERLY; DURBIN, 2014).

$$V_{eficaz} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v(t) dt} \quad (9)$$

Para um sinal senoidal, o valor eficaz é constante e relaciona-se, respectivamente, ao valor de pico e ao valor de pico a pico de uma senoide de acordo com as equações (10) e (11). Graficamente, é representado na Figura 13.

$$V_{eficaz} = \frac{V_P}{\sqrt{2}} \quad (10)$$

$$V_{eficaz} = \frac{V_{PP}}{2\sqrt{2}} \quad (11)$$





O valor médio de uma função matemática que varia ao longo do tempo é aquele a qual tende em um intervalo definido de tempo, determinado pela equação (12).

$$V_{\text{médio}} = \frac{1}{b-a} \int_a^b v(t) dt \quad (12)$$

Aplicando a equação (11) à função de tensão senoidal da equação (6), é possível encontrar como resultado para a tensão média o valor 0. Analisando graficamente a função, ela é simétrica tanto no eixo do tempo quanto no da tensão, o que significa que, dentro de um período, ela passará a mesma quantidade de tempo com valores negativos e positivos, bem como seu valor de pico positivo é igual ao seu valor de pico negativo, justificando o valor encontrado como tensão média.



### Exemplo

Determine os valores de pico e de pico a pico para tensões eficazes de (a) 127 V, (b) 220 V e (c) 380 V.

Utilizando o resultado das equações (10) e (11), é possível determinar que:

$$V_P = \sqrt{2}V_{\text{eficaz}}$$

$$V_{PP} = 2\sqrt{2}V_{\text{eficaz}}$$

Para uma tensão eficaz de 127 V:

$$V_P = \sqrt{2}(127 \text{ V}) \therefore V_P = 179,61 \text{ V}$$

$$V_{PP} = 2\sqrt{2}(127 \text{ V}) \therefore V_{PP} = 359,22 \text{ V}$$

Para uma tensão eficaz de 220 V:

$$V_P = \sqrt{2}(220 \text{ V}) \therefore V_P = 311,13 \text{ V}$$

$$V_{PP} = 2\sqrt{2}(220 \text{ V}) \therefore V_{PP} = 622,26 \text{ V}$$

Para uma tensão eficaz de 380 V:

$$V_P = \sqrt{2}(380 \text{ V}) \therefore V_P = 537,40 \text{ V}$$

$$V_{PP} = 2\sqrt{2}(380 \text{ V}) \therefore V_{PP} = 1074,80 \text{ V}$$



## Referências

BOYLESTAD, R. L.; NASHIELSKY, L. *Dispositivos eletrônicos e teoria dos circuitos*. 11. ed. São Paulo: Pearson, 2013.

FLARYS, F. *Eletrotécnica geral: teoria e exercícios resolvidos*. 2. ed. Barueri: Manole, 2013.

HAYT JR., W. H.; KEMMERLY, J. E.; DURBIN, S. M. *Análise de circuitos em engenharia*. 8. ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

KELJIK, J. *Electricity 3: power generation and delivery*. 10. ed. Clifton Park: Cengage Learning, 2013.

MEIER, A. *Electric power systems: a conceptual introduction*. New Jersey: John Wiley & Sons, 2006.

MONTICELLI, A.; GARCIA, A. *Introdução a sistemas de energia elétrica*. 2. ed. São Paulo: Unicamp, 2011.

MORRIS, N. M. *Mastering electronic and electrical calculations*. London: Macmillan, 1996.

PETRUZELLA, F. D. *Eletrotécnica II*. Porto Alegre: AMGH, 2013. (Série Tekne).

UMANS, S. D. *Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley*. 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

## Leituras recomendadas

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. [2019]. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/>. Acesso em: 10 jun. 2019.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. c2019. Disponível em: <http://www.ons.org.br/>. Acesso em: 10 jun. 2019.

PETRUZELLA, F. D. *Eletrotécnica I*. Porto Alegre: AMGH, 2013. (Série Tekne).

Encerra aqui o trecho do livro disponibilizado para esta Unidade de Aprendizagem. Na Biblioteca Virtual da Instituição, você encontra a obra na íntegra.

Conteúdo:



SOLUÇÕES  
EDUCACIONAIS  
INTEGRADAS