



**CPET**

---

Centro de Profissionalização e Educação Técnica

**E-BOOK**

**ELETRICIDADE III**

# Corrente e tensão eficazes – potência média



## APRESENTAÇÃO

Para entender o comportamento dos circuitos de corrente alternada, é necessário entender suas formas de onda e seu comportamento em relação à sua variação no tempo. Para isso, é preciso conhecer e compreender seus valores de corrente, tensão e potência, assim como as suas cargas. A corrente alternada é a forma mais eficaz de transmissão de energia elétrica por longas distâncias, sendo utilizada desde a transmissão de energia elétrica das companhias de energia até as residências, indústrias e comércio.

A corrente contínua não varia ao longo do tempo, enquanto a corrente alternada varia, e a forma de onda mais utilizada para a sua representação é a senoidal.

Nesta Unidade de Aprendizagem, você verá quais são as principais diferenças entre os circuitos de corrente contínua (CC ou em inglês DC - *Direct Current*) e os de corrente alternada (CA ou em inglês AC - *Alternating Current*). Você também irá estudar e calcular o valor eficaz para corrente, tensão e potência média e suas aplicações nos circuitos elétricos.

Bons estudos.

**Ao final desta Unidade de Aprendizagem, você deve apresentar os seguintes aprendizados:**

- Reconhecer o conceito de valor eficaz.
- Aplicar o conceito de valor eficaz em corrente e tensão.
- Analisar a potência média.



## DESAFIO

Desde situações cotidianas, como saber se uma tomada é 127V ou 220V, saber se uma pilha ainda pode ser utilizada ou precisa ser trocada, até o entendimento de circuitos elétricos mais complexos na indústria, é necessário medir os valores de tensão ou corrente.

Imagine que você está em uma indústria investigando o porquê de uma máquina não estar

funcionando corretamente. Você tem o circuito dessa máquina no seu manual, com o diagrama elétrico contendo todos os valores dos componentes (resistores, capacitores, indutores, etc.) e seus valores de tensão. Desse modo, você vai poder medir esses valores para comparar os reais e os do manual.

- Como você pode medir esses valores para investigar o circuito e saber se há alguma diferença no seu funcionamento?
- Qual ou quais equipamentos de medição podem ser utilizados? Quais os cuidados necessários para essa medição?



## INFOGRÁFICO

Tensão e corrente alternadas estão presentes no dia a dia das pessoas, como nos equipamentos elétricos domésticos que são ligados em tomadas 127V ou 220V.

No Infográfico a seguir, você verá que a grande maioria das aplicações (residenciais, comerciais ou industriais) que dependem de eletricidade é alimentada por corrente e tensão alternadas (CA) e irá analisar a forma de onda dessa alimentação.

# DIFERENTES VALORES DE TENSÃO EM CIRCUITOS ALTERNADOS

Nas instalações elétricas residenciais, comerciais ou industriais, encontramos eletricidade alimentada por corrente alternada.

Analisando a forma de onda dessa alimentação alternada, vemos que há vários valores instantâneos de tensão ou corrente ao longo do tempo, como, por exemplo, valores máximos (picos), médios ou eficazes.



## VALOR DE TENSÃO ALTERNADA NAS TOMADAS DE RESIDÊNCIAS

Nas residências e comércios brasileiros, temos as tensões de 127V ou 220V. Esses são os valores eficazes de tensão da rede elétrica.

Há muita confusão quanto ao valor de tensão nas tomadas das residências, se é de 110V, 127V ou 220V.

No Brasil, a tensão de 110V era utilizada no passado. Atualmente, o valor padronizado é de 127V.



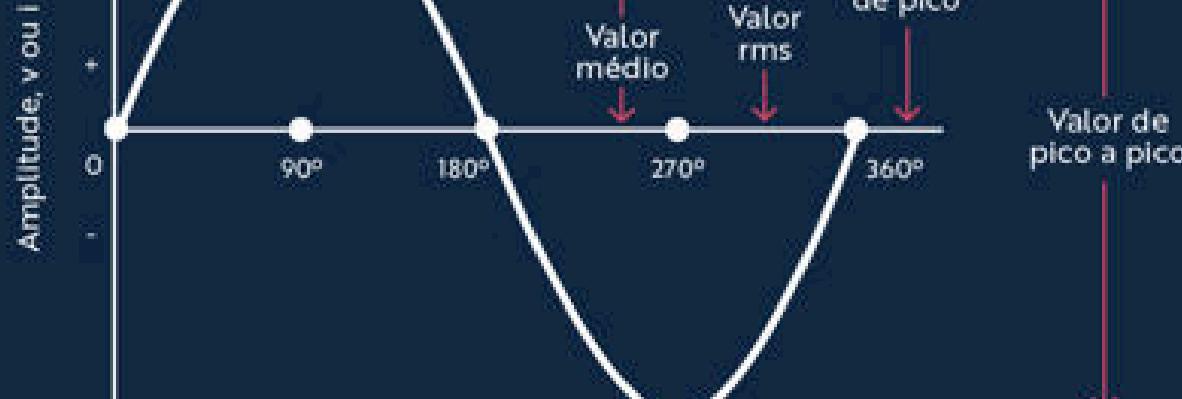
## SIGNIFICADO DOS VALORES DE TENSÃO OU CORRENTE ALTERNADAS

Valor de pico	Valor de pico a pico	Valor médio	Valor eficaz
valor máximo, tanto negativo quanto positivo	dobro do valor de pico em formas de ondas simétricas	média aritmética de todos os valores da forma de onda senoidal	valor equivalente ao de corrente ou tensão contínua em quantidade capaz de transferir potência a uma carga, também chamado de <i>root mean square</i> (rms) ou valor quadrático médio

## FORMA DE ONDA DE TENSÃO OU CORRENTE ALTERNADAS

média = 0,637 do valor de pico

rms = 0,707 do valor de pico





## CONTEÚDO DO LIVRO

Os circuitos que funcionam em valores de tensão e corrente alternadas são chamados de circuitos de corrente alternada (CA). Para esses circuitos, corrente e tensão variam ao longo do tempo, diferentemente de circuitos de corrente contínua (CC), que são constantes no tempo.

Os valores em função do tempo são chamados de valores instantâneos, mas nem todos esses valores são absorvidos nos circuitos CA. O valor absorvido é chamado de tensão ou corrente eficaz, e a potência relacionada é chamada de potência média.

No capítulo Corrente e tensão eficazes e potência média, da obra *Circuitos elétricos*, você verá mais sobre os conceitos e aplicações de valores eficazes em circuitos de corrente alternada, potência média e outros parâmetros relacionados.

# CIRCUITOS ELÉTRICOS

The background of the book cover features a photograph of four students in a classroom setting. A female student with curly hair is leaning over a desk, focused on a tablet screen. Another student is visible in the background, and two more are partially visible on the right side, all appearing to be engaged in a collaborative task. The lighting is warm and focused on the students.

Lilian Matsubara



# Corrente e tensão eficazes e potência média

## Objetivos de aprendizagem

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

- Reconhecer o conceito de valor eficaz.
- Aplicar o conceito de valor eficaz em corrente e tensão.
- Analisar a potência média.

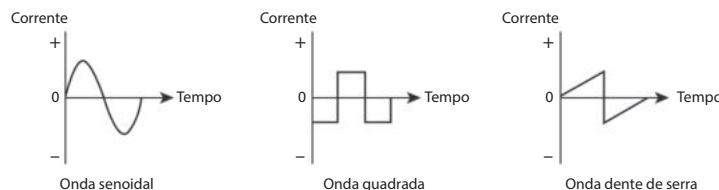
## Introdução

Os circuitos podem ser de corrente (ou tensão) alternada ou contínua. As grandezas contínuas não variam ao longo do tempo, diferentemente das grandezas alternadas, cuja amplitude oscila em relação ao tempo. Neste capítulo, vamos abordar as grandezas alternadas, para as quais aplicaremos o cálculo de valor eficaz.

Para obter o valor eficaz para corrente, tensão e potência, é importante entender o comportamento das formas de onda alternadas em função do tempo e seus parâmetros, como valores de amplitude (pico, pico a pico), ciclos, períodos, frequências, etc. Assim, neste capítulo você vai estudar o conceito de valor eficaz e sua aplicação em corrente e tensão. Por fim, você vai analisar a potência média de circuitos alternados.

## Conceito de valor eficaz

Para estudar sobre valor eficaz, é preciso analisar as formas de onda alternadas, tais como senoides, ondas quadradas e ondas triangulares (dente de serra), conforme ilustradas na Figura 1.



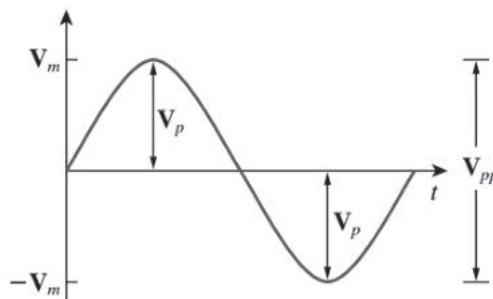
**Figura 1.** Formas de ondas de correntes alternadas.

**Fonte:** Petruzella (2014, p. 135).

A média de todos os valores da forma de onda ao longo do tempo durante um ciclo é conhecida como **valor médio**. Esse valor expressa matematicamente a capacidade de uma forma de onda de gerar energia. No entanto, as formas de onda alternadas, como vimos na Figura 1, apresentam exatamente a mesma forma do lado positivo (semiciclo positivo) e do lado negativo (semiciclo negativo), o que faz com que seu valor médio verdadeiro seja igual a zero. Para evitar que o valor médio seja sempre igual a zero, você deve calculá-lo considerando os valores absolutos (sem sinal) ao longo do tempo em um ciclo. O valor médio também é conhecido pelo termo em inglês *average value* (AVG).

Na eletrônica, as formas de onda alternadas mais comuns são as **ondas senoidais**. Nesse caso, o valor médio pode ser calculado pela média aritmética de todos os valores em uma onda senoidal para um meio ciclo, já que, como vimos, para um ciclo completo o valor médio seria zero.

Aqui, é importante salientar outro conceito, o de **valor de pico**. Como vimos, uma onda senoidal completa apresenta duas alternâncias: uma positiva e outra negativa. O valor de pico, ou alternância de pico, é o **valor máximo de tensão** ( $V_m$ ) de uma alternância, avaliado desde zero até a máxima ou mínima amplitude (Figura 2). Para o **valor máximo de corrente**, utiliza-se  $I_m$ .



**Figura 2.** Tensão senoidal: valor máximo ( $V_m$ ), valor de pico ( $V_p$ ) e valor de pico a pico ( $V_{pp}$ ).

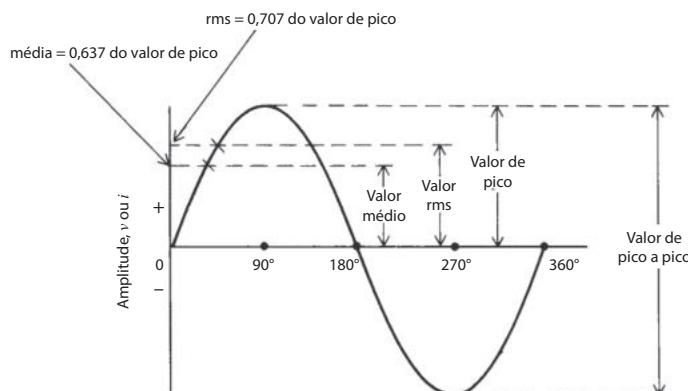
Fonte: Sadiku, Musa e Alexander (2014, p. 289).

Podemos calcular o valor médio para tensão ou corrente de uma função em relação ao tempo  $f(t)$ , com período  $T$ , por meio da seguinte equação:

$$\text{Valor médio} = \frac{1}{T} \cdot [\text{área sob a curva } f(t) \text{ considerando um período}]$$

Aplicando-se essa fórmula para uma forma de onda senoidal completa, conforme mostra a Figura 3, obtemos, na prática:

$$\text{Valor médio (senoide)} = 0,637 \cdot \text{Valor de pico}$$



**Figura 3.** Valores de amplitude para uma onda senoidal CA.

Fonte: Gussow (2009, p. 271).

Infelizmente, o valor médio não corresponde efetivamente à capacidade do sinal em transformar energia, ou seja, não corresponde à sua potência. Para isso, você deve calcular o valor eficaz.

O **valor eficaz** da forma de onda alternada é o valor equivalente a uma grandeza contínua (CC) que causa a mesma dissipação de potência média a um resistor. Ou seja, usar o valor eficaz é a melhor forma de se comparar valores de corrente alternada (CA) a valores de corrente contínua (CC), ou valores CA entre formas de onda diferentes, quando você estiver estudando potência elétrica.

Matematicamente, existe um algoritmo para se calcular o valor eficaz, para qualquer tipo de onda alternada, que é dado por:

$$V_{\text{eficaz}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v^2(t_i)} = \sqrt{\frac{v^2(t_1) + v^2(t_2) + \dots + v^2(t_n)}{n}}$$

Como exemplo, podemos aplicar esse algoritmo à Figura 3, ou seja, tabelar a tensão em vários pontos (valores instantâneos), calcular o quadrado de cada um dos valores, somar todos eles e dividir pelo número de pontos tabelados. Depois, calculamos a raiz quadrada desse valor e, por fim, obtemos o valor eficaz. Quanto mais pontos forem usados nesse cálculo, mais preciso será esse valor (PETRUZELLA, 2014). Devido a esse cálculo, o valor eficaz também é conhecido como **rms** (*root mean square*), termo em inglês para “raiz da média do valor quadrado” ou valor quadrático médio (*quadratic mean*) (GUSSOW, 2009). Na prática, para o caso de ondas senoidais, conforme vimos na Figura 3, esse valor é dado por:

$$\text{Valor eficaz} = \frac{\text{Valor de pico}}{\sqrt{2}} = 0,707 \cdot \text{Valor de pico}$$



### Fique atento

Quando forem usados os termos “circuito de corrente alternada (CA)” ou “circuito de corrente contínua (CC)”, o termo “corrente” significa tanto tensão quanto corrente, já que a corrente contínua resulta de uma tensão contínua, assim como a corrente alternada resulta de uma tensão alternada.

## Conceito de valor eficaz em corrente e tensão

Para saber o valor de uma grandeza contínua, basta medir seu valor uma única vez, como é o caso de uma pilha. Já para uma grandeza variável no tempo, como geradores de tensão alternada e tomadas residenciais, você deve medir o valor sempre que precisar dessa informação e anotar o valor e o instante em que ele foi medido.

Neste tópico, vamos analisar a forma de onda senoidal alternada, que é a forma de onda de tensão fornecida nas fontes geradoras e que alimenta as indústrias e residências. No Brasil, a tensão da rede elétrica é alternada e com formato senoidal, com um período de repetição de 60 vezes por segundo, ou 60 Hz.

Matematicamente, uma tensão senoidal alternada varia com o tempo de acordo com uma função senoidal:

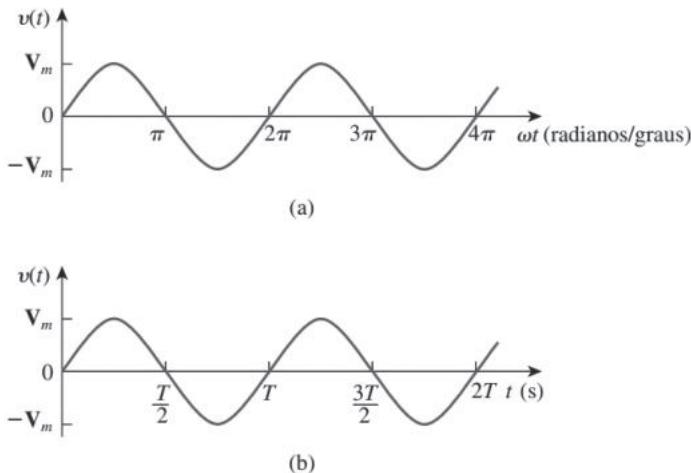
$$v(t) = V_m \cdot \sin(\omega t + \varphi)$$

Onde:

- $v(t)$  = valor da tensão em função do tempo, em volts [V]
- $V_m$  = valor máximo, em volts [V]
- $\omega$  = velocidade angular, em radianos por segundo [rad/s]
- $\varphi$  = ângulo de fase inicial, em radianos [rad] ou em graus [ $^{\circ}$ ]

Nota:  $360^{\circ} = 2\pi$  radianos

Normalmente conhecemos  $V_m$  e  $\omega$ , bastando desenhar  $V$  em função do tempo ( $t$ ), como mostra a Figura 4a.



**Figura 4.** Esboço de  $V_m \sin(\omega t)$ : (a) em função de  $\omega t$ ; (b) em função de  $t$ .

Fonte: Sadiku, Musa e Alexander (2014, p. 290).

A partir do gráfico da Figura 4b, podemos fazer os seguintes apontamentos:

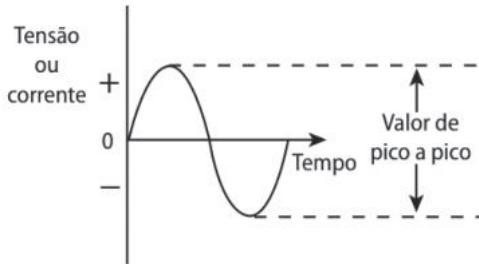
- $T$ : período, tempo necessário para a realização de um ciclo, em segundos [s].
- Ciclo: parte de uma forma de onda contida em um intervalo de tempo igual a um período.

Ou seja:  $T = \frac{2\pi}{\omega}$

- Frequência: número de ciclos por segundo. A frequência e o período são inversos um do outro:  $f = \frac{1}{T}$ . Substituindo-se esses valores em  $T = \frac{2\pi}{\omega}$ , temos:  $\omega = 2\pi f$ .
- Valor máximo  $V_m$ : é medido a partir do nível zero e também chamado de valor de pico ( $V_p$ ), visto anteriormente na Figura 2. Para correntes, como vimos, emprega-se  $I_m$  (SADIKU; MUSA; ALEXANDER, 2014).
- Valor pico a pico ( $V_{pp}$ ): é a diferença entre os valores dos picos positivo e negativo, isto é, a soma dos módulos das amplitudes positiva e negativa,

conforme mostra a Figura 5. Ou seja, o  $V_{pp}$  ou  $I_{pp}$  é igual ao dobro do valor máximo, quando os máximos positivo e negativo são simétricos (como é o caso de uma onda senoidal). Assim:

$$V_{pp} = 2 \cdot V_m \text{ ou } I_{pp} = 2 \cdot I_m$$



**Figura 5.** Valor de pico a pico de uma onda senoidal.

Fonte: Petruzella (2014, p. 147).

Como vimos no cálculo de valor eficaz no início deste capítulo, a mesma fórmula se aplica para tensão ( $V$ ) e corrente ( $I$ ), respectivamente:

$$V_{eficaz} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}$$

Como  $1/\sqrt{2} = 0,707$ , temos que:

$$V_{eficaz} = 0,707 \cdot V_m$$

$$I_{eficaz} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0,707 \cdot I_m$$

O mesmo se aplica ao cálculo de valor médio:

$$V_{médio} = 0,637 \cdot V_m$$

$$I_{médio} = 0,637 \cdot I_m$$

A menos que seja feita alguma ressalva, os valores de tensão e corrente alternadas são geralmente representados em valores eficazes. Por exemplo, entende-se que uma tensão de linha de alimentação de 220 V seja 220 V eficaz.



### Fique atento

O valor eficaz é a melhor forma de se comparar valores CA a valores CC, ou valores CA entre formas de onda diferentes, quando estamos falando de potência elétrica. Por exemplo, quando estamos dimensionando um fio, é melhor considerarmos o valor eficaz da corrente elétrica, pois estamos preocupados em não aquecer o fio demasiadamente.

No entanto, existem alguns casos em que os valores de pico, ou de pico a pico, são mais importantes. Por exemplo, quando desejamos determinar a espessura de um dielétrico para que não ocorra uma faísca (ou fuga), o melhor é utilizarmos o valor de pico ou pico a pico, em vez do valor eficaz.

## Potência média

Focando agora nas tensões — porém, o mesmo vale para as correntes —, você pode notar que  $V_p$  e  $V_{pp}$  não dizem tudo sobre uma forma de onda. Lembre-se de que, em geral, a eletricidade é utilizada para fornecer energia como aquecimento ou como “bateria” para alimentar artefatos que nos são úteis. Desse modo, a grandeza mais perceptível em um circuito alternado é a **potência**, e não a corrente ou a tensão. Assim, ao analisar uma forma de onda, você deve considerar mais os aspectos ligados à potência, ou seja, à “capacidade de gerar energia”.

Ao calcular grandezas contínuas, a potência é facilmente encontrada a partir do produto entre tensão e corrente contínuas, isto é,  $P = V \cdot I$ . E para correntes e tensões alternadas? Quando utilizamos essa fórmula de potência com os valores eficazes de tensão e corrente em circuitos CA, obtemos a **potência aparente (S)**, analogamente aos circuitos resistivos em CC:

$$S = V_{\text{eficaz}} \cdot I_{\text{eficaz}}$$

A potência aparente é medida em volt-ampères (VA).

Quando a potência aparente (S) é multiplicada por um fator, obtemos a **potência média (P)**, a qual é medida em watts (W). Esse fator é chamado de

**fator de potência (FP)**, dado por  $\cos(\varphi)$ , podendo variar de qualquer valor entre zero ( $\cos 90^\circ$ ) e 1 ( $\cos 0^\circ$ ). Assim,

$$\cos \varphi = \frac{P_{média}}{V_{eficaz} \cdot I_{eficaz}} = \frac{\text{Potência média em watts [W]}}{\text{Potência aparente (S) [VA]}}$$

Substituindo-se  $S = V_{eficaz} \cdot I_{eficaz}$  [VA] em  $\cos \varphi$ , obtemos:

$$P_{média} = S \cdot \cos(\varphi)$$



### Fique atento

Como vimos, o  $\cos \varphi$  da fórmula da potência média é chamado de fator de potência (FP). O FP de uma carga é igual ao cosseno do ângulo de defasagem ( $\varphi$ ) entre a tensão e a corrente associadas a essa carga. Assim,  $FP = \cos \varphi$ , sendo uma grandeza adimensional com valor  $0 \leq FP \leq 1$ .

A potência no resistor é chamada potência útil ou ativa (P), e a potência no capacitor ou indutor é chamada de potência reativa (Q) capacitiva ou indutiva. A resultante das potências reativas é chamada de potência aparente (S). Você pode interpretar o FP como sendo um rendimento, isto é, o percentual de potência aparente S que é transformado em potência ativa P. Então, quanto menor for o FP, maior será a quantidade de energia reativa Q que fica circulando entre a carga e a fonte sem produzir trabalho útil. Por esse motivo, a legislação estabelece que uma instalação com FP inferior ao de referência deve ser sobretaxada.

Cargas com características indutivas têm FP em atraso (porque a corrente está atrasada em relação à tensão) e compreendem a maior parte dos equipamentos usados em instalações, como motores assíncronos, reatores de lâmpadas de descarga e aparelhos de solda elétrica. Já as cargas capacitivas, como motores síncronos sobre-excitados e bancos de capacitores, têm FP em avanço, porém não são encontradas com a mesma frequência que as indutivas. Por fim, as cargas puramente resistivas, como aquecedores resistivos, lâmpadas incandescentes e chuveiros elétricos, têm FP unitário.

Alguns fatores que causam baixo fator de potência em instalações elétricas são:

- motores de indução operando a vazio (sem carga acoplada ao eixo);
- motores com potência nominal muito superior à necessária para o acionamento da carga;
- transformadores operando a vazio ou com pouca carga;
- fornos a arco ou de indução magnética;
- máquinas de solda elétrica;

- reatores de lâmpadas de descarga (fluorescentes, vapor de sódio, etc.) com baixo FP;
- níveis de tensão superiores à nominal, provocando um aumento da potência reativa. Entre as consequências de baixos valores de FP das instalações, podemos citar:
- acréscimo nas contas de energia elétrica;
- correntes mais elevadas, já que, para uma potência nominal e tensão de alimentação fixadas, a corrente é inversamente proporcional ao FP;
- necessidade de condutores com bitolas maiores;
- aumento das perdas elétricas nos condutores por efeito Joule;
- necessidade de dispositivos de manobra e proteção com maior capacidade;
- quedas e flutuação de tensão nos circuitos de distribuição;
- superdimensionamento ou limitação da capacidade de transformadores de alimentação;
- maiores riscos de acidentes.

O FP depende das características e da forma de utilização de uma carga. Trata-se de um dado fornecido pelo fabricante do equipamento e não pode ser alterado diretamente pelo usuário. No entanto, considerando que a maioria das cargas encontradas é de natureza indutiva, podem ser utilizados bancos de capacitores para corrigir o FP de uma carga individual ou de toda uma instalação. Esses bancos, especificados em kVAr, são conectados em paralelo com as cargas e praticamente não promovem o aumento da potência ativa da instalação.

O FP também é definido como sendo o cosseno da diferença de fase entre tensão e corrente:

$$\cos \varphi = \cos (\theta_v - \theta_i)$$

Onde  $\theta_v$  é o ângulo de tensão e  $\theta_i$  é o ângulo da corrente.

Desse modo, pode-se dizer que o FP está **atrasado** ou **adiantado** para identificar o sinal do ângulo de fase entre as ondas de corrente e tensão, conforme mostra o Quadro 1.

**Quadro 1.** Fator de Potência x cargas

Carga	FP	Corrente em relação à tensão	Potência Reativa
Resistiva	Unitário (=1)	Em fase	$Q = 0$
Capacitiva	Adiantado	Adiantada	$-Q (Q < 0)$
Indutiva	Atrasado	Atrasada	$+Q (Q > 0)$

A potência aparente ( $S$ ) é a resultante das potências média ( $P$ ) e reativa ( $Q$ ) e é também representada em números complexos (potência complexa) por:

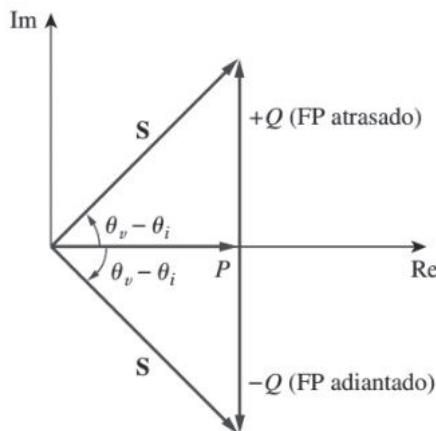
$$S = P + jQ$$

Onde  $P$  é a parte real e  $Q$  é a parte imaginária.

A potência média depende da resistância  $R$ , e a potência reativa depende da reatância ( $X$ ) da carga. A reatância pode ser indutiva ( $X_L$ ) ou capacitiva ( $X_C$ ). A **potência reativa ( $Q$ )** é medida em volt-ampères reativos (VAr) e é calculada por meio da fórmula a seguir:

$$Q = S \cdot \operatorname{sen} \varphi$$

Essas três potências ( $S$ ,  $P$  e  $Q$ ) são representadas pelo **triângulo das potências**, onde o eixo  $x$  do gráfico é o eixo dos números reais (Re), e o eixo  $y$  é o eixo dos números imaginários (Im), conforme mostra a Figura 6.



**Figura 6.** Triângulo das potências.

Fonte: Alexander e Sadiku (2013, p. 421).

Para os circuitos CA, a carga equivalente é chamada de **impedância ( $Z$ )**, medida em Ohms ( $\Omega$ ), podendo ser resistiva, indutiva ou capacitiva. A impedância é calculada por:

$$Z = \frac{V_{\text{eficaz}}}{I_{\text{eficaz}}} [\Omega]$$

Sendo assim, a potência aparente também pode ser obtida como:

$$S = I_{\text{eficaz}}^2 \cdot Z = \frac{V_{\text{eficaz}}^2}{Z}$$

$$P = V_{\text{eficaz}} \cdot I_{\text{eficaz}} \cdot \cos(\theta_v - \theta_i)$$

$$Q = V_{\text{eficaz}} \cdot I_{\text{eficaz}} \cdot \sin(\theta_v - \theta_i)$$

A potência média é também conhecida como **potência ativa** ou **potência útil**, já que é a potência dos circuitos puramente resistivos, em que a tensão e a corrente estão em fase ( $\theta_v - \theta_i = 0^\circ$ ); ou seja, toda a energia fornecida pela fonte é consumida pela carga. Nesse caso, esse circuito CA pode ser analisado como se fosse um circuito CC:

$$P_{\text{média}} = V_{\text{eficaz}} \cdot I_{\text{eficaz}} \cdot \cos \varphi = V_{\text{eficaz}} \cdot I_{\text{eficaz}} \cdot \cos 0^\circ = V_{\text{eficaz}} \cdot I_{\text{eficaz}}$$

$$P_{\text{média}} = V_{\text{eficaz}} \cdot I_{\text{eficaz}} [\text{W}] \text{ ou } P_{\text{média}} = \frac{V_{\text{eficaz}}^2}{R} [\text{W}]$$

Uma carga resistiva (R) sempre absorve potência, enquanto uma carga reativa (em um indutor ou capacitor) não absorve nenhuma potência média, ou seja, FP é igual a zero ( $\varphi = 90^\circ$ ). Nesse caso, o fluxo de energia é inteiramente reativo, e a energia armazenada é devolvida totalmente à fonte em cada ciclo.



### Exemplo

1. A frequência das faixas de áudio varia de 20 Hz a 20 kHz. Calcule a faixa do período dessas audiofrequências.

**Solução:** utiliza-se a fórmula  $T' = \frac{1}{f}$

$$\text{Para } 20 \text{ Hz: } T = \frac{1}{20} = 0,05 \text{ s ou } 50 \text{ ms}$$

$$\text{Para } 20 \text{ kHz: } T = \frac{1}{20} \text{ k} = 0,05 \text{ ms}$$

2. Para um valor de tensão de pico para uma onda de CA igual a 60 V, quais são o valor médio e o valor eficaz correspondentes?

**Solução:**

$$V_{máximo} = 0,637 \cdot V_m = 0,637 \cdot 60 = 38,2 \text{ V}$$

$$V_{eficaz} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} = 0,707 \cdot V_m = 0,707 \cdot 60 = 42,4 \text{ V}$$

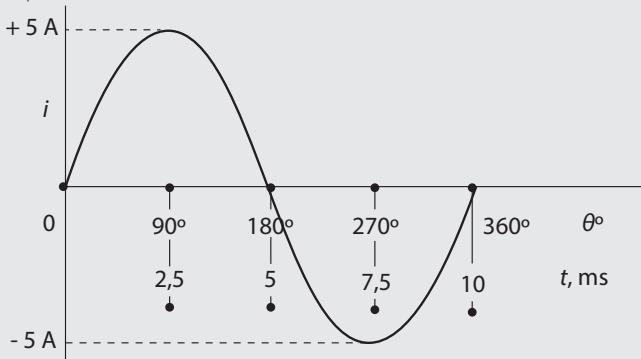
3. Uma corrente CA varia ao longo de um ciclo completo em 1/100 s. Calcule o período e a frequência. Se a corrente tiver um valor máximo de 5 A, mostre a forma de onda para a corrente em graus e em segundos.

**Solução:**

$$T = \frac{1}{100} \text{ s ou } 0,01 \text{ s ou } 10 \text{ ms}$$

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

Considerando-se  $V_m = 5 \text{ A}$  e  $T = 10 \text{ ms}$ , o valor de amplitude da onda será 5 A e o ciclo se repetirá a cada 10 ms, conforme a forma de onda abaixo:



4. Uma tensão CA de 110 V é aplicada a duas resistências (de 5 Ω e de 15 Ω) em série. Calcule a corrente, a queda de tensão e a potência média (P) em cada resistência.

**Solução:**

$$R_T = R_1 + R_2 = 5 + 15 = 20 \Omega$$

$$I_{eficaz} = \frac{V_{eficaz}}{R_T} = \frac{110}{20} = 5,5 \text{ A}$$

$$V_{eficaz}^1 = I_{eficaz} \cdot R_1 = 5,5 \cdot 5 = 27,5 \text{ V}$$

$$V_{eficaz}^2 = I_{eficaz} \cdot R_2 = 5,5 \cdot 15 = 82,5 \text{ V}$$

$$P_1 = V_1 \cdot I = 27,5 \cdot 5,5 = 151,25 \text{ W}$$

$$P_2 = V_2 \cdot I = 82,5 \cdot 5,5 = 453,75 \text{ W}$$

5. Em um circuito CA com fonte de alimentação de 120 V, temos: 12 kVA, FP = 0,86 (atrasado) e uma carga Z. Calcule as potências média e reativa na carga.

**Solução:**

$$FP = \cos \varphi = 0,856, \text{ então } \varphi = \cos^{-1} 0,856 = 31,13^\circ$$

Como VA é a unidade de potência aparente:  $S = 12 \text{ kVA}$

$$\text{Potência Média} = S \cdot \cos \varphi = 12k \cdot 0,856 = 10,272 \text{ kW}$$

$$Q = S \cdot \operatorname{sen} \varphi = 12k \cdot \operatorname{sen}(31,13^\circ) = 12k \cdot 0,517 = 6,204 \text{ kVA}$$

6. A tensão de alimentação em um circuito CA é de 120 V. Aplicando essa tensão a uma carga resistiva de  $20 \Omega$ , calcule os seguintes valores:

- a)  $V_m$  ou  $V_p$
- b)  $V_{pp}$
- c)  $V_{\text{médio}}$
- d)  $I_m$  ou  $I_p$
- e) Potência Média ( $P$ )

$$\text{Solução: } I = \frac{V}{R} = \frac{120}{20} = 6 \text{ A}$$

$$\text{a)} \quad V_{\text{eficaz}} = \sqrt{2} \cdot V_m = 0,707 \cdot V_m \quad V_m = \frac{120}{0,707} \quad V_m = 169,7 \text{ V}$$

$$\text{b)} \quad V_{pp} = 2 \cdot V_m \quad V_{pp} = 2 \cdot 169,7 \quad V_{pp} = 339,4 \text{ V}$$

$$\text{c)} \quad V_{\text{médio}} = 0,637 \cdot V_m \quad V_{\text{médio}} = 0,637 \cdot 169,7 \quad V_{\text{médio}} = 108,3 \text{ V}$$

$$\text{d)} \quad I_{\text{eficaz}} = \sqrt{2} \cdot I_m = 0,707 \cdot I_m \quad I_m = \frac{6}{0,707} \quad I_m = 8,5 \text{ A}$$

$$\text{e)} \quad P = I^2 \cdot R \quad P = 6^2 \cdot 20 \quad P = 720 \text{ W}$$



## Referências

ALEXANDER, C. K.; SADIQU; M. N. O. *Fundamentos de circuitos elétricos*. 5. ed. Dados eletrônicos. Porto Alegre: AMGH, 2013.

GUSSOW, M. *Eletrociadade básica*. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.

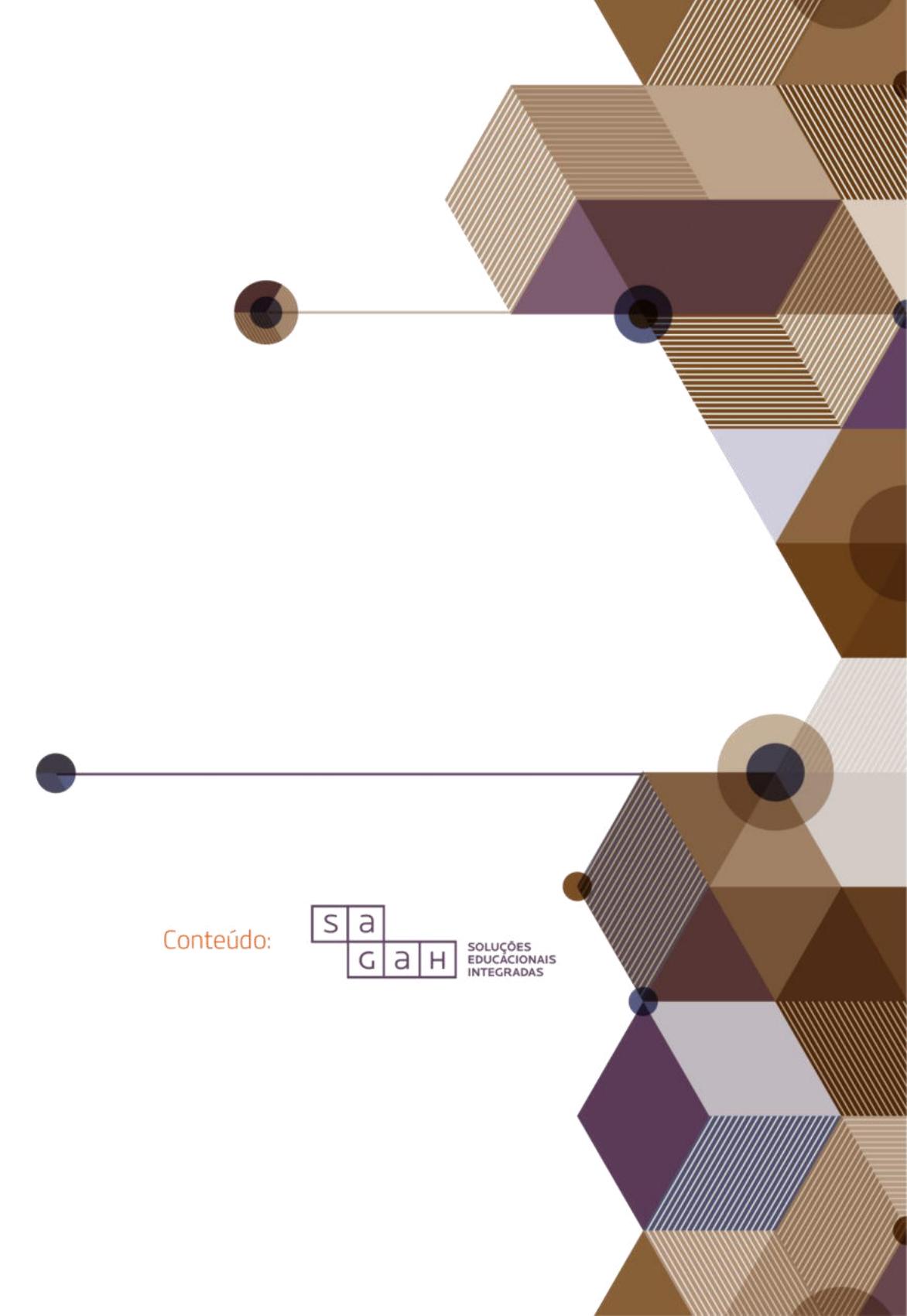
PETRUZELLA, F. D. *Eletrotécnica II*. Porto Alegre: AMGH, 2014.

SADIQU, M. N. O.; MUSA, S. M; ALEXANDER, C. K. *Análise de circuitos elétricos com aplicações*. Porto Alegre: AMGH, 2014.

## Leitura recomendada

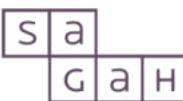
MALVINO, A.; BATES, D. J. *Eletônica*. 8. ed. Porto Alegre: AMGH, 2016.

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



A large, abstract graphic on the right side of the page features a pattern of overlapping hexagons in various shades of brown, tan, purple, and blue. Small, solid-colored circles (brown, blue, and dark blue) are positioned at the intersections of the hexagon edges, some with lines extending towards the left side of the frame.

Conteúdo:



SOLUÇÕES  
EDUCACIONAIS  
INTEGRADAS



## DICA DO PROFESSOR

A ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) determina que o fator de potência de alguns grupos de consumidores tenha como limite mínimo permitido o valor de 0,92.

Para a indústria, esse limite de fator de potência é bastante preocupante, pois, quando o limite permitido é excedido, são aplicadas cobranças (multas) estabelecidas pela ANEEL, afetando economicamente esse consumidor.

Nesta Dica do Professor, você verá um pouco mais sobre o fator de potência na indústria, o que significa esse valor de 0,92 e o que é possível fazer quando não se consegue atingir esse valor.

Conteúdo interativo disponível na plataforma de ensino!



## EXERCÍCIOS

1) Qual é o valor eficaz ou rms de uma onda de corrente CA senoidal com valor de pico de 8A?

A)  $I = 5,656A$ .

B)  $I = 5,096A$ .

C)  $I = 16A$ .

D)  $I = 4A$ .

E)  $I = 8A$ .

2) Para uma tensão de alimentação residencial de 127V, qual a tensão de pico a pico

(circuito CA)?

A)  $V = 127V.$

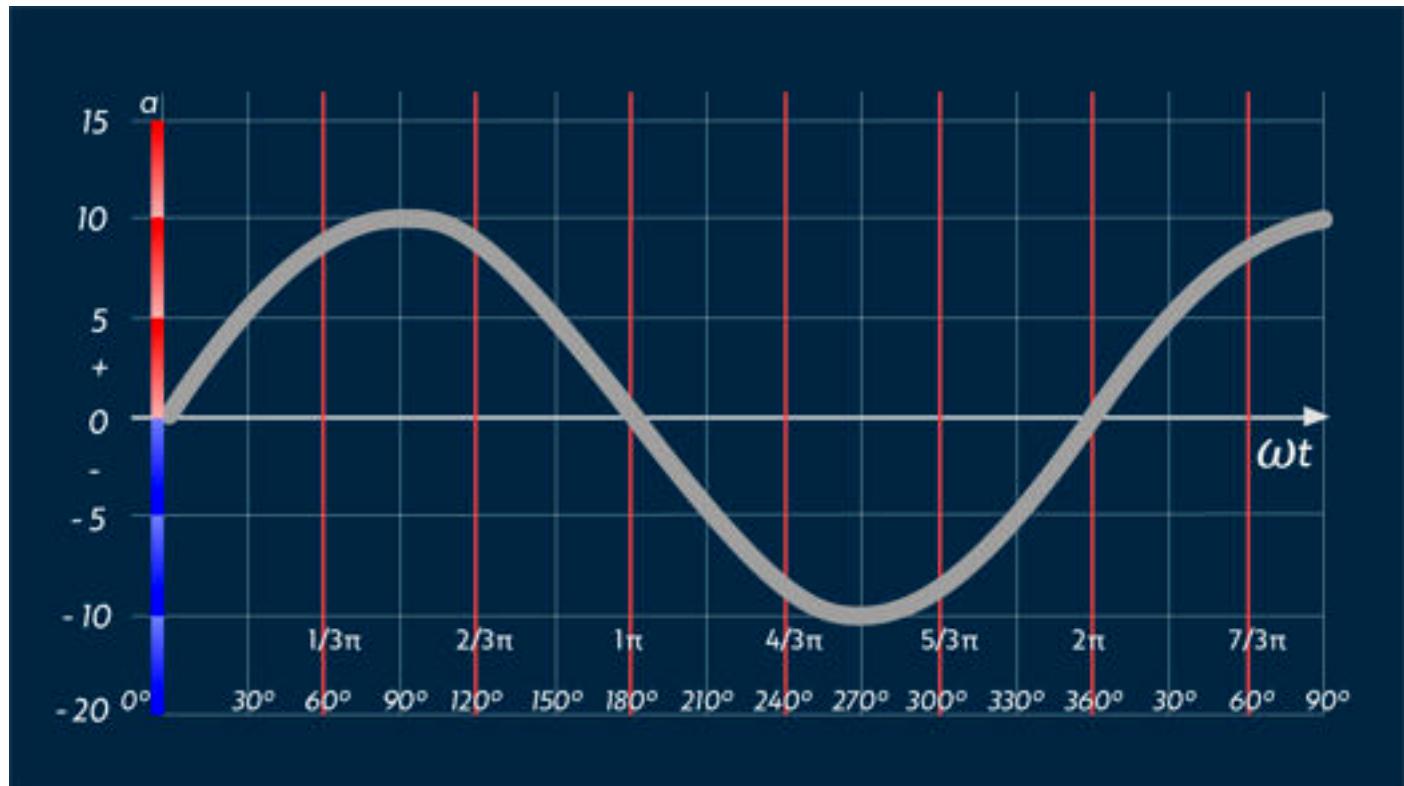
B)  $V = 360V.$

C)  $V = 110V.$

D)  $V = 220V.$

E)  $V = 170V.$

3) Na figura abaixo, qual o valor eficaz de tensão?



A)  $V = 10V.$

- B)  $V = 7,07V$ .
- C)  $V = 20V$ .
- D)  $V = 5V$ .
- E)  $V = 6,37V$ .
- 4) Para uma tensão de alimentação de circuito CA de 220V em uma carga resistiva de  $20\Omega$ , qual o valor de corrente eficaz e potência média, respectivamente?
- A)  $I = 10A; P = 110W$ .
- B)  $I = 11A; P = 1210VAr$ .
- C)  $I = 10A; P = 10W$ .
- D)  $I = 1A; P = 110W$ .
- E)  $I = 11A; P = 2420W$ .
- 5) Um resistor de  $25\Omega$  tem uma potência média de 400W. Que valor máximo de corrente esse circuito suportaria, sendo um circuito CA senoidal?
- A)  $I = 5,66A$ .
- B)  $I = 4A$ .
- C)  $I = 6,28A$ .

D)  $I = 6A$ .

E)  $I = 10A$ .



## NA PRÁTICA

Conhecer os circuitos elétricos e fazer a sua manutenção correta, além de segurança, garante também economia, evitando desperdícios. Esta era uma das preocupações da Superintendência da Zona Franca de Manaus (SUFRAMA): minimizar custos e desperdícios de energia elétrica, bem como promover boa gestão de recursos e eficiência no gasto público, considerando atributos de práticas de sustentabilidade e de racionalização de uso nos serviços aplicados.

A seguir, você verá como se deu o processo e quais foram os resultados alcançados com os esforços para garantir a eficiência energética nas instalações da SUFRAMA.

# EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NAS INSTALAÇÕES ELÉTRICAS DA SUFRAMA

A Superintendência da Zona Franca de Manaus – SUFRAMA estava preocupada em minimizar custos e desperdícios de energia elétrica, promovendo uma boa gestão de recursos e eficiência no gasto público, considerando práticas de sustentabilidade e racionalização de uso nos serviços aplicados.

Diante disso, dois aspectos principais foram analisados: **fator de potência** e **potência reativa**.



## FATOR DE POTÊNCIA

Entre 2008 e 2012, a SUFRAMA tinha em suas faturas multas provocadas pelo **baixo fator de potência** e pela má contratação da demanda, gerando desperdícios no consumo de energia e custo elevadíssimo.

Para a **correção do fator de potência**, foram utilizados **bancos de capacitores**. A instalação representa uma fonte geradora de energia reativa localizada, suprindo parte da demanda de potência reativa requerida pelos equipamentos que têm bobinas, tais como motores de indução, reatores e transformadores, entre outros. No Brasil, a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL estabelece que o fator de potência para as unidades consumidoras dos grupos A e B deve ser superior a 0,92 capacitivo.

## POTÊNCIA REATIVA

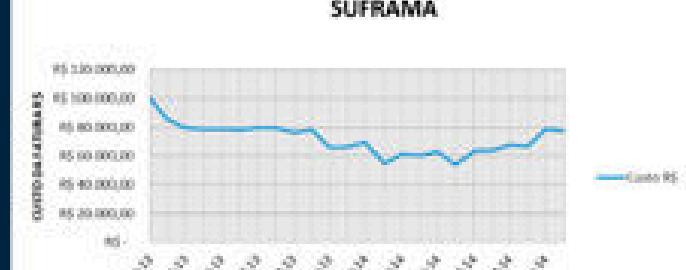
A fim de reduzir a potência reativa, foi necessário substituir motores elétricos e compressores de baixo rendimento do **chiller**, e trocar lâmpadas de descargas (vapor de mercúrio, sódio) por lâmpadas mistas, bem como lâmpadas fluorescentes com reatores por lâmpadas de led.

No período de janeiro de 2013 a março de 2014, a potência reativa estava muito alta, ocasionando um fator de potência muito baixo. Com a implantação do banco de capacitores, a potência reativa diminuiu, ocasionando um bom fator de potência.



Valores altos de fator de potência (próximos de 1,0 ou 100%) indicam uso eficiente da energia elétrica, enquanto valores baixos evidenciam mau aproveitamento, além de representarem sobrecarga em todo o sistema elétrico, tanto do consumidor como da concessionária.

O gráfico apresenta o consumo médio mensal entre 2013 e 2014. Observe que há redução de 20% do custo da energia elétrica entre os meses de setembro de 2013 e setembro de 2014. Essa economia se deve à implantação do sistema de gerenciamento energético no prédio da Unidade.





## SAIBA MAIS

Para ampliar o seu conhecimento a respeito desse assunto, veja abaixo as sugestões do professor:

### **Novas tecnologias prometem revolucionar o setor elétrico e baixar os custos**

O setor elétrico vem passando por grandes transformações, entre as quais a busca pela energia limpa e a garantia de acesso a ela.

**Conteúdo interativo disponível na plataforma de ensino!**

### **As novas tecnologias relacionadas com a energia solar**

Conheça as iniciativas brasileiras e o que já está funcionando em relação à energia solar.

**Conteúdo interativo disponível na plataforma de ensino!**

### **Energia solar: especialista responde a perguntas**

Em entrevista, Hans Rauschmayer fala sobre os painéis solares e mostra como eles funcionam.

**Conteúdo interativo disponível na plataforma de ensino!**

### **Agência Nacional de Energia Elétrica**

No *website* da ANEEL, você encontra mais informações sobre como são calculadas as tarifas e como são classificados os perfis de consumidores de energia.

**Conteúdo interativo disponível na plataforma de ensino!**



# Transformadores



## APRESENTAÇÃO

Nesta Unidade de Aprendizagem estudaremos as relações de tensão, corrente e potência dos transformadores em eletrotécnica.

Bons estudos.

**Ao final desta Unidade de Aprendizagem, você deve apresentar os seguintes aprendizados:**

- Relacionar as características de operação de transformadores.
- Escrever as relações de espiras, de tensão e corrente de um transformador.
- Diferenciar tipos e aplicações de transformadores elétricos.



## DESAFIO

Explore o conteúdo, pesquise. Use todas as ferramentas disponíveis para solucionar o problema.

Vamos ao experimento!

Você teve que se mudar de cidade. Onde você morava, a tensão local monofásica era 127 Volts, e na sua nova cidade é 220 Volts. A maioria de seus eletrodomésticos têm tensão de 127 Volts.

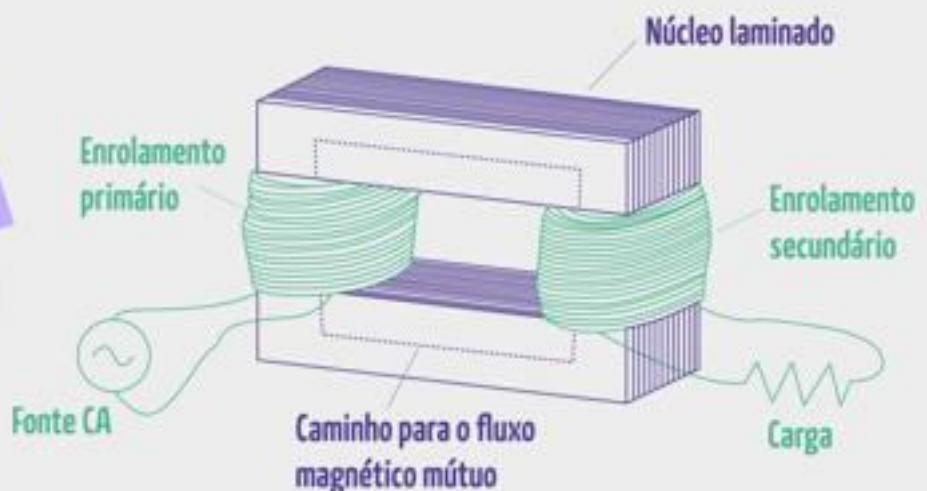
- **Você deve trocar todos os seus eletrodomésticos?**
- **Em termos de ligações elétricas, algo pode ser feito na instalação elétrica para a ligação de seus eletrodomésticos?**
- **Existe algum tipo de equipamento que permita ligar seus aparelhos na nova instalação?**



## INFOGRÁFICO

Veja na ilustração o esquema referente a um transformador básico.

## TRANSFORMADOR BÁSICO



## CONTEÚDO DO LIVRO

Leia o capítulo Transformadores que faz parte da obra *Eletrotécnica* e é a base teórica desta Unidade de Aprendizagem.

Boa leitura.

# ELETROTÉCNICA

Rodrigo Rodrigues



S719e Souza, Diogo Braga da Costa.  
Eletrotécnica [recurso eletrônico] / Diogo Braga da Costa Souza, Rodrigo Rodrigues. – Porto Alegre : SAGAH, 2017.

Editado como livro em 2017.  
ISBN 978-85-9502-055-9

1. Eletrotécnica. 2. Engenharia elétrica. I. Rodrigues, Rodrigo. II. Título.

CDU 621.3

# Transformadores

## Objetivos de aprendizagem

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

- Relacionar as características de operação de transformadores.
- Escrever as relações de espiras, de tensão e de corrente de um transformador.
- Diferenciar os tipos e as aplicações de transformadores elétricos.

## Introdução

Neste capítulo, você vai estudar as relações de tensão, corrente e potência dos transformadores em eletrotécnica. Você vai aprender mais sobre as características de operação dos transformadores, as perdas, as especificações e a importância dos transformadores nas redes de distribuição de energia.

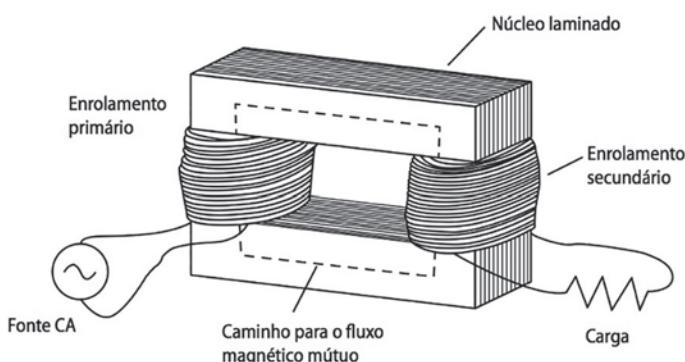
## Operação do transformador

Um transformador é um dispositivo estático (sem partes móveis) utilizado para transferir energia de um circuito CA para outro, o que pode envolver um aumento ou uma diminuição da tensão, permanecendo a mesma frequência em ambos os circuitos. Quando a transformação é realizada com um aumento da tensão, estamos diante de um **transformador elevador**. Quando a tensão é reduzida, estamos diante de um **transformador abaixador**. Essa mudança na tensão CA é feita com perdas muito baixas de potência.

Com os transformadores, é possível gerar energia em um nível de tensão conveniente, e logo elevar essa tensão para níveis bastante elevados, adequados à transmissão a longas distâncias. Em seguida, é possível abaixar novamente essa tensão para realizar a sua distribuição de forma prática e segura.

Um transformador básico (Figura 1) é constituído por duas bobinas enroladas (enrolamentos) em torno de um núcleo de ferro e ligadas entre si por meio do fluxo magnético. A corrente variável associada à energia CA é

necessária para produzir um fluxo magnético variável (no tempo) no núcleo de ferro, de modo que a energia elétrica de um enrolamento é induzida no outro. O enrolamento primário é o que recebe a energia da alimentação, e o secundário é o que fornece energia para a carga. Ao aplicar uma tensão CA sobre o enrolamento primário, o fluxo de corrente resultante estabelece um campo magnético que varia constantemente. À medida que esse campo aumenta e diminui (seguindo as variações da corrente CA), ele induz uma tensão CA no enrolamento secundário, com a mesma frequência da tensão CA aplicada no primário.



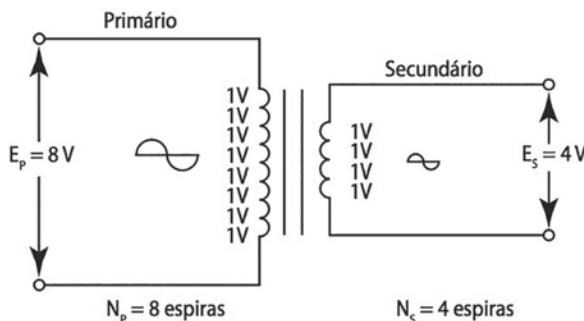
**Figura 1.** Transformador básico.

Fonte: Petruzella (2013, p. 364).

Segundo Petruzella (2013), o princípio de operação de um transformador tem como base a indução mútua. Ela ocorre quando o campo magnético, associado a um condutor, enlaça um segundo condutor e induz nele uma tensão. Ao agrupar os condutores na forma de bobinas e enrolá-los em um núcleo magnético comum, esse efeito é intensificado. Quando o enrolamento primário de um transformador está conectado a uma tensão alternada, haverá uma corrente no enrolamento primário chamada **corrente de excitação**, que estabelece um fluxo magnético alternado que enlaça as espiras e induz uma tensão em ambos os enrolamentos. A tensão autoinduzida no enrolamento primário é uma força contraeletromotriz, oposta em polaridade e quase igual em módulo à tensão aplicada, o que limita a corrente de excitação a um valor

relativamente baixo. A corrente de excitação primária está atrasada da tensão aplicada de aproximadamente  $90^\circ$ , porque o enrolamento é essencialmente indutivo e tem um baixo valor de resistência.

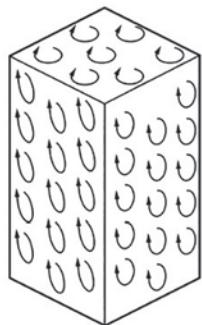
A indutância mútua resulta na tensão induzida no enrolamento secundário. Como um transformador de potência típico tem um fluxo enlaçado de praticamente 100% (ou seja, quase todo o fluxo é confinado ao núcleo magnético; poucas linhas de fluxo são dispersas para o meio no entorno do núcleo), basicamente a mesma tensão é induzida em cada espira do enrolamento secundário. Assim, a tensão induzida total será diretamente proporcional ao número de espiras dos enrolamentos primário e secundário (Figura 2).



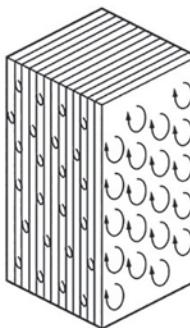
**Figura 2.** Tensões induzidas no transformador.

Fonte: Petruzella (2013, p. 365).

Os enrolamentos dos transformadores são envolvidos em núcleos feitos com pilhas, ou lâminas de chapas de aço. O núcleo garante uma boa “ligação magnética” entre os enrolamentos primário e secundário. Correntes parasitas são geradas pela corrente alternada que induz uma tensão no núcleo do próprio transformador. Como o núcleo de ferro é um condutor, a tensão nele induzida produz uma corrente. Laminando o núcleo, os caminhos para a circulação dessas correntes parasitas são bastante reduzidos, daí diminuindo as perdas de potência e o aquecimento do núcleo. As correntes parasitas são impedidas de fluir de uma lâmina para a outra por meio de uma camada fina de material isolante sobre as superfícies planas das lâminas (veja a Figura 3).



Correntes parasitas em um núcleo sólido



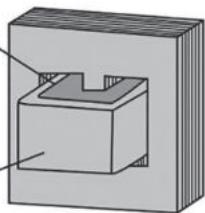
A laminação reduz o caminho para a circulação de correntes parasitas

**Figura 3.** Correntes parasitas no núcleo de um transformador.

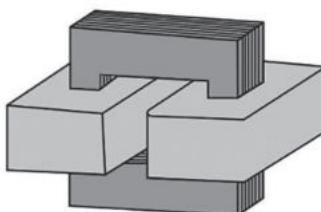
Fonte: Petruzella (2013, p. 366).

As correntes parasitas em um núcleo laminado são muito pequenas e representam a perda de energia dissipada na forma de calor no núcleo. O núcleo envolvente e o núcleo envolvido são as duas configurações gerais de núcleo e enrolamento (veja a Figura 4).

Enrolamento de baixa tensão  
Enrolamento de alta tensão



Transformador de núcleo envolvente



Transformador de núcleo envolvido

**Figura 4.** Configurações de núcleo e enrolamento de transformadores.

Fonte: Petruzella (2013, p. 366).

Em geral, os transformadores menores são do tipo núcleo envolvente. O núcleo envolve os enrolamentos, com o enrolamento de baixa tensão sendo colocado mais próximo do núcleo, e o de alta tensão sendo enrolado por

cima dele. Na configuração de transformador do tipo núcleo envolvido, os enrolamentos envolvem o núcleo e ambos os enrolamentos, primário e secundário, são colocados em cada perna do núcleo. Os transformadores de núcleo envolvido, por serem mais fáceis de isolar e refrigerar, são muito utilizados em transformadores de alta tensão maiores.

## Relações de tensão, corrente e potência

Os transformadores, além de elevar e abaixar a tensão, ainda permitem que a tensão permaneça a mesma entre os enrolamentos primário e secundário, sem uma grande perda de potência. A potência de saída do transformador é igual à potência de entrada do transformador menos as perdas internas, e é igual ao produto da tensão pela corrente. Especificamos os transformadores em kVA nominal (em vez de kW), porque essa potência nominal independe do fator de potência. Atente para a relação de espiras dos enrolamentos primário e secundário de um transformador, pois é ela que vai estabelecer o fator pelo qual a tensão será elevada ou abaixada. Muitas vezes essa relação de espiras é denominada relação de transformação de um transformador e é assim definida (PETRUZELLA, 2013):

$$\text{Relação de espiras} = \frac{N_p}{N_s}$$

$$\text{Relação de espiras} = \text{Relação de tensão} = \frac{N_p}{N_s} = \frac{E_p}{E_s}$$

Em que:

$N_p$  é o número de espiras do enrolamento primário.

$N_s$  é o número de espiras do enrolamento secundário.

$E_p$  é a tensão no primário.

$E_s$  é a tensão no secundário.

Podemos calcular qualquer um dos valores, desde que os outros três sejam conhecidos, simplesmente rearranjando a fórmula. A tensão aumenta ou abaixa por meio do transformador de forma proporcional à relação de espiras. Por exemplo, se o número de espiras do secundário for o dobro do número de espiras do primário, a tensão no secundário será duas vezes a tensão no primário. Do mesmo modo, se o número de espiras do primário for o dobro do número de espiras do secundário, a tensão no secundário será a metade da tensão no primário. Em um transformador elevador, a tensão de saída no enrolamento secundário é maior do que a tensão de entrada no enrolamento primário. Esse tipo de transformador tem mais espiras no enrolamento secundário do que no

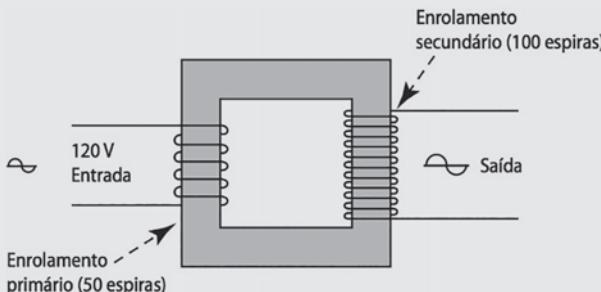
enrolamento primário. A relação entrada-saída de tensão do transformador é definida pela relação de espiras do primário para o secundário.



## Exemplo

O transformador elevador (mostrado na figura abaixo) tem 50 espiras no enrolamento primário e 100 espiras no enrolamento secundário. Vamos determinar:

- a relação de espiras;
- a tensão no enrolamento secundário se a tensão no primário é 120V.



*Fonte:* Petruzella (2013, p. 367).

Solução:

$$(a) \text{ Relação de espiras} = \frac{N_p}{N_s} = \frac{50}{100} = \frac{1}{2} \text{ ou } 1 : 2$$

Indicando a existência de uma espira no enrolamento primário para cada duas espiras no enrolamento secundário.

(b) Uma vez que a relação de espiras é 1:2,  $E_p$  é elevada por um fator de 2, igualando  $E_s$  a 240 V ( $2 \times 120$ ). Ou:

$$\begin{aligned} E_s &= E_p \times \frac{N_s}{N_p} \\ &= 120 \times \frac{100}{50} \\ &= 240 \text{ V} \end{aligned}$$

Já no transformador abaixador a tensão de saída no enrolamento secundário é menor do que a tensão de entrada no enrolamento primário. Esse tipo de transformador tem menos espiras no enrolamento secundário do que no enrolamento primário. Novamente, é a relação de espiras do primário para o secundário que estipula a relação entrada-saída de tensão do transformador.

Para atender às exigências de sua saída ou da corrente de carga, o transformador ajusta automaticamente sua corrente de entrada. Quando não há carga ligada ao seu enrolamento secundário, não flui corrente no primário, com exceção da corrente de excitação. A corrente de excitação (ou corrente de magnetização) é necessária para criar o fluxo no núcleo. Seu valor é determinado, principalmente, pela reatância indutiva do enrolamento primário, que pode ser bastante elevada e, ainda assim, não absorver muita potência ativa, porque a tensão e a corrente estão muito defasadas entre si (praticamente de 90°).

Ao energizar um transformador pela primeira vez, flui uma corrente de energização ou de partida transitória. O valor dessa corrente é tão elevado que pode ser até 15 vezes maior do que a corrente nominal, dependendo do estado magnético do núcleo e do ponto da forma de onda de tensão no qual o transformador é energizado. Essa corrente decai exponencialmente ao longo de vários ciclos até tender para o fluxo normal da corrente de magnetização. As características de operação se alteram quando uma carga é ligada por meio do secundário de um transformador. Veja a seguir uma breve descrição da série de eventos (PETRUZELLA, 2013):

- A tensão induzida no enrolamento secundário gera uma corrente de carga que flui por meio da carga e do enrolamento secundário.
- A corrente de carga fluindo por meio do enrolamento secundário cria um fluxo magnético no núcleo, que se opõe ao fluxo produzido pela corrente de magnetização no enrolamento primário (lei de Lenz).
- A fcem (força contraeletromotriz) do primário, portanto, diminui, de modo que a corrente no primário se eleva (para compensar essa redução).
- O aumento da corrente primária corresponde ao necessário para fortalecer o campo magnético do enrolamento primário e superar os efeitos do fluxo magnético oposto do enrolamento secundário. Se o circuito do secundário do transformador torna-se um curto-círcuito, a corrente elevada resultante origina uma grande oposição ao fluxo do enrolamento primário. Assim, a fcem do primário cai muito, e há um grande aumento da corrente primária. Isso explica por que um fusível ou um disjuntor conectado em série com o enrolamento primário protege tanto o circuito primário quanto o secundário contra correntes excessivas. Quanto ao primário, uma carga conectada por meio do enrolamento secundário do transformador parece ter uma resistência que não é necessariamente igual à resistência real da carga. A carga real se “reflete” para o primário de acordo com a relação de espiras. Essa carga refletida é o que a fonte de fato enxerga e acaba determinando o valor da corrente

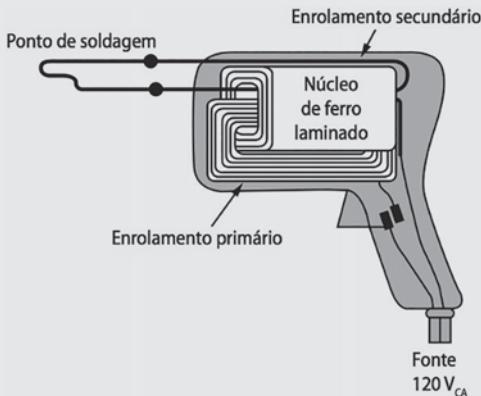
no primário. A corrente nos dois enrolamentos segue uma proporção inversa à relação de tensão e/ou de espiras. Ou seja, o enrolamento com o valor mais elevado de tensão terá a corrente mais baixa – expresso em forma de equação, temos:



### Exemplo

O transformador abaixador da pistola de solda (mostrado na figura a seguir) tem uma relação de espiras de 200:1 e uma corrente de aquecimento no secundário de 400 A.

Determine: (a) o valor da corrente no primário; (b) o valor da tensão no secundário se o primário é alimentado por uma fonte CA de 120 V.



*Fonte:* Petruzella (2013, p. 370).

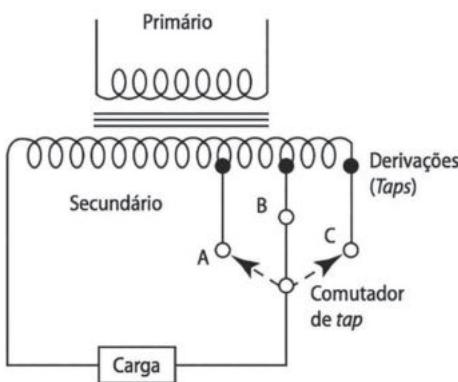
(a) Uma vez que a relação de espiras é 200:1, a corrente no primário será reduzida por um fator de 200, igualando  $I_p$  a 2 A ( $400 \div 200$ ). Ou:

$$\begin{aligned} I_p &= \frac{N_s}{N_p} \times I_s \\ &= \frac{1}{200} \times 400 \\ &= 2 \text{ A} \end{aligned}$$

(b) Uma vez que a relação de espiras é 200:1, a tensão no secundário ( $E_s$ ) é abaixada por um fator de 200, igualando  $E_s$  a 0,6 V ( $120 \div 200$ ).

A relação de espiras não influencia a potência ou os volt-ampéres (VA) nos enrolamentos. A potência nominal de um transformador é igual ao produto da tensão nominal pela corrente nominal. No entanto, não expressamos o resultado em watts, pois nem todas as cargas são puramente resistivas. Assim, dependendo do tamanho do transformador, especificamos sua potência nominal em volt-ampéres (VA) ou quilovolt-ampéres (kVA). Apenas a resistência consome potência em watts, mas, na prática, o aumento de temperatura de um transformador está diretamente relacionado à potência aparente que atravessa os seus enrolamentos. Ou seja, um transformador de 250 kVA vai ficar tão quente alimentando uma carga indutiva de 250 kVA como ficaria alimentando uma carga resistiva de 250 kVA. Pressupondo perdas nulas para o transformador, a potência no secundário é igual à potência no primário:  $EP \times IP = ES \times IS$ .

Alguns transformadores são fabricados com derivações (taps) no enrolamento para permitir o ajuste da tensão do transformador para a tensão de entrada ou saída correta, ou a seleção de várias tensões para diversas aplicações. Veja na Figura 5 um enrolamento secundário com três terminais para a conexão da carga. Em operação normal, a chave conecta o terminal B à carga. Com essa conexão, suponha que a relação de espiras é 1:10. Se necessário, a chave pode conectar a derivação A à carga, mas isso vai mudar a relação de espiras, afinal, temos menos espiras no secundário para o mesmo número de espiras no primário e, com isso, a tensão é reduzida no secundário. Do mesmo modo, se a derivação C for conectada à carga, a relação de tensão se alterará, afinal, vamos ter mais espiras no secundário para o mesmo número de espiras no primário e, portanto, a tensão será aumentada no secundário.



**Figura 5.** Transformador com derivações (taps) no secundário.

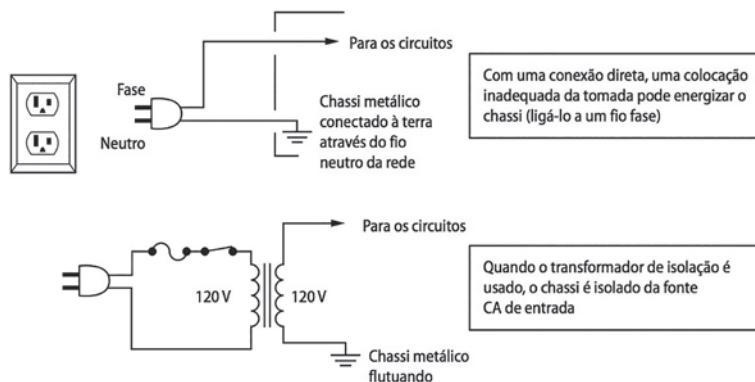
Fonte: Petruzella (2013, p. 373).

A maioria dos transformadores de pequeno e médio porte possui comutadores de derivação (tap) que operam apenas na condição sem carga. Ou seja, a alimentação precisa ser desligada e as derivações alteradas no transformador quando ele estiver desenergizado. Em transformadores de grande porte, ou em unidades especialmente projetadas, a mudança de derivação (tap) é feita automaticamente. Esse método, além de ser um tanto caro, normalmente não é empregado em transformadores de potência igual a 1000 kVA ou inferior.

Em um transformador de dois enrolamentos, os enrolamentos primário e secundário são isolados eletricamente um do outro. Por isso, toda a transferência de energia por meio do transformador é feita por ação transformadora. Os transformadores de isolamento especiais em geral são empregados para fornecer correção de tensão pelas derivações do primário, para estabelecer um terra isolado no lado secundário, e para isolar eletricamente as linhas de energia de entrada das cargas conectadas no secundário. A isolamento do primário para o secundário em um transformador de isolamento auxilia na redução dos transitórios e dos ruídos de alta frequência à medida que eles tentam passar pelo transformador.

Veja na Figura 6 a aplicação de um transformador de isolamento para instalar um terra flutuante isolado em uma peça de equipamento eletrônico. Essa configuração às vezes é utilizada em equipamentos eletrônicos para isolar os circuitos primário e secundário, sem mudar a corrente e a tensão

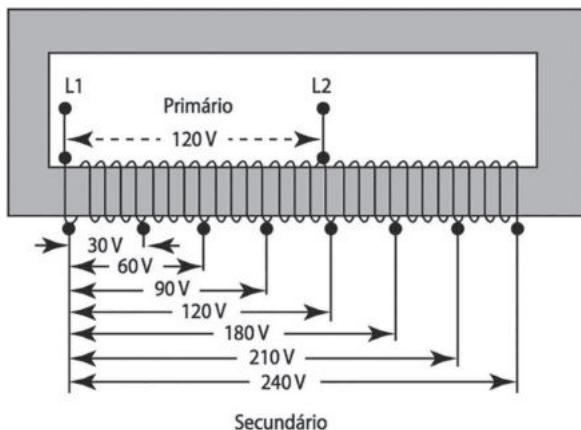
nominais. A relação de espiras do transformador é 1:1, sinalizando que não haverá mudança na tensão ou na corrente entre o primário e o secundário. Para isolar a carga da fonte de tensão, empregamos um transformador de isolamento, para que não haja a possibilidade de que o chassi porventura fique energizado devido a uma colocação inadequada da tomada.



**Figura 6.** Transformador de isolamento.

Fonte: Petruzella (2013, p. 374).

Já os autotransformadores têm os seus enrolamentos primário e secundário ligados eletricamente um ao outro. Entre as vantagens dos autotransformadores estão o tamanho menor e o custo mais em conta. Entre as suas desvantagens está o fato de os enrolamentos do primário e do secundário estarem ligados entre si e as suas relações de tensão serem baixas. Com os dois enrolamentos ligados juntos, o enrolamento de baixa tensão fica sujeito a uma alta tensão no caso de ruptura da isolamento. Você precisa considerar essas questões de segurança quando for tomar a decisão de usar um autotransformador para uma determinada aplicação. Veja na Figura 7 um autotransformador com uma relação de tensão de 2:1. O enrolamento primário, entre L1 e L2, é alimentado com 120 V. Os terminais são marcados com as tensões obtidas a partir deles, para ambas as conexões elevadoras e abaixadoras.



**Figura 7.** Autotransformador.

Fonte: Petruzella (2013, p. 374).

## Perdas e eficiência de um transformador

De acordo com Gussow (2009), os transformadores reais apresentam perdas no cobre e perdas no núcleo. A **perda no cobre** é representada pela potência perdida nos enrolamentos do primário e do secundário devido à resistência ôhmica dos enrolamentos. A perda no cobre é dada em watts e é calculada por meio da fórmula:

$$\text{Perda no cobre} = I_p^2 R_p + I_s^2 R_s$$

Em que

$I_p$  = corrente do primário (em A)

$I_s$  = corrente do secundário (em A)

$R_p$  = resistência do enrolamento do primário (em  $\Omega$ )

$R_s$  = resistência do enrolamento do secundário (em  $\Omega$ )

As perdas no núcleo são ocasionadas por dois fatores: as perdas por histerese e as perdas por correntes parasitas. A perda por histerese ocorre quando a energia é perdida pela inversão do campo magnético no núcleo à medida que a corrente alternada de magnetização aumenta e diminui e muda de sentido. Já a perda por correntes parasitas ou correntes de Foucault é resultado das correntes induzidas que circulam no material do núcleo.

A perda no cobre dos dois enrolamentos é medida por meio de um wattímetro, que é inserido no circuito do primário do transformador enquanto o secundário

é curto-circuitado. A tensão aplicada ao primário é então aumentada até que a corrente especificada para a carga máxima fluia pelo secundário em curto-círcuito. Neste ponto, o wattímetro indicará a perda total no cobre. A perda no núcleo também é verificada por meio de um wattímetro colocado no circuito do primário, aplicando-se a tensão especificada ao primário, com o circuito secundário aberto. A eficiência de um transformador real é expressa da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \text{Ef} &= \frac{\text{potência de saída}}{\text{potência de entrada}} = \frac{P_S}{P_p} \\ &= \frac{\text{potência de saída}}{\text{potência+perda no cobre+perda do núcleo}} \\ \text{Ef} &= \frac{V_S I_S \times FP}{(V_S I_S \times FP) + \text{perda no cobre} + \text{perda no núcleo}} \end{aligned}$$



## Exemplo

Um transformador abaixador de 10:1 de 5 kVA tem uma especificação para a corrente do secundário com carga máxima de 50 A. Em um teste de curto-círcuito, para determinar a perda no cobre com carga máxima, ele apresenta uma leitura no wattímetro de 100 W. Se a resistência do enrolamento do primário for de  $0,6\Omega$ , calculamos a resistência do enrolamento do secundário e a perda de potência no secundário da seguinte forma:

Perda no cobre =  $P_{PRP} + P_{SRS}$

Para calcular  $I_p$  com carga máxima, utilizamos a seguinte equação:

$$\frac{N_p}{N_s} = \frac{I_s}{I_p}$$

a partir do que

$$I_p = \frac{N_s}{N_p} I_s = \frac{1}{10} 50 = 5 A$$

Agora vamos determinar o valor de  $R_s$  a partir da equação para a perda no cobre dada anteriormente.

$$\begin{aligned} P_S R_S &= 100 - P_P R_P \\ \frac{100 - I_p^2 R_p}{I_s^2} &= \frac{100 - 5^2 (0,6)}{50^2} = 0,034 \Omega \end{aligned}$$

Perda de potência no secundário =  $I_p^2 R_s = 50^2 (0,034) = 85W$  ou perda de potência no secundário =  $100 - I_p^2 R_s = 100 - 5^2 (0,6) = 85W$

## Especificações dos transformadores

Preste atenção: a instalação de um transformador com uma tensão, corrente ou potência nominal incorreta pode causar danos ou ferimentos graves. Para utilizar um transformador em um determinado circuito, você precisa levar em consideração as especificações de tensão, corrente e potência nos enrolamentos primário e secundário do transformador, pois elas representam o ponto médio dos respectivos valores máximo e mínimo. Determinamos a tensão máxima que pode ser aplicada com segurança a qualquer enrolamento pelo tipo e pela espessura do isolamento utilizado. Se a isolação usada entre os enrolamentos for de melhor qualidade, podemos aplicar uma tensão maior aos enrolamentos. Estabelecemos a corrente máxima que pode circular pelo enrolamento de um transformador pela seção do fio usado no enrolamento. Se a corrente é excessiva em um enrolamento, uma quantidade de potência maior do que a normal será dissipada no enrolamento na forma de calor. É possível que esse calor seja suficientemente elevado para provocar a ruptura do isolamento em torno do fio. Por isso, para manter a temperatura do transformador em um nível aceitável, é necessário definir limites, tanto para a tensão aplicada como para a corrente absorvida pela carga. A especificação dos transformadores é em volt-ampères (VA) ou quilovolts-ampères (kVA). Isso significa que o enrolamento primário e o enrolamento secundário são projetados para suportar a potência aparente (em VA ou kVA) indicada na placa de identificação do transformador. Geralmente não são dadas as correntes à plena carga do primário e do secundário, mas podemos calculá-las a partir da potência nominal (VA ou kVA) conforme a seguir:

**Monofásico:** Corrente a plena carga =  $\frac{VA}{Tensão}$   
Corrente a plena carga =  $\frac{kVA \cdot 1000}{Tensão}$

**Trifásico:** Corrente a plena carga =  $\frac{kVA \cdot 1000}{1,73 \cdot Tensão}$



## Exemplo

Considere um transformador monofásico com uma tensão no primário de 480 V e uma tensão no secundário de 120 V. Supondo que o transformador possui potência nominal de 25 kVA, vamos determinar:

- a corrente à plena carga do primário;
- a corrente à plena carga do secundário.

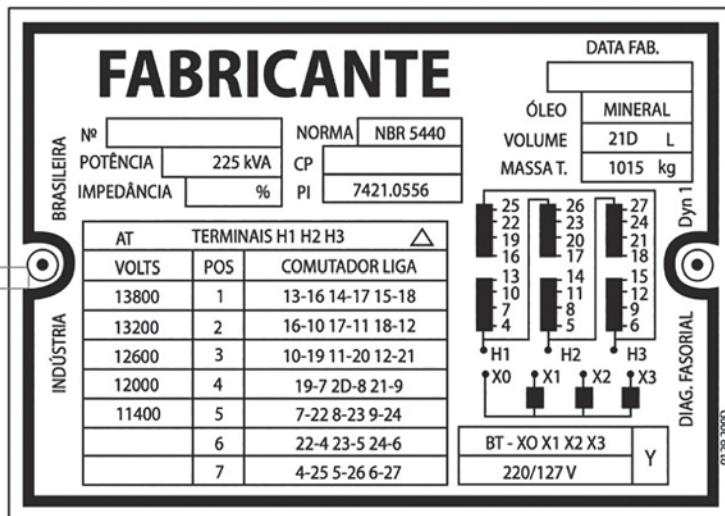
Solução:

$$\begin{aligned} \text{(a) Corrente a plena carga do primário} &= \frac{\text{kVA} \cdot 1000}{\text{Tensão}} \\ &= \frac{25 \cdot 1000}{480} \\ &= 52 \text{ A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{(b) Corrente a plena carga do secundário} &= \frac{\text{kVA} \cdot 1000}{\text{Tensão}} \\ &= \frac{25 \cdot 1000}{120} \\ &= 208 \text{ A} \end{aligned}$$

Veja na Figura 10 uma típica placa de identificação de transformador. Suas informações são normalizadas (normas da ABNT) e representam um resumo das características do equipamento. Algumas das principais informações que devem constar na placa são:

- Nome do fabricante
- Potência nominal em kVA
- Frequência nominal
- Impedância de curto-circuito em porcentagem
- Tipo de óleo isolante e volume necessário, em litros
- Designação do método de resfriamento
- Diagrama de ligações, contendo todas as tensões nominais e de derivações (com identificação das derivações)
- Limite de elevação de temperatura dos enrolamentos

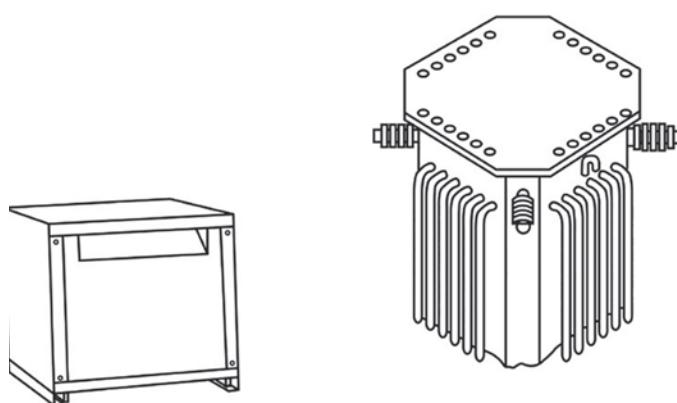


**Figura 10.** Placa típica de identificação de transformador.

Fonte: Petruzella (2013, p. 379).

Conforme Petruzella (2013), a principal causa de falhas nos transformadores é a elevação excessiva da temperatura. O calor gerado na operação do transformador eleva a temperatura nas estruturas internas do transformador. Os transformadores mais eficientes costumam ter um aumento menor da temperatura. A elevação da temperatura do transformador é definida como o aumento médio da temperatura dos enrolamentos acima da temperatura ambiente, quando o transformador está carregado com a sua potência nominal especificada na placa de identificação. Esse valor em geral tem como base uma temperatura ambiente de 40°C.

Uma refrigeração adequada deve ser garantida a fim de evitar a deterioração dos materiais de isolamento dentro de um transformador e permitir a sua expectativa de vida longa. Os transformadores são resfriados utilizando ar, água, óleo ou convecção natural ou forçada. Basicamente, temos dois tipos de transformadores: a seco e a óleo (Figura 11).



Transformador a seco  
(Refrigeração com ar por convecção)

Transformador a óleo  
(Bobinas são submersas em  
tanque cheio de óleo isolante)

**Figura 11.** Método de refrigeração de transformadores.

Fonte: Petruzella (2013, p. 380).

Para seu pleno funcionamento, os transformadores a seco precisam da circulação de ar sobre ou através do seu invólucro. Os transformadores a óleo têm os enrolamentos e o núcleo do transformador submersos em um líquido isolante, normalmente um óleo mineral ou sintético para fins de refrigeração. Segundo as normas, os transformadores têm de ser instalados de modo que as aberturas projetadas para fins de resfriamento não sejam bloqueadas ou obstruídas. Além disso, é obrigatório marcar os transformadores com uma distância mínima da parede ou de outras obstruções para facilitar a dissipação de calor. Veja agora os métodos mais utilizados para remover o calor provocado por perdas no núcleo e perdas no cobre:

- Disponibilizar um fluxo normal de ar em volta do invólucro do transformador.
- Instalar tubos ou aletas adicionais na montagem do invólucro para aumentar a área da superfície de resfriamento.
- Utilizar furos de ventilação para transformadores refrigerados a ar.
- Fazer a circulação forçada de ar (ventiladores).
- Utilizar enrolamentos e núcleo submersos em um líquido isolante, tal como um óleo mineral ou um fluido sintético.

- Disponibilizar circulação natural de óleo com refrigeração à água.
- Oferecer circulação forçada de óleo por meio de um trocador de calor.

Definimos como **impedância** de um transformador as suas características de limitação de corrente. Normalmente expressamos a impedância como uma porcentagem, que é a tensão nominal primária normal a ser aplicada ao transformador para provocar a circulação da corrente nominal no secundário curto-circuitado.



### Saiba mais

Assim como outros dispositivos eletromagnéticos, os transformadores produzem um "zumbido" quando energizados. Esse zumbido ocorre devido às vibrações geradas no interior da estrutura do núcleo de aço laminado.

O desenvolvimento de equipamentos elétricos e eletrônicos tem como base a operação com tensão de alimentação padrão. Quando a tensão está muito baixa ou muito alta (em geral mais do que  $\pm 5\%$ ), de modo constante, o equipamento não terá eficiência máxima no seu funcionamento. Os seguintes tópicos vão guiá-lo na seleção de um transformador para cumprir os requisitos de uma instalação específica (PETRUZELLA, 2013):

- A tensão de alimentação nominal corresponde à tensão nominal do enrolamento primário do transformador.
- A tensão do secundário do transformador condiz com as exigências de tensão da carga.
- A potência (VA ou kVA) nominal do transformador é igual ou maior do que a potência exigida pela carga que será alimentada por ele.

## Transformadores trifásicos versus monofásicos

Utilizar um único transformador trifásico, em vez de três transformadores monofásicos, traz as seguintes vantagens. A primeira delas é a operação mais eficiente de um transformador trifásico em comparação às três unidades monofásicas necessárias para o seu lugar. A segunda é a maior facilidade de instalação e a menor complexidade em termos de disposição da estrutura de barramento, dos comutadores e da fiação para um transformador trifásico em comparação a um banco de transformadores constituído por três transformadores monofásicos. A terceira vantagem é que os transformadores trifásicos pesam menos e exigem menos espaço em relação às três unidades monofásicas. E, por fim, em termos de custos, um único transformador trifásico é mais barato, porque menos material de núcleo é necessário para a potência nominal (kVA nominal), o que equivale a três unidades monofásicas.

## Sistemas de distribuição

A existência de um sistema de energia CA depende da disponibilidade de transformadores. Sem eles, o sistema de energia não poderia operar. De um modo mais amplo, o sistema de distribuição de energia elétrica refere-se à forma como a energia elétrica é transmitida dos geradores para os diversos pontos de utilização. Ou seja, o sistema de distribuição diz respeito às redes e aos circuitos pelos quais a energia passa ao longo das ruas das cidades ou das estradas rurais em direção ao consumidor final.

A transmissão de energia na tensão de utilização é conhecida como distribuição secundária. O sistema de linhas e circuitos alimentando o sistema de distribuição secundário é o sistema de distribuição primário ou principal. O elo entre o sistema de distribuição primário e o secundário é o “transformador de distribuição”: ele permite aumentar a tensão alternada e reduzir a corrente e as perdas. Sem os transformadores, a ampla transmissão e distribuição de energia elétrica não seria possível.



## Exercícios

1. Os transformadores elétricos são utilizados para:

  - a) Converter CC em CA.
  - b) Aumentar ou diminuir a tensão CC.
  - c) Aumentar ou diminuir a tensão CA.
  - d) Converter o nível de tensão CC
  - e) Nenhuma das alternativas anteriores.
2. Autotransformador é um tipo de transformador que:

  - a) Tem um só enrolamento e tomadas (*taps*) de derivação.
  - b) É um adaptador de impedâncias.
  - c) Tem primário e secundário separados.
  - d) Tem relação de espiras definida.
  - e) É um isolador de tensões.
3. Para uso em linhas de transmissão de energia elétrica, por que são usados transformadores?

  - a) Permitem tensões menores.
  - b) Permitem maior segurança contra-choques elétricos.
  - c) Permitem transformar CA em CC.
  - d) Permitem maior velocidade de envio.
  - e) Permitem aumentar a tensão alternada e reduzir a corrente e as perdas.
4. Na construção de um transformador, o que permite aumentar ou diminuir a tensão?

  - a) Tamanho do secundário.
  - b) Relação de espiras do primário ou secundário.
  - c) Número de fases do transformador.
  - d) Bitola dos fios do primário e secundário.
  - e) Nenhuma das alternativas anteriores.
5. Por que temos transformadores trifásicos nas redes?

  - I. Transformadores trifásicos têm melhor rendimento.
  - II. Os motores industriais e as cargas na sua maioria são trifásicos, melhor rendimento.
  - III. Rede trifásica tem menor fiação e maior rendimento.
  - a) Somente a I.
  - b) Somente a II.
  - c) Somente a III.
  - d) Todas as alternativas estão corretas.
  - e) Nenhuma das alternativas anteriores.

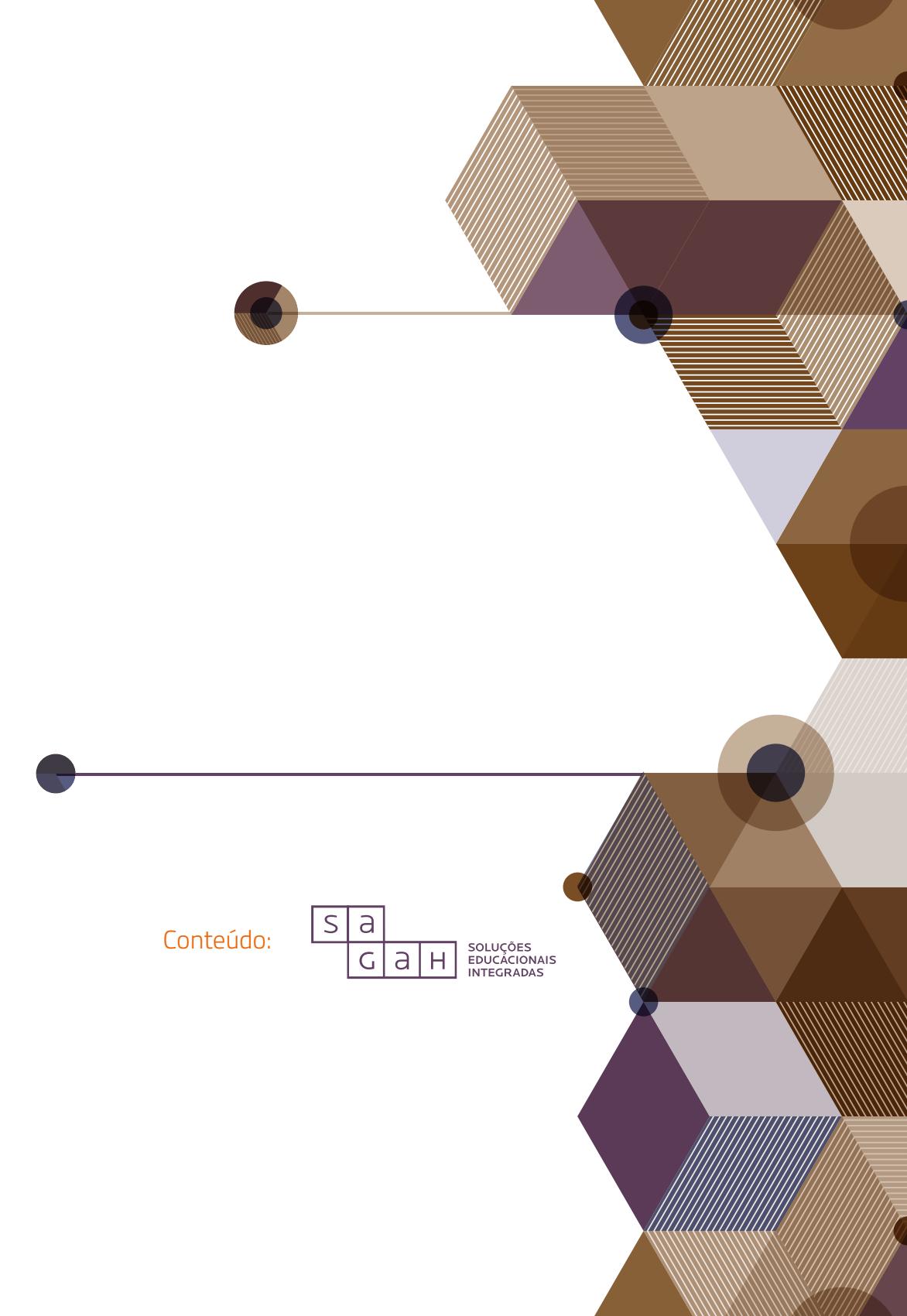


## Referências

GUSSOW, M. *EletRICIDADE bÁSICA*. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009. (Coleção Schaum).

PETRUZELLA, F. D. *Eletrotécnica II*. 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



## DICA DO PROFESSOR

A distribuição de energia elétrica para a população só se tornou viável economicamente com o uso de geração em corrente alternada. Geradores de corrente contínua apresentavam grandes perdas pela alta resistência elétrica na transmissão do gerador ao consumidor.

Os transformadores permitiram aumentar a tensão do gerador para o transporte de energia pela rede de alta tensão, e também rebaixar a tensão a níveis adequados aos consumidores, sejam indústria, comércio ou residências. Transformadores também são utilizados em fontes de alimentação, rebaixando a tensão local para níveis menores para alimentação de equipamentos eletrônicos.

Vamos acompanhar mais detalhes no vídeo.

Conteúdo interativo disponível na plataforma de ensino!



## EXERCÍCIOS

1) **Transformadores elétricos são utilizados para:**

- A) Converter CC em CA.
- B) Aumentar ou diminuir a tensão CC.
- C) Aumentar ou diminuir a tensão CA.
- D) Converter o nível de tensão CC
- E) Nenhuma das alternativas.

2) **Autotransformador é um tipo de transformador que:**

- A) Tem um só enrolamento e tomadas (taps) de derivação.
  - B) É um adaptador de impedâncias.
  - C) Tem primário e secundário separados.
  - D) Tem relação de espiras definida.
  - E) É um isolador de tensões.
- 3) **Para uso em linhas de transmissão de energia elétrica, por que são usados transformadores?**
- A) Permitem tensões menores.
  - B) Permitem maior segurança contra choques elétricos.
  - C) Permitem transformar CA em CC.
  - D) Permitem maior velocidade de envio.
  - E) Permitem aumentar a tensão alternada e reduzir a corrente e as perdas.
- 4) **Na construção de um transformador, o que permite aumentar ou diminuir a tensão?**
- A) Tamanho do secundário.
  - B) Relação de espiras do primário ou secundário.

- C) Número de fases do transformador.
- D) Bitola dos fios do primário e secundário.
- E) Nenhuma das alternativas.

**5) Por que temos transformadores trifásicos nas redes?**

- I - Transformadores trifásicos têm melhor rendimento.
- II - Os motores industriais e cargas na sua maioria são trifásicos, melhor rendimento.
- III - Rede trifásica tem menor fiação e maior rendimento.

- A) Somente a I.
- B) somente a II.
- C) Somente a III.
- D) Todas as alternativas estão corretas.
- E) Nenhuma das alternativas.



### NA PRÁTICA

Transformadores são muito utilizados em nosso cotidiano, e muitas vezes nem percebemos. Necessitamos receber energia, e estamos longe normalmente das usinas geradoras de energia elétrica, que podem ser hidrelétricas, termelétricas, eólicas, solares.

Como os condutores apresentam resistência elétrica, e a potência de distribuição é elevada para toda a população consumidora (indústrias, comércio, serviços públicos e residências), é necessária uma alta tensão, com menores correntes, para a transmissão com menores perdas.

Cada consumidor necessita níveis diferentes de tensão.

A indústria possui equipamentos diversificados, que têm alimentação de energia diferenciada. Já o comércio, a rede pública e os consumidores residenciais têm necessidades específicas de suprimento de energia, em níveis de tensão e corrente.

Você pode dimensionar uma sub-estação de energia de uma indústria através do levantamento de potência de cargas, tensão e correntes necessárias. A indústria é considerada pela concessionária um consumidor especial, e é tarifado como tal, pois recebe energia em alta tensão (tipicamente 13,8 Kilo Volts). Através de transformador adequado, pode suprir todas as suas cargas.



Do mesmo modo, fontes de alimentação convencionais recebem tensão alternada (normalmente 127/220 Volts) e necessitam de um componente elétrico que rebaixe para níveis de tensão menores, no caso o transformador, dimensionado adequadamente em níveis de tensão e corrente. Através de circuito retificador e filtros, a corrente alternada é convertida em corrente contínua para a alimentação de eletroeletrônicos.



## SAIBA MAIS

Para ampliar o seu conhecimento a respeito desse assunto, veja abaixo as sugestões do professor:

### Transformadores

Conteúdo interativo disponível na plataforma de ensino!

### TRA01 - Transformadores - Introdução

Conteúdo interativo disponível na plataforma de ensino!

### TRA03 - Relações de Transformação

Conteúdo interativo disponível na plataforma de ensino!

# Indutância e Capacitância. Circuitos RLC série I



## APRESENTAÇÃO

Nesta Unidade de Aprendizagem, estudaremos indutância e capacitors - circuitos RLC série parte I e suas funções em diferentes filtros. O que os indutores e capacitores representam e como controlam as tensões e correntes.

Bons estudos.

**Ao final desta Unidade de Aprendizagem, você deve apresentar os seguintes aprendizados:**

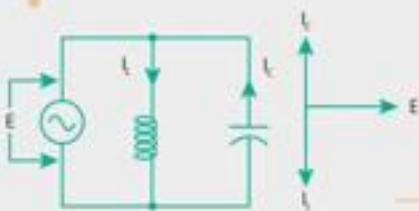
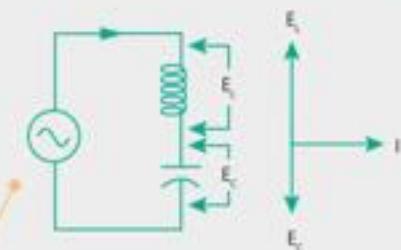
- Identificar os efeitos indutivos e capacitivos nos circuitos CC e CA.
- Expressar os conceitos de reatância indutiva e capacitiva e os fatores que as afetam.
- Comparar os defasamentos entre tensão e corrente introduzidos por indutores e capacitores.



## INFOGRÁFICO

O infográfico apresenta o esquema do que veremos nesta Unidade referente à indutância e capacitors. Circuitos RLC Série parte I.

# INDUTÂNCIA E CAPACITÂNCIA. CIRCUITOS RLC SÉRIE I



EFEITO DO  
CAPACITOR  
EM CA

REATÂNCIA I  
NDUTIVA E  
CAPACITIVA



## CONTEÚDO DO LIVRO

Leia o capítulo Indutância e Capacitância. Circuitos RLC Série I que faz parte da obra *Eletrotécnica* e é a base teórica desta Unidade de Aprendizagem.

Boa leitura.

# ELETROTÉCNICA

Rodrigo Rodrigues



S719e Souza, Diogo Braga da Costa.  
Eletrotécnica [recurso eletrônico] / Diogo Braga da Costa Souza, Rodrigo Rodrigues. – Porto Alegre : SAGAH, 2017.

Editado como livro em 2017.  
ISBN 978-85-9502-055-9

1. Eletrotécnica. 2. Engenharia elétrica. I. Rodrigues, Rodrigo. II. Título.

CDU 621.3

# Indutância e capacidade: Circuitos RLC série I

## Objetivos de aprendizagem

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

- Identificar os efeitos indutivos e capacitivos nos circuitos CC e CA.
- Expressar os conceitos de reatância indutiva e capacitiva e os fatores que as afetam.
- Comparar os defasamentos entre tensão e corrente introduzidos por indutores e capacitores.

## Introdução

Neste capítulo você vai estudar a indutância e a capacidade - circuitos RLC série parte I e suas funções em diferentes filtros. Você vai entender a importância que os indutores e capacitores têm na eletrotécnica ao ver o que eles representam e a forma como controlam as tensões e correntes.

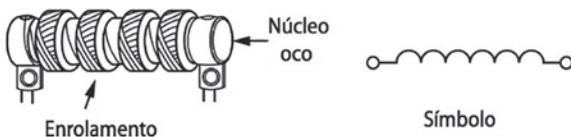
## Circuitos elétricos

As três propriedades básicas de circuitos empregadas para controlar as tensões e as correntes nos circuitos elétricos CA são a resistência, a indutância e a capacidade. A resistência se opõe à circulação de corrente; a indutância se opõe a qualquer variação na corrente, enquanto a capacidade se opõe a qualquer variação na tensão. Além disso, as resistências dissipam energia na forma de calor (energia térmica), ao passo que as indutâncias e capacidades armazenam energia.

## Indutores

Definimos um indutor simplesmente como uma bobina de fio. Outros nomes que se referem a um indutor são bloqueador (ou, em inglês, *choke*), bobina

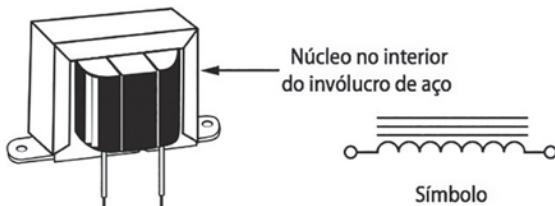
de impedância ou reator indutivo. Em geral podemos classificá-lo de acordo com o tipo de material usado para o seu núcleo. Veja na Figura 1 um indutor de núcleo de ar e o seu símbolo. O indutor de núcleo de ar é formado por uma bobina enrolada em torno de um suporte apenas com ar no meio, sendo utilizado em circuitos de comunicação de alta frequência. Devido à aplicação dos indutores de alta frequência nos rádios, eles ficaram conhecidos como bobinas de radiofrequência ou bobinas RF.



**Figura 1.** Indutor de núcleo de ar.

Fonte: Petruzella (2013, p. 184).

Veja na Figura 2 um indutor de núcleo de ferro e o seu símbolo. Os indutores de núcleo de ferro possuem uma bobina enrolada em torno de um núcleo laminado. O núcleo de ferro laminado faz parte de quase todos os grandes indutores utilizados em frequências industriais (60 Hz, por exemplo). Também conhecidos como bobinas de filtro, são utilizados em circuitos de filtro de fontes de alimentação. Muitas vezes a fonte de alimentação é a parte do equipamento que converte a corrente alternada em corrente contínua. O circuito de filtro, que inclui o indutor, ajuda a suavizar a corrente contínua flutuante ou pulsante até transformá-la praticamente em uma corrente contínua pura.



**Figura 2.** Indutor de núcleo de ferro.

Fonte: Petruzella (2013, p. 184).

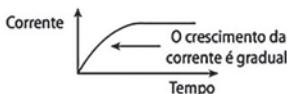
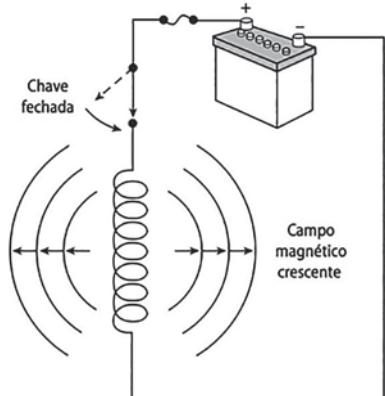


### Saiba mais

A capacidade, como a indutância, não consome potência. A única parte do circuito que consome potência é a resistência.

## Indutância

Definimos indutância ( $L$ ) como a capacidade de um circuito ou componente elétrico de se opor a qualquer variação no fluxo de corrente. A capacidade do circuito ou do componente indutivo de se opor a variações na corrente se deve à sua capacidade de armazenar energia e depois liberá-la em um campo magnético. Veja na Figura 3 o efeito da indutância em um circuito CC quando ele é inicialmente energizado.



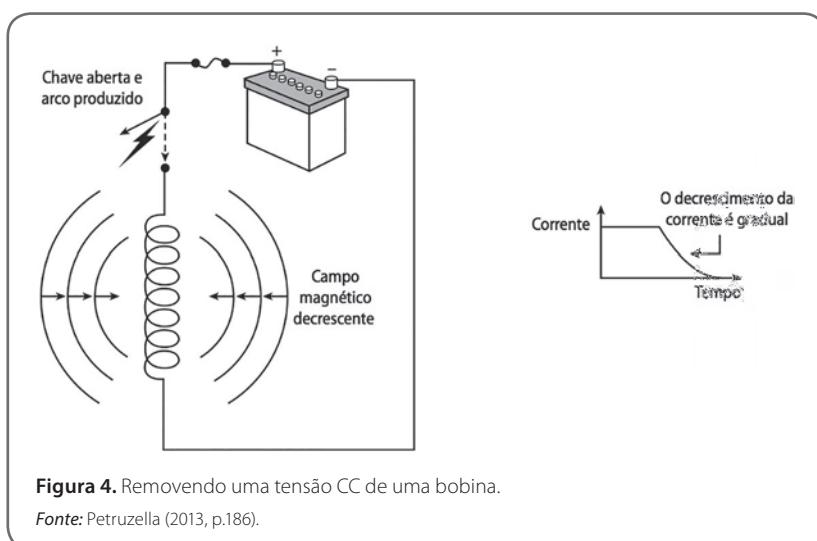
**Figura 3.** Aplicando uma tensão CC a uma bobina.

Fonte: Petruzella (2013, p. 185).

Ao aplicar a corrente a uma bobina ou um indutor, surge um campo magnético crescente quando o circuito é energizado (o campo magnético vai de “zero” até um valor final que está associado ao valor da corrente final do circuito).

As linhas desse campo magnético crescente que cortam os enrolamentos da bobina induzem uma tensão contrária na bobina que se opõe à tensão original aplicada. Quando a corrente atinge seu valor final determinado pela lei de Ohm, o campo magnético se mantém constante, e o efeito indutivo para.

Veja na Figura 4 o que acontece quando interrompemos a corrente contínua que circula por uma bobina:



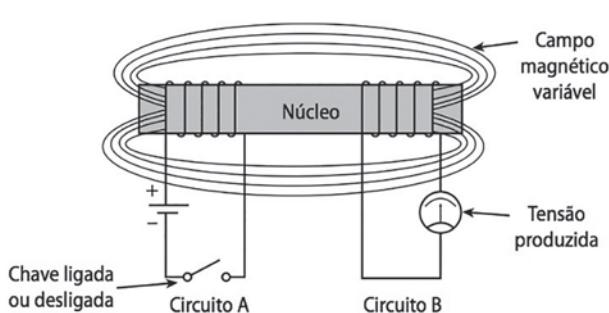
**Figura 4.** Removendo uma tensão CC de uma bobina.

Fonte: Petruzella (2013, p.186).

Ao desligar a tensão CC aplicada à bobina, o efeito indutivo surge mais uma vez. Ao abrir o interruptor, ocorre um arco elétrico (faísca) perceptível nos contatos da chave. À medida que a corrente cai para zero, o campo magnético decrescente (ou em colapso, variando de um dado valor até zero) induz uma tensão elevada na bobina. O arco produzido nos contatos vem dessa tensão induzida para tentar manter a corrente no circuito (neste caso, o arco elétrico ou a faísca manteria o caminho para a circulação da corrente no lugar da chave que foi aberta). Há efeito indutivo somente quando há variação na corrente. Em um circuito CC, isso acontece cada vez que o circuito é ligado ou desligado. A indutância própria ou autoindutância é o efeito indutivo que ocorre na própria bobina. Se uma segunda bobina for magneticamente acoplada à primeira, o efeito indutivo também será sentido na segunda bobina. Utilizamos o termo

**indutância mútua** quando o efeito indutivo é tal que uma variação de corrente em um circuito produz uma tensão induzida em outro circuito (Figura 5).

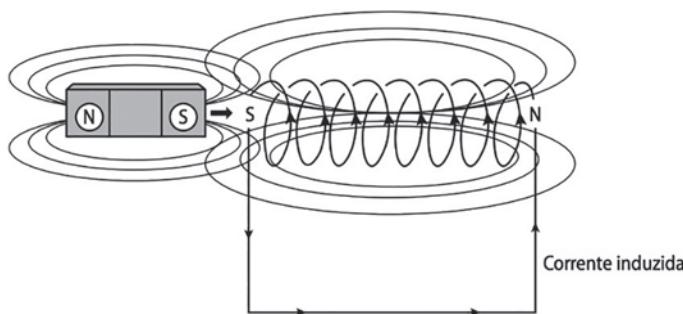
A tensão induzida sempre age no sentido de se opor à variação da corrente que a produziu.



**Figura 5.** Indutância mútua.

Fonte: Petruzella (2013, p. 187).

Nos circuitos CA, o campo magnético gerado pela corrente variável através do condutor aumenta e diminui com a corrente, o que provoca um efeito indutivo contínuo. É por esta razão que a indutância é o principal tipo de carga para os circuitos de corrente alternada. Há indutância, ainda que parasita ou indesejável, em todos os circuitos de corrente alternada, mas com mais evidência em cargas CA, como motores e transformadores que contêm bobinas. Em qualquer tipo de circuito indutivo, uma relação importante sempre se estabelece entre a variação da corrente e a tensão induzida, que é resumida pela lei de Lenz que trata da polaridade da tensão induzida e do sentido do fluxo da corrente. A regra é que os indutores sempre se opõem a uma variação na corrente. Uma corrente elétrica induzida por um campo magnético variável flui de modo que cria o seu próprio campo magnético que se opõe ao campo magnético que a criou (Figura 6). Esses campos opostos ocupando o mesmo espaço ao mesmo tempo geram um par de forças defasadas de 180º entre si. Sentimos o efeito das duas forças quando ligamos um gerador e obtemos eletricidade. Quanto maior for a corrente gerada, maior será a força de oposição.



**Figura 6.** Uma corrente elétrica induzida por um campo magnético variável fluirá em um dado sentido de tal forma que ela criará o seu próprio campo magnético, que se opõe ao campo magnético que a criou.

Fonte: Petruzella (2013, p. 187).

Denominamos **força contraeletromotriz (fcem)**, ou força eletromotriz inversa, a tensão induzida em um condutor ou em uma bobina pelo seu próprio campo, pois ela está sempre 180º defasada e sempre tenta forçar a corrente para o sentido contrário (ou sentido inverso).

Vamos pensar na indutância em termos do armazenamento e da conversão de energia. O fluxo de corrente em um indutor cria um campo magnético e esse campo armazena energia, cuja quantidade é uma função da corrente e da indutância. Um indutor ideal (admitindo que não há resistência do enrolamento) não dissipava energia: ele apenas a armazena. Quando uma tensão CA é aplicada a um indutor, a energia é armazenada no indutor durante uma parte do ciclo; em seguida, a energia armazenada é devolvida para a fonte durante outra parte do ciclo. Em um indutor ideal, não se perde (dissipa) energia líquida na forma de calor. Note que isso difere do que acontece com uma carga puramente resistiva em um circuito CA, em que toda a energia é convertida em calor (PETRUZELLA, 2013).

A capacidade de produzir uma força contraeletromotriz que se opõe a uma variação no fluxo de corrente é a indutância nominal de um indutor. Medimos o valor da indutância de uma bobina pela unidade chamada henry (H). Um henry (1 H) equivale à indutância de uma bobina na qual uma variação de corrente de 1 ampère por segundo (1 A/s) gerará uma força contraeletromotriz de um volt (1 V). Isso é mostrado na seguinte fórmula:

$$V_{f\text{cem}} = L \times \frac{\Delta I}{\Delta T}$$

onde:  $L$  = indutância em henries

$\Delta I$  = variação na corrente

$\Delta T$  = variação no tempo

Veja que quanto maior for o valor da indutância, maior será o valor da fcem induzida. Além disso, se a taxa de variação da corrente com relação ao tempo ( $\Delta I/\Delta T$ ) aumentar, a tensão induzida também aumentará. Por isso, quando desligamos um circuito indutivo CC, a fcem do indutor pode ser muito maior do que a tensão da fonte de tensão CC que alimenta o circuito.



## Exemplo

Vamos calcular agora a tensão induzida entre os terminais de um indutor de 4H, quando a corrente está variando com uma taxa de:

- (a) 1 A/s
- (b) 10 A/s

Solução:

$$\begin{aligned} \text{(a)} \quad V_{f\text{cem}} &= L \times \frac{\Delta I}{\Delta T} \\ &= 4 \text{ H} \times 1 \text{ A/s} \\ &= 4 \text{ V} \end{aligned}$$

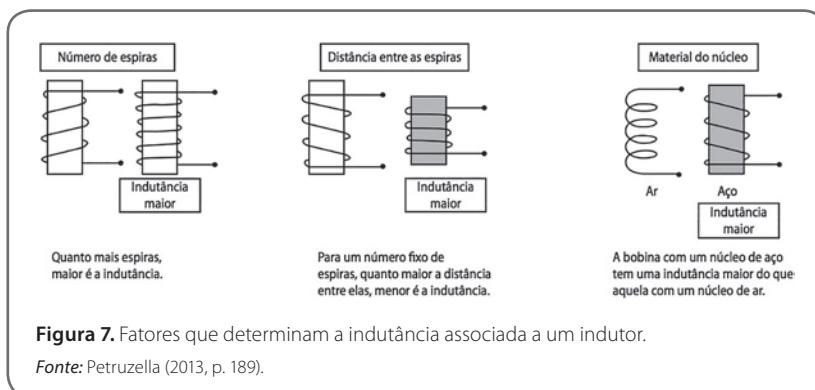
$$\begin{aligned} \text{(b)} \quad V_{f\text{cem}} &= L \times \frac{\Delta I}{\Delta T} \\ &= 10 \text{ H} \times 10 \text{ A/s} \\ &= 100 \text{ V} \end{aligned}$$

Os indutores usados em circuitos eletrônicos possuem valores práticos de indutância que variam desde vários henries (H) até poucos microhenries ( $\mu\text{H}$ ). Os indutores são especificados, além da indutância, de acordo com a resistência CC, a corrente, a tensão, o fator de qualidade e a tolerância. Veja agora uma descrição de cada uma dessas especificações (PETRUZELLA, 2013):

- A resistência CC se refere à resistência do fio do enrolamento do indutor.
- A corrente nominal designa o valor de corrente que o indutor consegue conduzir continuamente sem sobreaquecimento.

- A tensão nominal demonstra o valor de tensão que o isolamento do enrolamento do indutor consegue suportar continuamente.
- O fator de qualidade de um indutor é a relação entre a sua reatância e a sua resistência.
- A tolerância do indutor é representada como uma porcentagem da indutância própria indicada.

Só conseguimos medir a indutância utilizando medidores especiais, sendo que ela depende unicamente da forma física (incluindo a geometria) do núcleo e dos enrolamentos em torno do núcleo (Figura 7).



**Figura 7.** Fatores que determinam a indutância associada a um indutor.

Fonte: Petruzella (2013, p. 189).

O valor da indutância pode aumentar com o maior número de espiras (número de voltas em torno do núcleo); com a melhor qualidade do material do núcleo (maior permeabilidade magnética); com a área da seção reta do núcleo mais ampla; com a menor distância entre as espiras.

Diversas bobinas desenvolvidas de forma diferente poderiam ter uma indutância de um henry e cada uma teria o mesmo efeito no circuito. Alguns circuitos semicondutores possibilitam simular uma indutância de modo eletrônico dispensando o uso de indutores volumosos. Como o indutor tem como função básica fornecer uma tensão que se opõe a uma variação em sua corrente, temos então que a corrente não consegue variar imediatamente em um indutor. Demanda um certo tempo para que a corrente varie de um valor para outro. Calculamos a taxa de variação da corrente pela constante de tempo T:

$$T = L/R$$

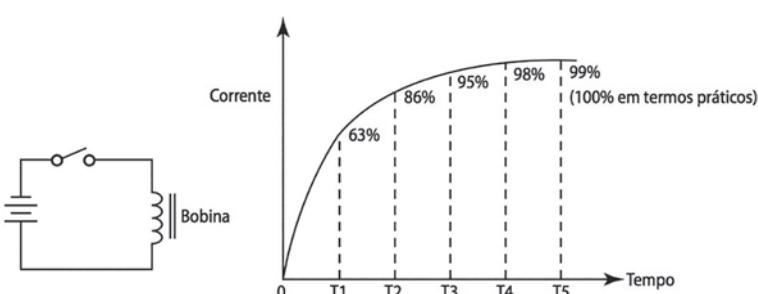
Onde:

$T =$  é a constante de tempo em segundos

$L =$  é a indutância em henries

$R =$  é a resistência em ohms (a resistência está em série com L, sendo a resistência da própria bobina ou uma resistência externa)

Pela constante de tempo medimos o tempo que a corrente demora para variar de, aproximadamente, 63%. Veja na Figura 8 como aplicamos as constantes de tempo quando um circuito CC com um indutor é energizado pela primeira vez. A corrente subirá para cerca de 63% do seu valor final em um intervalo de tempo equivalente a uma constante de tempo depois que a chave é fechada. Esse aumento da corrente perfaz uma curva exponencial e chega ao valor máximo depois de 5 constantes de tempo. Assim como o circuito demora 5 constantes de tempo para atingir o valor máximo quando a chave é fechada, quando a chave é aberta, a corrente no mesmo circuito também levará 5 constantes de tempo para chegar a zero.



**Figura 8.** Indutância mútua.

Fonte: Petruzella (2013, p. 190).

## Reatância indutiva

Em um circuito CC, as únicas variações na corrente acontecem quando o circuito é fechado (para permitir o fluxo de corrente) e quando ele é aberto (para interromper o fluxo de corrente). Já em um circuito CA, a corrente varia constantemente sempre que a tensão alterna. Como a indutância em um circuito se opõe a uma variação na corrente, e a corrente CA está variando constantemente, surge uma oposição do indutor à circulação da corrente CA,

denominada reatância indutiva, que é medida em ohms ( $\Omega$ ) e representada pelo símbolo  $XL$ . O fluxo de corrente na bobina conectada a uma fonte CC é limitado apenas pela resistência do fio da bobina. Já o fluxo de corrente na mesma bobina conectada a uma fonte CA é limitado pela resistência do fio e pela reatância indutiva da bobina.

A reatância indutiva de uma bobina é diretamente proporcional à indutância da bobina, assim, quanto maior é a indutância ( $L$ ), maior é a reatância indutiva ( $XL$ ). A reatância indutiva de uma bobina também é diretamente proporcional à frequência da fonte de alimentação CA. Para uma dada bobina, aumentar a frequência da fonte de tensão eleva a taxa de variação da corrente através da bobina. Por outro lado, isso aumenta a taxa de linhas de força magnética, geradas pela corrente, que cortam a bobina por unidade de tempo, o que acaba aumentando a força contraeletromotriz induzida.

O valor da reatância indutiva em um circuito CA está relacionado aos valores da indutância e da frequência da corrente do circuito. Aumentar a indutância e/ou a frequência elevará a oposição à circulação de corrente. Calculamos a reatância indutiva para circuitos CA (senoidais) com a seguinte fórmula:

$$X_L = 2\pi f L$$

Onde:

$X_L$  = é a reatância indutiva em ohms

$f$  = é a frequência da corrente alternada em hertz

$L$  = é a indutância em henries

$2\pi = 6,28$  (indica  $2\pi$  radianos,  $360^\circ$  ou um ciclo)



## Exemplo

Agora, vamos calcular a reatância indutiva de um indutor de  $5H$  em uma frequência de  $60Hz$ :

Solução:

$$\begin{aligned} X_L &= 2\pi f L \\ &= 2\pi (60Hz) (5 H) \\ &= 6,28 (60) (5) \\ &= 1.884 \Omega \end{aligned}$$

Denominamos um indutor com resistência nula como indutor puro ou ideal. Nessa situação, ele não converte energia elétrica em energia térmica e seu fator de qualidade é infinito. Teoricamente, em circuitos CA com apenas uma indutância pura, o único elemento que limita a corrente é a reatância indutiva. Determinamos a corrente pela lei de Ohm com  $XL$  no lugar de  $R$ , ou seja:

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

A oposição oferecida ao fluxo de corrente pela resistência CC de bobinas CA de relés e solenoides em geral é muito pequena em comparação com o valor da reatância indutiva. Na prática, quando a relação entre a reatância indutiva e a resistência CC é 10 vezes ou mais, desprezamos a resistência do fio.



### Exemplo

Desprezando a resistência do fio, vamos calcular o fluxo de corrente através de uma bobina de 100 mH (0,1 H) conectada a uma fonte CA de 48 V e 60 Hz.

Solução:

$$\begin{aligned} X_L &= 2\pi fL \\ &= 2\pi (60\text{Hz}) (0,1\text{H}) \\ &= 6,28 (60) (0,1) \\ &= 37,7 \Omega \\ I &= \frac{E}{X_L} \\ &= 48\text{V}/37,7\Omega \\ &= 1,27\text{A} \end{aligned}$$

Calculamos a indutância total de um circuito série composto apenas por indutores da mesma forma que a resistência equivalente de um circuito série resistivo: simplesmente somamos todos os valores de indutância (própria). Assim, consideramos que não há interação magnética entre os indutores (a indutância mútua entre eles é nula).

Consideramos os indutores conectados em paralelo também como resistores em paralelo. Há três fórmulas tradicionais para calcular a indutância equivalente

em uma associação paralela de indutâncias: a fórmula para valores iguais de indutância, a fórmula do produto pela soma e a fórmula do recíproco:

$$L_T = L/n \text{ (fórmula para valores iguais)}$$

$$L_T = \frac{L_1 \times L_2}{L_1 + L_2} \text{ (fórmula do produto pela soma)}$$

$$L_T = \frac{1}{\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3}} \text{ (fórmula do recíproco)}$$



### Exemplo

Vamos determinar o fluxo de corrente em um circuito contendo indutâncias de 0,8,

0,4 e 0,3 H conectadas em paralelo com uma fonte CA de 120V e 60 Hz:

Solução:

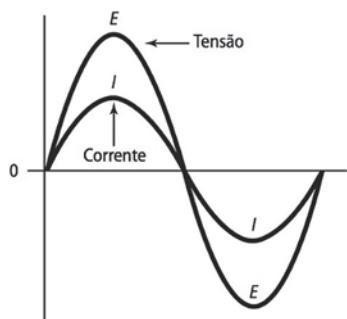
$$\begin{aligned} L_T &= \frac{1}{\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3}} \\ &= \frac{1}{\frac{1}{0,8} + \frac{1}{0,4} + \frac{1}{0,3}} \\ &= 0,14 \text{ H} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X_{L(\text{total})} &= 2\pi f L \\ &= 2\pi (60 \text{ Hz}) (0,14 \text{ H}) \\ &= 6,28 (60) (0,14) \\ &= 52,8 \Omega \end{aligned}$$

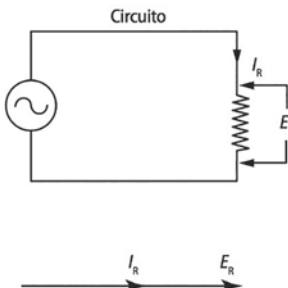
$$\begin{aligned} I_{\text{Total}} &= \frac{E}{X_{L(\text{total})}} \\ &= 120 \text{ V} / 52,8 \Omega \\ &= 2,27 \text{ A} \end{aligned}$$

## Defasamento em um indutor

Em um circuito CA que conta apenas com resistências, a onda senoidal de tensão e a onda senoidal de corrente estão em fase. Ou seja, quando a onda de tensão atinge o seu valor de pico, a corrente também atinge o seu valor de pico (Figura 9). E se a tensão é igual a zero, a corrente é zero, e assim por diante.



Representação das formas de onda

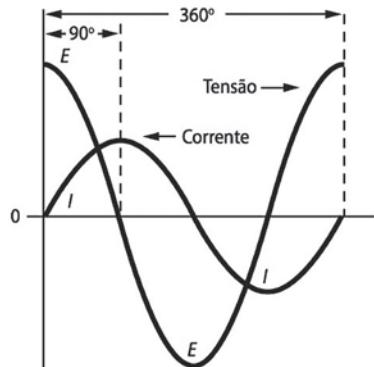


Representação fasorial

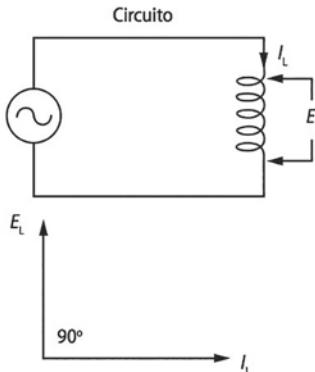
**Figura 9.** Tensão e corrente estão em fase em um circuito CA puramente resistivo.

*Fonte:* Petruzella (2013, p. 138).

Em um circuito CA indutivo, a corrente não consegue se elevar instantaneamente com a fonte de tensão aplicada porque a tensão contrária induzida no indutor (força contraeletromotriz) se contrapõe a tal aumento imediato. Em termos de tempo, em um circuito puramente indutivo a corrente atinge seu pico um pouco mais tarde do que a tensão. Veja na Figura 10 essa relação de fase.



Representação das formas de onda



Representação fasorial

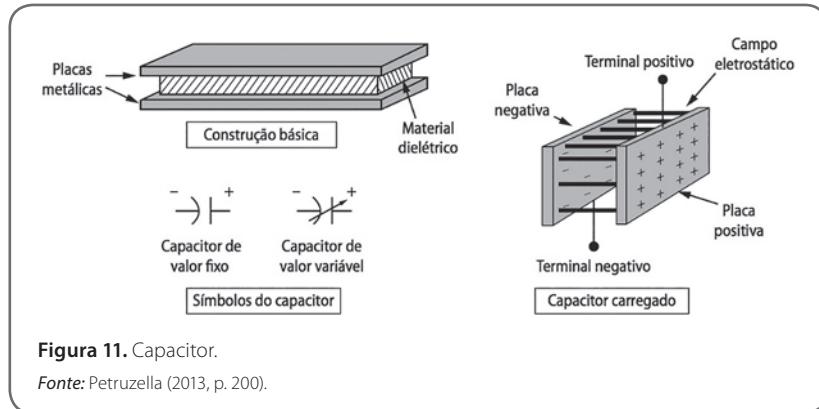
**Figura 10.** A corrente está atrasada da tensão em  $90^\circ$  em um circuito puramente indutivo.

*Fonte:* Petruzella (2013, p. 194).

Como vemos, os picos de corrente se verificam um quarto de ciclo depois dos picos de tensão porque a corrente alternada gera uma tensão autoinduzida entre os terminais do indutor que está 90º defasada da corrente que circula por ele. Assim, a corrente está atrasada da tensão em 90º.

## Capacitância

Definimos capacidade ( $C$ ) como a capacidade de um circuito elétrico ou componente de armazenar energia na forma de um campo eletrostático. Um capacitor é formado por duas placas metálicas (condutoras) colocadas próximas uma da outra e separadas por um material isolante denominado dielétrico (Figura 11). O dielétrico pode ser o ar ou qualquer outro material não condutor, como papel, mica ou cerâmica.

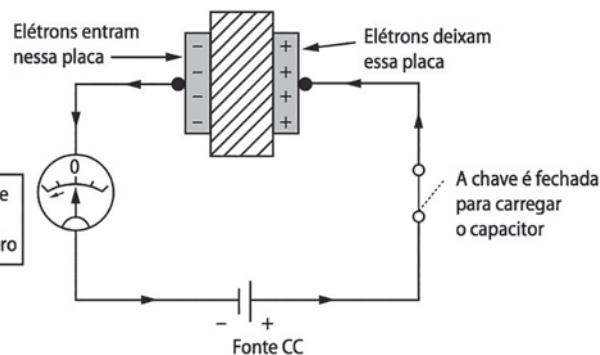


**Figura 11.** Capacitor.

Fonte: Petruzella (2013, p. 200).

O funcionamento de um capacitor está relacionado ao campo eletrostático gerado entre as duas placas paralelas carregadas com cargas opostas. Dizemos que o capacitor está carregado quando ele tem uma diferença de potencial ou

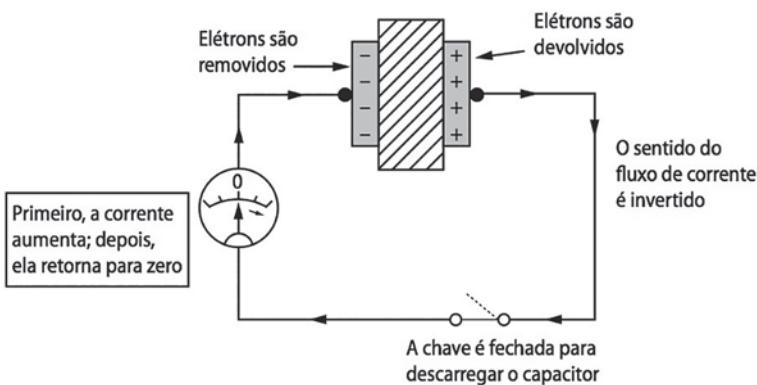
uma tensão entre as placas. Carregamos um capacitor ao conectar suas duas placas a uma fonte de tensão CC (Figura 12).



**Figura 12.** Circuito de carregamento do capacitor.

Fonte: Petruzella (2013, p. 201).

O terminal positivo da fonte de tensão atrai elétrons da placa conectada a ele, enquanto o terminal negativo da fonte repele um número igual de elétrons para a outra placa. Esse fluxo de cargas segue até que a tensão entre as placas carregadas se iguale à tensão aplicada. Note que não há fluxo de cargas através do dielétrico. As cargas são simplesmente removidas de uma placa e depositadas sobre a outra placa através do circuito que as liga. Uma placa ( $-$ ) termina com um excesso de elétrons, e a outra, com uma falta de elétrons ( $+$ ). Devido ao dielétrico (isolação) entre as duas placas, as cargas não conseguem fluir internamente de uma placa para a outra. No entanto, há linhas de força elétricas entre as placas. Denominado essa força como **campo eletrostático**. Depois de carregado, desconectamos o capacitor da fonte de tensão e a energia ficará armazenada no campo eletrostático entre as placas. Para descarregar um capacitor carregado, ligamos os dois terminais das placas carregadas entre si, conforme mostrado na Figura 13.



**Figura 13.** Circuito de descarregamento do capacitor.

*Fonte:* Petruzella (2013, p. 201).

Agora o fluxo de corrente é no sentido oposto, e as cargas passam da placa carregada positivamente para a placa carregada negativamente (corrente convencional). A corrente flui durante um curto intervalo de tempo suficiente para que o capacitor descarregue sua carga.

Os capacitores são utilizados em eletricidade para a correção do fator de potência de sistemas elétricos, para a melhoria do torque em motores, para filtros em circuitos CA e para a temporização de circuitos de controle.

### Especificações, conexões e tipos de capacitores

Uma medida da capacidade de um capacitor é a carga que ele consegue armazenar para uma dada tensão aplicada. A unidade básica de medida da capacidade é o farad (F). Um capacitor possui uma capacidade de um farad ao armazenar uma carga de um coulomb (1 C) quando uma tensão de um volt (1 V) é aplicada entre os seus terminais.



## Saiba mais

Como o farad é uma unidade muito grande de capacitância, ele não é muito utilizado para aplicações práticas. Assim, preferimos unidades menores, como o microfarad ( $\mu\text{F}$ ), que equivale a  $10^{-6}$  farads; o nanofarad (nF), que equivale a  $10^{-9}$  farads; e o picofarad (pF), que equivale a  $10^{-12}$  farads.

Quando conectamos os capacitores em paralelo, aumentamos a área efetiva das placas. Como a capacitância é proporcional à área das placas, também aumentamos a capacitância. Assim, conectamos os capacitores em paralelo para conseguir uma capacitância total maior que a disponível em um só capacitor.

Conectamos os capacitores em série para que o grupo consiga suportar uma tensão mais elevada do que seria possível com qualquer capacitor individual. Nessas situações, a tensão nominal equivale à soma das tensões nominais de cada capacitor. Esse aumento ocorre à custa de uma redução da capacitância total, pois a conexão em série de capacitores aumenta a distância entre as placas, reduzindo, assim, a capacitância total do circuito.

## Reatância capacitiva

Em um capacitor, só há fluxo de corrente durante o intervalo de tempo em que o capacitor está carregando ou descarregando. Quando a chave é inicialmente fechada, a corrente flui para o capacitor para carregá-lo. Depois de completamente carregado, a tensão do capacitor será igual à da fonte, impedindo qualquer fluxo adicional de corrente pelo circuito. Assim, não há tensão entre os terminais da carga. Com efeito, o capacitor nessa aplicação (uma vez carregado) fornece bloqueio ou isolamento CC entre a fonte e a carga.

Quando ligamos um capacitor a um circuito CA, o sinal das cargas sobre as placas se inverte a cada variação da polaridade da tensão aplicada. As placas, então, são carregadas e descarregadas alternadamente, resultando em um fluxo constante de corrente CA. Mais uma vez, as cargas fluem para dentro e para fora das placas por meio do circuito externo. O circuito de corrente parece passar (porque ele não passa) através do dielétrico. Por esse motivo algumas vezes dizemos que os capacitores passam CA e bloqueiam CC.

Os capacitores, tal como os indutores, se opõem ao fluxo de corrente em um circuito CA. Capacitores de valores diferentes também oferecem quantidades diferentes de oposição. Denominamos **reatância capacitiva** a oposição ao fluxo de corrente alternada oferecida por um capacitor, sendo medida em ohms e representada pelo símbolo  $X_c$ . A reatância capacitiva de um capacitor é inversamente proporcional à capacidade do capacitor, isto é, quanto maior for a capacidade ( $C$ ) do capacitor, menor será a sua reatância capacitativa ( $X_c$ ) ou a sua oposição ao fluxo de corrente CA.

Para um dado capacitor, aumentará a frequência da fonte de tensão elevará a taxa em que o capacitor carrega e descarrega, resultando em uma menor reatância capacitativa e em um maior fluxo de corrente CA (PETRUZELLA, 2013):

Calculamos a reatância capacitiva de um capacitor pela fórmula:

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C}$$

Onde:

$X_c$  = é a reatância capacitiva em ohms ( $\Omega$ )

$f$  = é a frequência em hertz (Hz)

$C$  = é a capacidade em farads (F)

Nos circuitos CA que contam apenas com capacidade, o único elemento que limita a corrente é a reatância capacitativa, que então substituirá a resistência na equação da lei de Ohm:

$I = E / R$  (circuito CA puramente resistivo)

$I = E / X_c$  (circuito CA puramente capacitivo)



## Exemplo

Suponha que um capacitor de  $100\text{ }\mu\text{F}$  é conectado a uma fonte de  $120\text{ V}$  e  $60\text{ Hz}$ . Vamos:

- (a) Determinar a reatância capacitiva do capacitor.
- (b) Encontrar o valor da corrente fluindo pelo circuito.

Solução:

$$\begin{aligned} X_c &= \frac{1}{2\pi f C} \\ &= \frac{1}{2 \times 3,14 \times 60 \times (100 \times 10^{-6})} \\ &= 26,5\text{ }\Omega \\ I &= E/X_c \\ &= 120\text{ V}/26,5\text{ }\Omega \\ &= 4,53\text{ A} \end{aligned}$$



## Exercícios

1. A capacidade de um circuito ou componente elétrico se opor a qualquer variação do fluxo de corrente é denominada:
  - a) Capacitância.
  - b) Resistência.
  - c) Indutância.
  - d) Impedância.
  - e) Potência.
2. Em uma frequência de 60 Hertz, qual é a reatância indutiva  $XL$  de um indutor de 5 H?
  - a) 1440 Ohms.
  - b) 1884 Ohms.
  - c) 1989 Ohms.
  - d) 2224 Ohms.
  - e) 2886 Ohms.
3. Considerando os valores da questão anterior, para uma frequência de 60 Hertz, indutância de 5 H e em uma tensão alternada de 48 Volts, calcule o fluxo de corrente através da bobina.
  - a) 25,4 Ampères.
  - b) 2,54 Ampères.
4. A capacidade de um componente ou circuito elétrico de armazenar energia na forma de campo eletrostático, armazenando cargas e liberando em um momento posterior, é denominada:
  - a) Capacitância.
  - b) Indutância.
  - c) Resistência.
  - d) Impedância.
  - e) Potência.
5. Um capacitor de 10 microfarads é conectado a uma fonte de 100 Volts e frequência de 60 Hertz. Determine a reatância capacitativa do capacitor, e o valor da corrente fluindo pelo circuito.
  - a) 26,5 Ohms e 3,77 Ampères.
  - b) 2,65 Ohms e 37,7 Ampères.
  - c) 265,25 Ohms e 0,377 Ampères.
  - d) 2652,5 Ohms e 37,7 Ampères.
  - e) 265,25 Ohms e 3,77 Ampères.



## Referências

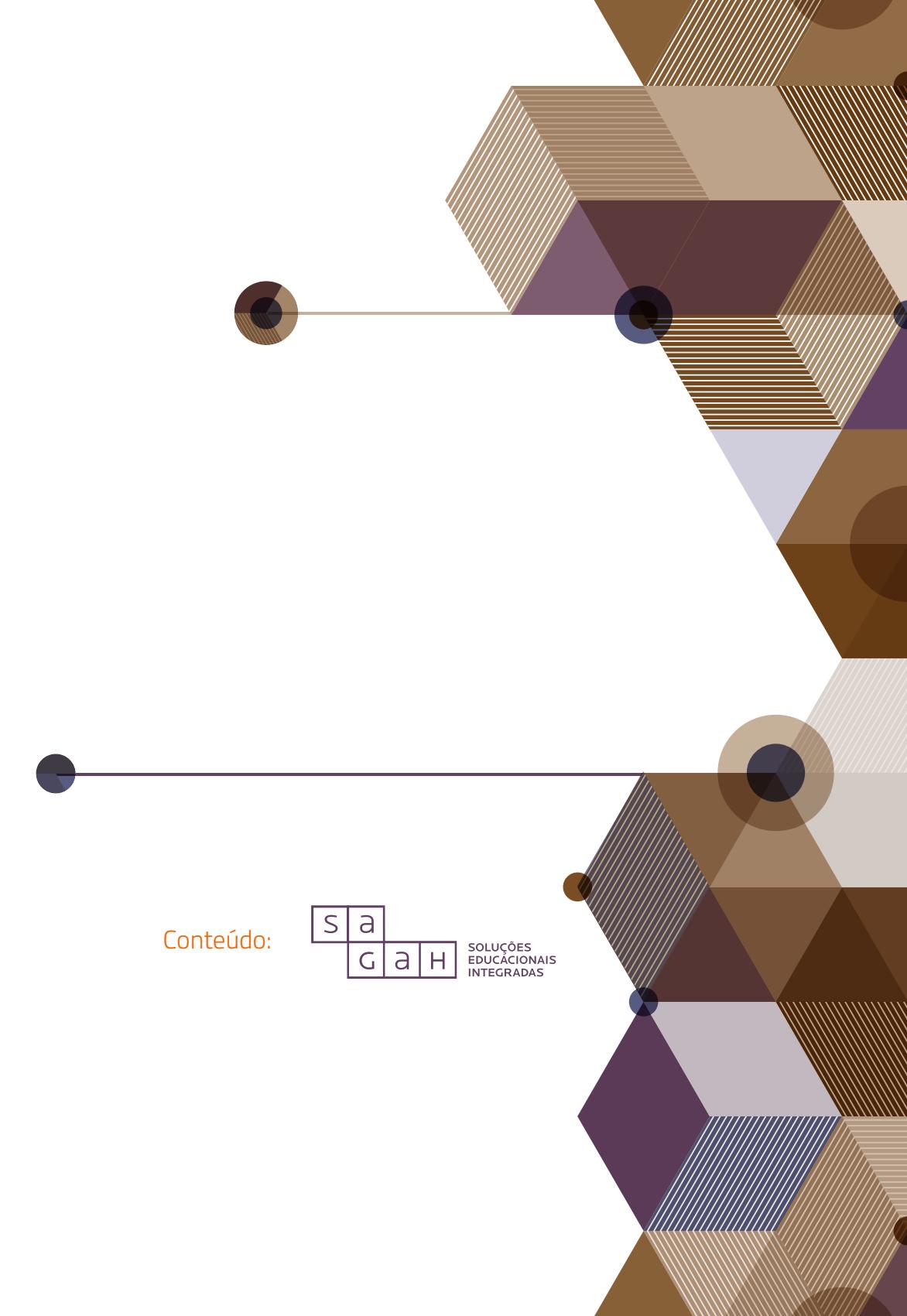
PETRUZELLA, F. D. *Eletrotécnica I*. Porto Alegre: AMGH, 2013. (Série Tekne).

PETRUZELLA, F. D. *Motores elétricos eacionamentos*. Porto Alegre: AMGH, 2013. (Série Tekne).

## Leitura recomendada

GUSSOW, M. *Eletrociadade básica*. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009. (Coleção Schaum).

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



## DICA DO PROFESSOR

Indutores e capacitores têm comportamentos de corrente defasadas em relação à tensão. Cada uma dessas propriedades se comporta de maneira diferente. Depende, também, se o circuito é série ou paralelo. A resistência se opõe à circulação de corrente, a indutância se opõe a qualquer variação da corrente, enquanto a capacidade se opõe a qualquer variação de tensão. Os capacitores e indutores apresentam reatância, que é uma resistência à passagem da corrente elétrica, no caso, reatância capacitiva e indutiva.

**Vamos acompanhar mais detalhes no vídeo.**

Conteúdo interativo disponível na plataforma de ensino!



## EXERCÍCIOS

- 1) A capacidade de um circuito ou componente elétrico se opor a qualquer variação do fluxo de corrente é denominada:
  - A) Capacitância.
  - B) Resistência.
  - C) Indutância.
  - D) Impedância.
  - E) Potência.
  
- 2) Em uma frequência de 60 Hertz, qual a reatância indutiva  $XL$  de um indutor de 5 H?

- A) 1440 Ohms.
- B) 1884 Ohms.
- C) 1989 Ohms.
- D) 2224 Ohms.
- E) 2886 Ohms.
- 3) Considerando os valores da questão anterior, para uma frequência de 60 Hertz, indutância de 5 H e em uma tensão alternada de 48 Volts, calcule o fluxo de corrente através da bobina.
- A) 25,4 Amperes.
- B) 2,54 Amperes.
- C) 0,254 Amperes.
- D) 25,4 miliamperes.
- E) 2,54 miliamperes.
- 4) A capacidade de um componente ou circuito elétrico de armazenar energia na forma de campo eletrostático, armazenando cargas e liberando em um momento posterior, é:
- A) Capacitância.

- B) Indutância.
- C) Resistência.
- D) Impedância.
- E) Potência.
- 5) Um capacitor de 10 microfarads é conectado a uma fonte de 100 Volts e frequência de 60 Hertz. Determine a reatância capacitiva do capacitor, e o valor da corrente fluindo pelo circuito.
- A) 26,5 Ohms e 3,77 Amperes.
- B) 2,65 Ohms e 37,7 Amperes.
- C) 265,25 Ohms e 0,377 Amperes.
- D) 2652,5 Ohms e 37,7 Amperes.
- E) 265,25 Ohms e 3,77 Amperes.



## NA PRÁTICA

**Capacitores e indutores são componentes eletrônicos muito importantes.**

Veja:



Os capacitores são utilizados como filtros em fontes de alimentação, reduzindo a ondulação da corrente contínua pulsante (ripple), e por função, armazenar energia para reposição posterior no circuito. Capacitores também têm uma constante de tempo, que serve para temporizações em circuitos eletrônicos (timers).

Capacitores e indutores também são utilizados em filtros, tipo passa-baixa, passa-faixa, passa-alta, rejeita-faixa. Outro uso muito frequente são os filtros de linha, para filtrar os ruidos elétricos da alimentação de energia em corrente alternada. Ruidos elétricos são em alta frequência, portanto, um filtro passa-baixa.



## SAIBA MAIS

Para ampliar o seu conhecimento a respeito desse assunto, veja abaixo as sugestões do professor:

### Capacitância

Conteúdo interativo disponível na plataforma de ensino!

### Explicação - Para que serve um mega capacitor no som automotivo?

Conteúdo interativo disponível na plataforma de ensino!

### Mini aula sobre Indutância

Conteúdo interativo disponível na plataforma de ensino!

### O que é reatância capacitiva

Conteúdo interativo disponível na plataforma de ensino!

# Indutância e Capacitância. Circuitos RLC série II



## APRESENTAÇÃO

Nesta unidade, estudaremos indutância e capacitância. Circuitos RLC série parte II. Determinaremos valores de grandezas desconhecidas em um circuito RLC série.

Bons estudos.

**Ao final desta Unidade de Aprendizagem, você deve apresentar os seguintes aprendizados:**

- Identificar circuitos série e paralelo RC, RL, LC, RLC e os efeitos das correntes e tensões.
- Diferenciar circuitos série e paralelo ressonantes e filtros: passa baixa (filtro de linha), passa faixa (sintonia).
- Expressar os conceitos de correção de fator de potência para cargas indutivas com banco de capacitores.



## DESAFIO

Explore o conteúdo, pesquise. Use todas as ferramentas disponíveis para solucionar o problema.

Vamos ao experimento!

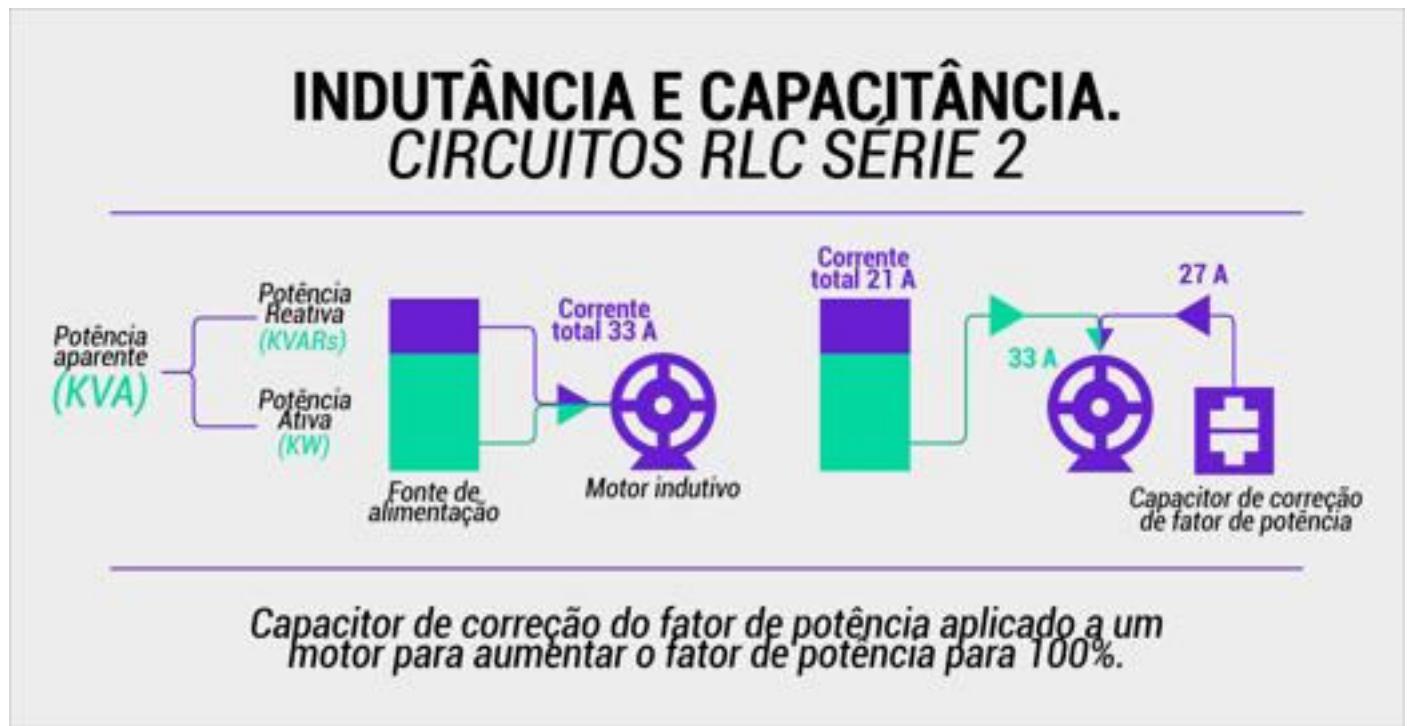
Você necessita fazer a correção do fator de potência de um motor WEG de alto rendimento, trifásico 220/380 Volts, 5 CV, com fator de potência de placa de 0,85. O novo fator de potência com a correção com capacitores deve ser 0,95. Qual o valor em KVAR dos capacitores trifásicos para colocar em paralelo com a carga indutiva?

Você pode utilizar os manuais, buscando no site do fabricante, ou fazer os cálculos sugeridos pelos vídeo do Youtube que estão no Saiba +.



## INFOGRÁFICO

O infográfico a seguir mostra como um capacitor de correção de fator de potência é aplicado a um motor de indução como meio de reduzir a componente indutiva da corrente total e, assim, reduzir as perdas na linha de alimentação. Neste exemplo, o capacitor foi dimensionado para obter um fator de potência de 1 ou 100%.



## CONTEÚDO DO LIVRO

Leia o capítulo Indutância e Capacitância. Circuitos RLC Série II que faz parte da obra *Eletrotécnica* e é a base teórica desta Unidade de Aprendizagem.

Boa leitura.

# ELETROTÉCNICA

Rodrigo Rodrigues



S719e Souza, Diogo Braga da Costa.  
Eletrotécnica [recurso eletrônico] / Diogo Braga da Costa Souza, Rodrigo Rodrigues. – Porto Alegre : SAGAH, 2017.

Editado como livro em 2017.  
ISBN 978-85-9502-055-9

1. Eletrotécnica. 2. Engenharia elétrica. I. Rodrigues, Rodrigo. II. Título.

CDU 621.3

# Indutância e capacidade: Circuitos RLC série II

## Objetivos de aprendizagem

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

- Identificar circuitos série e paralelo RC, RL, LC, RLC e os efeitos das correntes e tensões.
- Diferenciar circuitos série e paralelo ressonantes e filtros: passa-baixas (filtro de linha), passa-faixa (sintonia).
- Expressar os conceitos de correção de fator de potência para cargas indutivas com banco de capacitores.

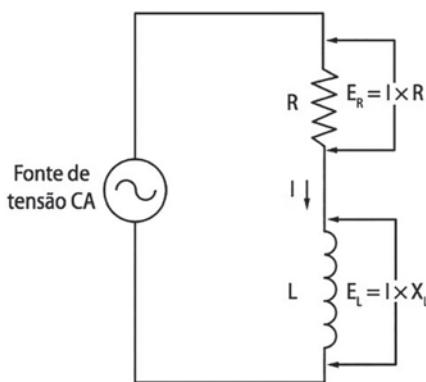
## Introdução

Neste texto, você vai estudar a indutância e a capacidade aplicadas aos circuitos RLC série. Você vai ter a oportunidade de trabalhar com exemplos a fim de determinar os valores de grandezas desconhecidas em um circuito RLC série. Além disso, vai conhecer as aplicações e o princípio de funcionamento dos filtros passa-baixas, passa-altas, passa-faixa e rejeita-faixa.

## Circuitos RL série

A resistência, a indutância e a capacidade são as três propriedades básicas de circuitos aplicadas para controlar as tensões e as correntes nos circuitos elétricos CA.

Nos circuitos de corrente alternada, muitas vezes a carga é uma combinação de resistência e de indutância, ou seja, o circuito já não pode mais ser tratado como puramente resistivo ou puramente indutivo. O circuito RL série é a combinação de um resistor e de um indutor puro ou ideal ligados em série com uma fonte CA. Veja na Figura 1 um resistor e um indutor puro ou ideal ligados em série com uma fonte de tensão CA.



**Figura 1.** Circuito RL série.

*Fonte:* Petruzella (2013, p. 245).

O fluxo de corrente no circuito promove quedas de tensão através do indutor e do resistor. Essas tensões são proporcionais à corrente no circuito e aos valores individuais de resistência e reatância indutiva. Expressamos a tensão no resistor ( $E_R$ ) e a tensão no indutor ( $E_L$ ) seguindo a lei de Ohm como:

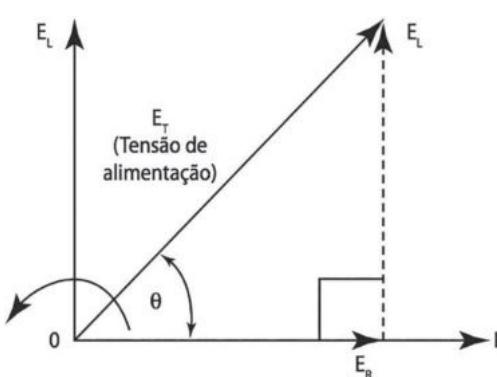
$$E_R = I \cdot R$$

$$E_L = I \cdot X_L$$

A impedância é a oposição total ao fluxo de corrente em qualquer circuito CA. Em um circuito RL, essa oposição total se deve a uma combinação de resistência ( $R$ ) e reatância indutiva ( $X_L$ ). A impedância tem  $Z$  como símbolo e é medida em ohms, assim como a resistência e a reatância. Pela lei de Ohm, temos que a impedância de um circuito resultará da divisão da tensão de alimentação total pela corrente do circuito:

$$Z = \frac{E_T}{I}$$

Assim como em qualquer circuito série, a corrente será a mesma por todo o circuito. Veja na Figura 2 um diagrama fasorial com as relações entre a corrente e as tensões em um circuito RL série. O “fasor de referência”, representado pela letra  $I$ , indica a corrente no circuito, que é comum a todos os seus elementos.



**Figura 2.** Diagrama fasorial de um circuito RL série.

Fonte: Petruzella (2013, p. 245).

Conforme Petruzella (2013), como a tensão através do resistor está em fase com a corrente do circuito, o fator de tensão  $E_R$  é mostrado sobreposto ao fator de tensão no indutor  $E_L$  está adiantado em  $90^\circ$  da corrente e é desenhado, portanto,  $90^\circ$  à frente do fator de corrente. Lembre-se de que admitimos que cada um dos fatores no diagrama está girando no sentido anti-horário em torno da origem (0). Com esse sentido anti-horário de rotação, constatamos que o fator da tensão no indutor está à frente, ou adiantado, do fator de corrente. A tensão total de alimentação ( $E_T$ ) é o fator que obtemos quando somamos os fatores de tensão do resistor e do indutor:

$$E_T = \sqrt{E_R^2 + E_L^2}$$

O desfasamento entre a tensão aplicada e a corrente está entre 0 e  $90^\circ$ . Por causa do desfasamento introduzido pelo indutor, não conseguimos obter a impedância de um circuito RL série apenas somando os valores de resistência e de reatância indutiva. Obtemos a impedância total de um circuito RL série, como ocorre com sua tensão total, a partir do chamado **triângulo de impedância** (veja a Figura 3).

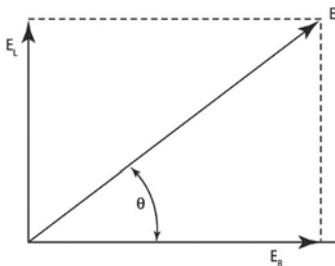
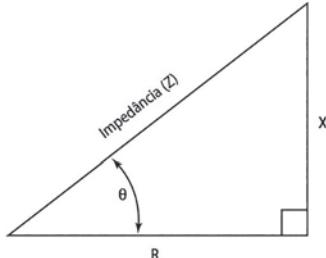


Diagrama vetorial do circuito



Triângulo de impedância

**Figura 3.** O diagrama de impedância é geometricamente similar ao diagrama fasorial do circuito.

**Fonte:** Petruzella (2013, p. 246).

Observe a semelhança geométrica entre o triângulo de impedância e o diagrama fasorial do circuito. Assim, o triângulo de impedância terá o mesmo ângulo de fase theta ( $\theta$ ), pois as quedas de tensão no resistor e no indutor ocorrem devido ao fluxo de corrente no circuito e às respectivas oposições oferecidas por esses elementos (resistência, para o resistor, e reatância, para o indutor). Considerando que o fluxo de corrente para cada componente é o mesmo (circuito série), as quedas de tensão são diretamente proporcionais às oposições oferecidas por esses componentes. O triângulo de impedância é um triângulo retângulo, logo, a impedância será a raiz quadrada da soma dos quadrados dos valores ôhmicos de resistência e reatância indutiva:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$$



## Exemplo

Considerando um circuito CA RL série, constituído de um resistor que tem uma resistência de  $150\ \Omega$  e um indutor que tem reatância indutiva de  $100\ \Omega$ , vamos calcular a impedância e o ângulo de fase theta ( $\theta$ ) do circuito.

Solução:

$$\begin{aligned}
 Z &= \sqrt{R^2 + X_L^2} & 0 = \operatorname{tg}^{-1} \frac{X_L}{R} & Z = R + jX_L \\
 &= \sqrt{150^2 + 100^2} & = \operatorname{tg}^{-1} \frac{100}{150} & = 150 + j100 \\
 &= \sqrt{22.500 + 10.000} & = \operatorname{tg}^{-1} \frac{100}{150} & = 180\ \Omega \angle 33,7^\circ \\
 &= \sqrt{32.500} & = \operatorname{tg}^{-1} (0,667) & \\
 &= 180\ \Omega & = 33,7^\circ
 \end{aligned}$$

A partir desses resultados, temos então que o circuito possui uma impedância total de  $180\ \Omega$  e um ângulo de  $33,7^\circ$  (em relação à corrente do circuito – fasor de referência). Depois de determinar a impedância de um circuito, conseguimos calcular a corrente por meio da lei de Ohm, substituindo “R” por “Z”, conforme a seguir:

$$I = \frac{E_T}{Z}$$

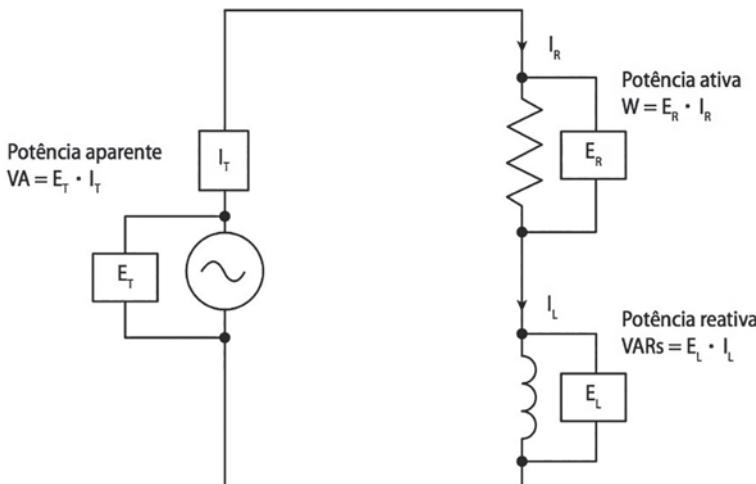
A corrente é a mesma ao longo de todo o circuito série, assim, conseguimos calcular as quedas de tensão individuais no indutor e no resistor utilizando a lei de Ohm, da seguinte maneira:

$$\begin{aligned}
 E_R &= I \cdot R \\
 E_L &= I \cdot X_L
 \end{aligned}$$

Lembre que, em um circuito puramente resistivo, a tensão e a corrente estão em fase, e calculamos a potência verdadeira ou ativa multiplicando a tensão pela corrente ( $P = E_R \cdot I_R$ ). Além disso, para uma carga puramente indutiva, a tensão e a corrente estão defasadas em  $90^\circ$ , a potência ativa é zero e calculamos a potência reativa (VARs) multiplicando a tensão no indutor pela corrente que circula por ele ( $\text{VARs} = E_L \cdot I_L$ ).

O defasamento entre a tensão aplicada e a corrente está entre 0 e 90º no circuito RL série.

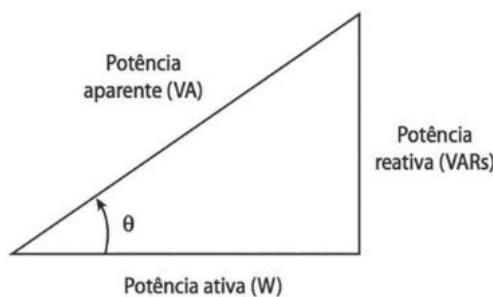
Denominamos como potência aparente ou Volt-Ampères (VA) a potência total do circuito, e, para obtê-la, basta multiplicarmos a tensão aplicada pela corrente do circuito ( $VA = E_T \cdot I_T$ ). Veja na Figura 4 as várias componentes de potência associadas ao circuito RL série.



**Figura 4.** As várias componentes de potência associadas a um circuito RL série.

Fonte: Petruzella (2013, p. 249).

Você vai ver a relação entre as várias componentes de potência de um circuito RL série no triângulo de potência da Figura 5. Nele, o comprimento da hipotenusa do triângulo retângulo é a potência aparente, o ângulo theta ( $\theta$ ) indica a diferença de fase, o cateto adjacente a  $\theta$  é a potência verdadeira ou ativa, e o cateto oposto a  $\theta$  é a potência reativa. Note a semelhança geométrica entre o triângulo de potência, o triângulo de impedância e o diagrama fasorial do circuito RL série.



**Figura 5.** Triângulo de potência de um circuito RL série.

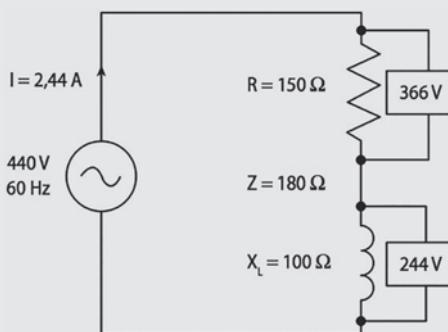
Fonte: Petruzella (2013, p. 249).



## Exemplo

Para o circuito RL da figura a seguir, vamos determinar:

1. a potência ativa
2. a potência reativa induitiva
3. a potência aparente



Fonte: Petruzella (2013, p. 250).

Solução:

$$\begin{aligned} \text{a) potência ativa} &= E_R + I_R \\ &= 366 \text{ V} \cdot 2,44 \text{ A} \\ &= 893 \text{ W} \end{aligned}$$

ou

$$\begin{aligned} \text{potência ativa} &= I^2 \cdot R \\ &= 2,44 \cdot 2,44 \cdot 150 \\ &= 893 \text{ W} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{b) potência reativa indutiva} &= E_L \cdot I_L \\ &= 2,44 \text{ V} \cdot 2,44 \cdot \text{A} \\ &= 595 \text{ VARs} \end{aligned}$$

ou

$$\begin{aligned} \text{potência reativa indutiva} &= I^2 \cdot X_L \\ &= 2,44 \cdot 2,44 \cdot 100 \\ &= 595 \text{ VARs} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{c) potência aparente} &= E_T \cdot I_T \\ &= 440 \text{ V} \cdot 2,44 \text{ A} \\ &= 1.074 \text{ VA} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ou potência aparente} &= I^2 \cdot Z \\ &= 2,44 \cdot 2,44 \cdot 180 \\ &= 1.072 \text{ VA} \end{aligned}$$

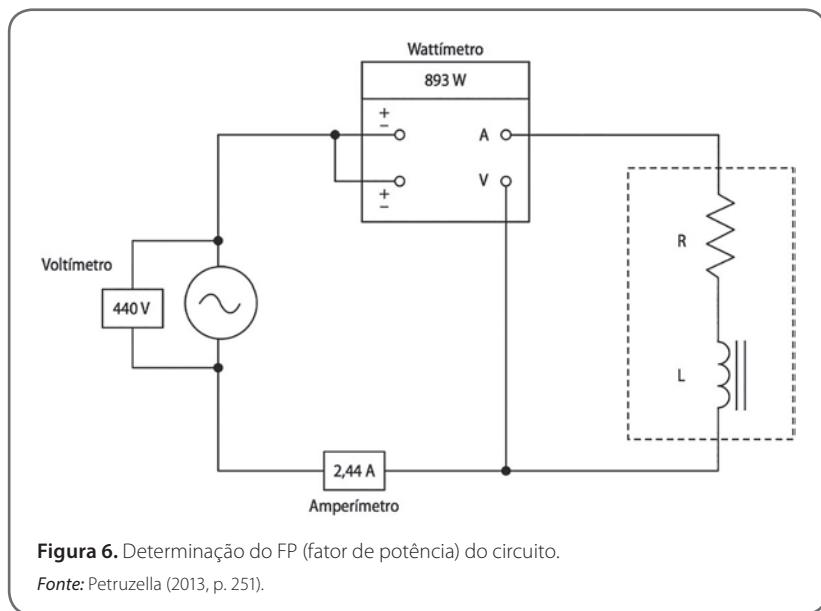
$$\begin{aligned} \text{ou potência aparente} &= \sqrt{\text{Watts}^2 + \text{VARs}^2} \\ &= \sqrt{893^2 + 595^2} \\ &= 1.073 \text{ VA} \end{aligned}$$

Em qualquer circuito CA, para determinar o “fator de potência” (FP), basta dividirmos a potência verdadeira (também denominada potência real ou potência ativa) pela potência aparente (PETRUZELLA, 2013):

$$\text{FP} = \frac{\text{Watts(W)}}{\text{Volt-Ampères (VA)}} = \frac{\text{Potência}}{\text{Potência aparente}} = \cos \theta$$

O fator de potência varia de zero até 1. Às vezes ele é expresso como uma porcentagem, assim, consideramos que um FP de 0% sinaliza uma carga puramente reativa, enquanto um FP de 100% indica uma carga puramente resistiva. Para circuitos que contêm tanto resistência quanto reatância indutiva, dizemos que o fator de potência está atrasado (a corrente está atrasada) e possui valor numérico entre 0 e 1. O fator de potência do circuito representa a porção da potência aparente que de fato é usada como potência ativa; um FP alto

mostra que uma porcentagem alta da potência aparente é potência ativa. Para muitas aplicações práticas, determinamos o fator de potência de um circuito medindo a tensão total do circuito, da corrente e da potência, como mostrado no circuito da Figura 6.



**Figura 6.** Determinação do FP (fator de potência) do circuito.

Fonte: Petruzella (2013, p. 251).

Calculamos o fator de potência dividindo a leitura do wattímetro pelo produto das leituras do voltímetro e do amperímetro, da seguinte maneira:

$$\begin{aligned} \text{FP} &= \frac{\text{Watts}(W)}{\text{Volt-Ampéres (VA)}} \\ &= \frac{893 \text{ W}}{2,44 \text{ A} \times 440 \text{ V}} \\ &= 0,832 \\ &= 82,3\% \text{ (atrasado)} \end{aligned}$$

Lembre-se: o fator de potência é um grande indicador das quantidades relativas de resistência e reatância de um dado circuito.



### Fique atento

Para circuitos que contêm tanto resistência quanto reatância indutiva, dizemos que o fator de potência está atrasado e tem um valor entre 0 e 1. Quanto maior for o fator de potência (mais próximo de 1), mais resistivo é o circuito; quanto menor for o fator de potência (mais próximo de 0), mais reativo é o circuito.

Veja que o fator de potência não é uma medida angular, mas uma razão numérica com valor entre 0 e 1. Quando o ângulo de fase entre a tensão da fonte e a corrente aumenta, o fator de potência diminui, o que aponta um circuito cada vez mais reativo.

Você pode utilizar qualquer uma das equações a seguir para calcular o fator de potência de um circuito RL série:

$$FP = \cos \theta$$

$$FP = \frac{E_R}{E_T}$$

$$FP = \frac{R}{Z}$$

$$FP = \frac{W}{VA}$$

Utilizar uma tabela para ajudar a organizar os passos adotados na resolução de um problema é um método muito útil de resolução de circuitos. Preencha a tabela com todos os valores dados e calculados à medida que eles vão sendo determinados.

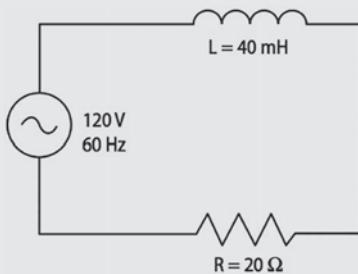


### Exemplo

Para o circuito RL série da figura abaixo, vamos determinar:

- a) reativa indutiva  $X_L$
- b) a impedância  $Z$
- c) a corrente  $I$

- d) a queda de tensão pelo resistor  $E_R$  e do indutor  $E_L$   
 e) o ângulo theta ( $\theta$ ) e o fator de potência FP para o circuito  
 e) a potência ativa (W), a potência reativa (VARs) e a potência aparente (VA)



*Fonte:* Petruzella (2013, p. 252).

Solução:

Passo 1: elabore uma tabela com todos os valores conhecidos:

	<b>E</b>	<b>I</b>	<b>L</b>	<b>R/ XL/Z</b>	<b>W/VA/ VARs</b>	<b>&lt;θ</b>	<b>FP</b>
R				$20\Omega$		$0^\circ$	
L			$40 \text{ mH}$			$90^\circ$	
total	120V						

Passo 2: calcule o XL e coloque o valor na tabela.

$$\begin{aligned} X_L &= 2\pi f L \\ &= 2 \times 3,14 \times 60 \times 0,04 \\ &= 15,1 \Omega \end{aligned}$$

	<b>E</b>	<b>I</b>	<b>L</b>	<b>R/ XL/Z</b>	<b>W/VA/ VARs</b>	<b>&lt;θ</b>	<b>FP</b>
R				$20\Omega$		$0^\circ$	
L			$40 \text{ mH}$	$15,1 \Omega$		$90^\circ$	
total	120V						

Passo 3: em seguida, calcule Z e coloque o valor na tabela.

$$\begin{aligned}Z &= \sqrt{R^2 + X_L^2} \\&= \sqrt{20^2 + 15,1^2} \\&= \sqrt{400 + 228} \\&= 25,1 \Omega\end{aligned}$$

	<b>E</b>	<b>I</b>	<b>L</b>	<b>R/ XL/Z</b>	<b>W/VA/ VARs</b>	<b>&lt; θ</b>	<b>FP</b>
R				20Ω		0°	
L			40 mH	15,1 Ω		90°	
total	120V			25,1 Ω			

Passo 4: calcule  $I_T$ ,  $I_R$  e  $I_L$  e coloque os valores na tabela.

$$\begin{aligned}I_T &= E_T/Z \\&= 120/25,1 \\&= 4,78 \text{ A} \\I_T &= I_R = I_L = 4,78 \text{ A}\end{aligned}$$

	<b>E</b>	<b>I</b>	<b>L</b>	<b>R/ XL/Z</b>	<b>W/VA/ VARs</b>	<b>&lt; θ</b>	<b>FP</b>
R		4,78 A		20Ω		0°	
L		4,78 A	40 mH	15,1 Ω		90°	
total	120V	4,78 A		25,1 Ω			

Passo 5: calcule  $E_R$  e  $E_L$  e coloque os valores na tabela.

$$\begin{aligned}E_R &= I \cdot R \\&= 4,78 \cdot 20 \\&= 95,6 \text{ V} \\E_L &= I \cdot X_L \\&= 4,78 \cdot 15,1 \\&= 72,2 \text{ V}\end{aligned}$$

	<b>E</b>	<b>I</b>	<b>L</b>	<b>R/ XL/Z</b>	<b>W/VA/ VARs</b>	<b>&lt;θ</b>	<b>FP</b>
R	95,6V	4,78 A		20Ω		0°	
L	72,2V	4,78 A	40 mH	15,1 Ω		90°	
total	120V	4,78 A		25,1 Ω			

Passo 6: calcule o ângulo  $\theta$  e o FP para o circuito e coloque os valores na tabela.

$$\begin{aligned} \text{Cosseno } \theta &= R/Z \\ &= 20/25,1 \\ &= 0,797 \end{aligned}$$

$$\text{Ângulo } \theta = 37,1^\circ$$

$$\begin{aligned} \text{Fator de potência} &= \cos \theta \\ &= 0,797 \text{ ou } 79,7\% \text{ atrasado} \end{aligned}$$

	<b>E</b>	<b>I</b>	<b>L</b>	<b>R/ XL/Z</b>	<b>W/VA/ VARs</b>	<b>&lt;θ</b>	<b>FP</b>
R	95,6V	4,78 A		20Ω		0°	
L	72,2V	4,78 A	40 mH	15,1 Ω		90°	
total	120V	4,78 A		25,1 Ω			97,7%

Passo 7: Calcule W, VARs e VA para o circuito e coloque os valores na tabela.

$$\begin{aligned} W &= I^2 \cdot R \\ &= 4,78 \cdot 4,78 \cdot 20 \\ &= 457 \text{ Watts} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} VARs &= E_L \cdot I \\ &= 72,2 \cdot 4,78 \\ &= 345 \text{ VARs} \end{aligned}$$

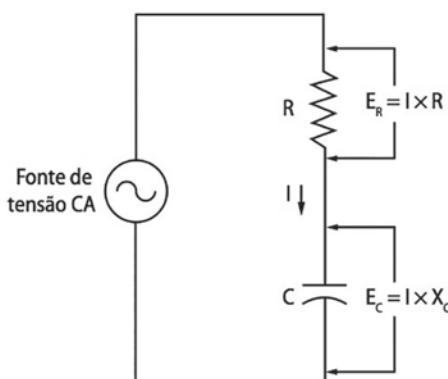
$$\begin{aligned} VA &= E_T \cdot I \\ &= 120 \cdot 4,78 \\ &= 574 \text{ VA} \end{aligned}$$

	<b>E</b>	<b>I</b>	<b>L</b>	<b>R/ XL/Z</b>	<b>W/VA/ VARs</b>	<b>&lt;θ</b>	<b>FP</b>
R	95,6V	4,78 A		20Ω	457 W	0°	
L	72,2V	4,78 A	40 mH	15,1 Ω	345 VARs	90°	
total	120V	4,78 A		25,1 Ω	574 VA	37,1°	97,7%

## Circuitos RC série

A tensão e a corrente estão 90° defasadas entre si em um circuito puramente capacitivo. Já em um puramente resistivo, a tensão e a corrente estão em fase entre si. Em um circuito contendo tanto resistência quanto capacidade, a tensão aplicada e a corrente estarão defasadas entre si em um ângulo entre 0 e 90°.

Denominados circuito RC série a combinação de uma resistência e de um capacitor conectados em série com uma fonte CA. Veja na Figura 7 um resistor e um capacitor puro ou ideal ligados em série com uma fonte de tensão CA.



**Figura 7.** Circuito RC série.

*Fonte:* Petruzella (2013,p. 258).

O fluxo de corrente no circuito promove quedas de tensão através do capacitor e do resistor, que são proporcionais à corrente no circuito e aos valores individuais de resistência e de reatância capacitativa. Expressamos a tensão no resistor ( $E_R$ ) e a tensão no capacitor ( $E_C$ ) seguindo a lei de Ohm:

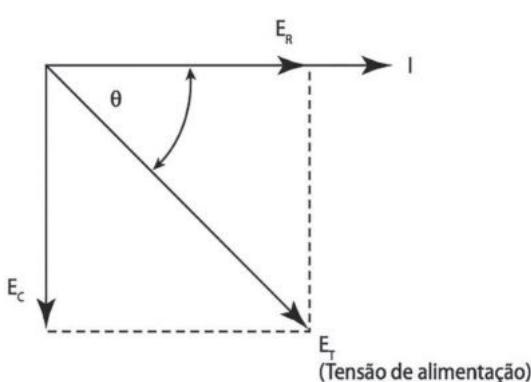
$$E_R = I \cdot R$$

$$E_C = I \cdot X_C$$

Os circuitos RC série se assemelham aos circuitos RL série (de fato, as fórmulas são praticamente as mesmas, somente com os valores associados à indutância sendo substituídos por aqueles associados à capacidade). Em um circuito RC série, a oposição total ou impedância é uma combinação de resistência ( $R$ ) e de reatância capacitativa ( $X_C$ ). Note que a fórmula para a impedância de um circuito RC série baseado na lei de Ohm permanece como:



Quando um circuito série RC está ligado a uma fonte CA, a tensão aplicada e a corrente estarão defasadas em um ângulo compreendido entre 0 e 90°, que é determinado pela relação entre os valores de resistência e de capacidade presentes no circuito. Note que o diagrama fasorial (Figura 8) de um circuito RC série se assemelha ao de um circuito RL série porque ele também usa a corrente, que é comum a todos os elementos do circuito, como o fasor de referência.



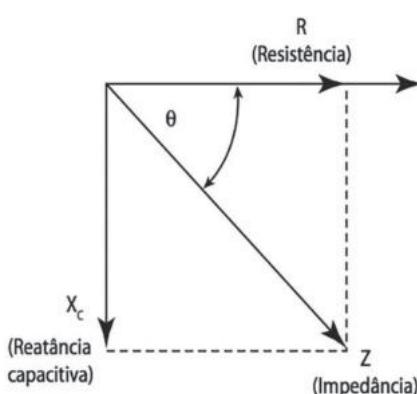
**Figura 8.** Diagrama fasorial de um circuito RC série.

Fonte: Petruzella (2013, p. 259).

Lembre-se de que, para um capacitor, a corrente está adiantada em 90° da tensão. Então, a única alteração observada no diagrama fasorial é que o fasor da tensão no capacitor  $E_C$  está atrasado em 90° da corrente  $I$  e, portanto, é desenhado 90° atrás do fasor de corrente. Assim, a tensão de alimentação total ( $E_T$ ) é o fasor que obtemos somando os fasores associados às tensões no resistor e no capacitor:

$$E_T = \sqrt{E_R^2 + E_C^2}$$

A resistência ( $R$ ) e a reatância capacitativa ( $X_C$ ) possuem uma diferença angular de 90° entre si e formam o triângulo de impedância (Figura 9). Novamente, observe a semelhança geométrica entre o triângulo de impedância e o diagrama fasorial do circuito. Assim, ele terá o mesmo ângulo de fase theta ( $\theta$ ).



**Figura 9.** Triângulo de impedância de um circuito RC série.

Fonte: Petruzella (2013, p. 259).

Quando conhecemos a resistência e a reatância capacitativa do circuito RC série, calculamos a impedância com essa equação:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}$$

Como nos circuitos RL série, os circuitos RC possuem potência aparente, potência reativa e potência ativa. A potência ativa (watts) está na parte resistiva do circuito, e a potência reativa capacitiva (VARs), na parte capacitiva do circuito. A potência total ou aparente (VA) possui um componente de potência ativa e um de potência reativa. As equações de potência para um circuito RC série se assemelham àquelas para os circuitos RL série e as utilizamos con-

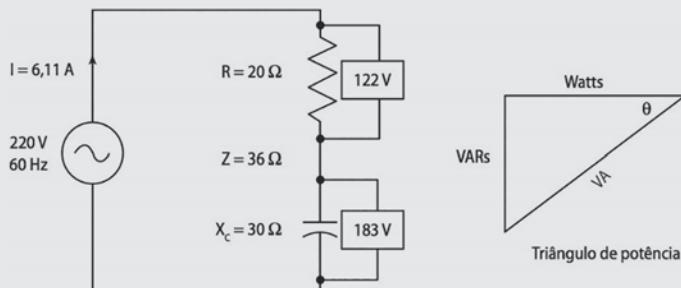
formas demonstramos no exemplo. Lembre-se de que em qualquer circuito CA, obtemos o fator de potência dividindo a potência ativa pela potência aparente:

$$\text{FP} = \frac{\text{Watts}(W)}{\text{Volt-Ampères (VA)}} = \frac{\text{Potência ativa}}{\text{Potência aparente}} = \cos \theta$$

### Exemplo

Para o circuito RL da figura abaixo, vamos determinar:

- a potência ativa
- a potência reativa capacitiva
- a potência aparente



Fonte: Petruzella (2013, p. 262).

Solução:

- Potência ativa =  $E_R + I_R$   
 $= 122 V \cdot 6,11 A$   
 $= 745 W$   
 ou potência ativa =  $I^2 \cdot R$   
 $= 6,11 \cdot 6,11 \times 20$   
 $= 747 W$
- Potência reativa capacitiva =  $E_C \cdot I_C$   
 $= 1,83 V \cdot 6,11 A$   
 $= 1.118 VARs$   
 ou potência reativa indutiva =  $I^2 \cdot X_C$   
 $= 6,11 \cdot 6,11 \cdot 30$   
 $= 1.120 VARs$
- Potência aparente =  $E_T \cdot I_T$   
 $= 220 V \cdot 6,11 A$   
 $= 1.344 VA$

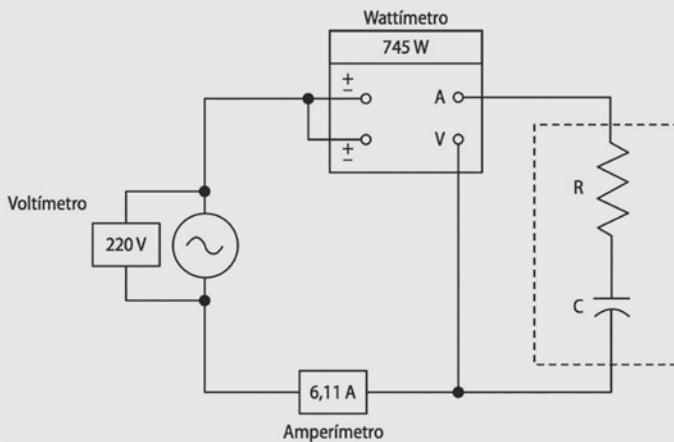
$$\begin{aligned}
 \text{ou potência aparente} &= I^2 \cdot Z \\
 &= 6,11 \cdot 6,11 \times 36 \\
 &= 1.344 \text{ VA} \\
 \text{ou potência aparente} &= \sqrt{Watts^2 + VARs^2} \\
 &= \sqrt{745^2 + 1.118^2} \\
 &= 1.343 \text{ VA}
 \end{aligned}$$

Você viu que em um circuito RL série, a corrente está atrasada da tensão aplicada e, neste caso, descrevemos o fator de potência como atrasado. Para um circuito RC série, a corrente está adiantada da tensão aplicada e descrevemos o fator de potência como adiantado.



## Exemplo

Para o circuito RC série (ver a figura a seguir), vamos determinar o fator de potência:



*Fonte:* Petruzella (2013, p. 263).

Solução:

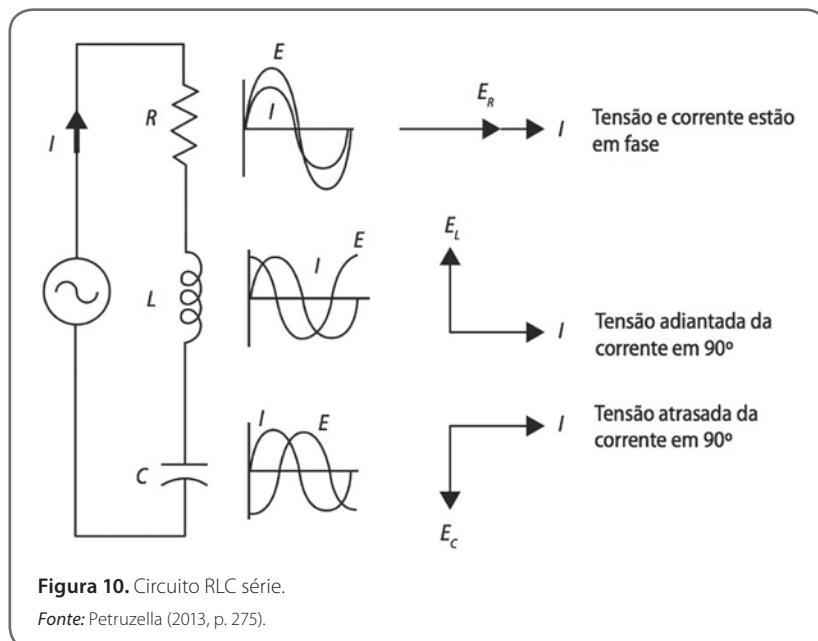
$$\begin{aligned}\text{Potência aparente} &= E_T \cdot I_T \\&= 220 \text{ V} \cdot 6,11 \text{ A} \\&= 1.344 \text{ VA} \\FP &= \frac{\text{Watts}(W)}{\text{Volt - Ampères (VA)}} \\&= \frac{745}{1.344} \\&= 0,554 \text{ OU } 55,4\% \text{ (adiantado)}\end{aligned}$$

### Saiba mais

Como foi feito com o circuito RL, é aconselhável que você também elabore uma tabela e preencha com os valores encontrados de um circuito RC série para a reatância capacitiva ( $X_C$ ), a impedância ( $Z$ ), a corrente ( $I$ ), a queda de tensão através do resistor ( $E_R$ ) e do capacitor ( $E_C$ ), o ângulo theta ( $\theta$ ) e o fator de potência (FP) para o circuito, a potência ativa (W), a potência reativa (VARs) e a potência aparente (VA).

## Circuitos RLC série

Um circuito RLC série possui elementos de resistência, indutância e capacidade conectados em série com uma fonte CA (Figura 10).



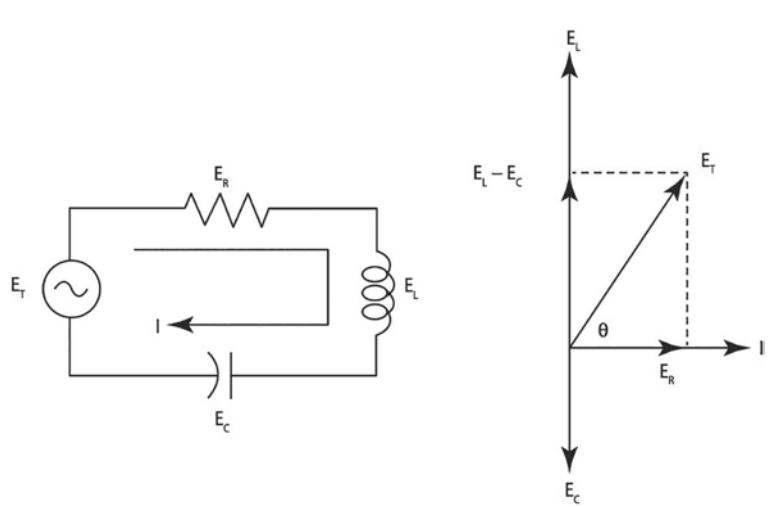
De acordo com Petruzella (2013), em um circuito RLC, a corrente é a mesma em todos os componentes, porém as quedas de tensão através dos elementos estão fora de fase entre si. A queda de tensão na resistência está em fase com a corrente; a queda de tensão pelo indutor está adiantada em 90° da corrente; e a queda de tensão através do capacitor está atrasada em 90° da corrente. Novamente, para o circuito série, as quedas de tensão por meio do resistor, indutor e capacitor dependem da corrente e dos valores de R,  $X_L$  e  $X_C$ :

$$E_R = I \times R$$

$$E_L = I \times X_L$$

$$E_C = I \times X_C$$

As três tensões de um circuito RLC série são combinadas, conforme mostrado no diagrama fasorial de tensões do circuito da Figura 11.



**Figura 11.** Diagrama fasorial das tensões para um circuito RLC série.

Fonte: Petruzella (2013, p. 275).

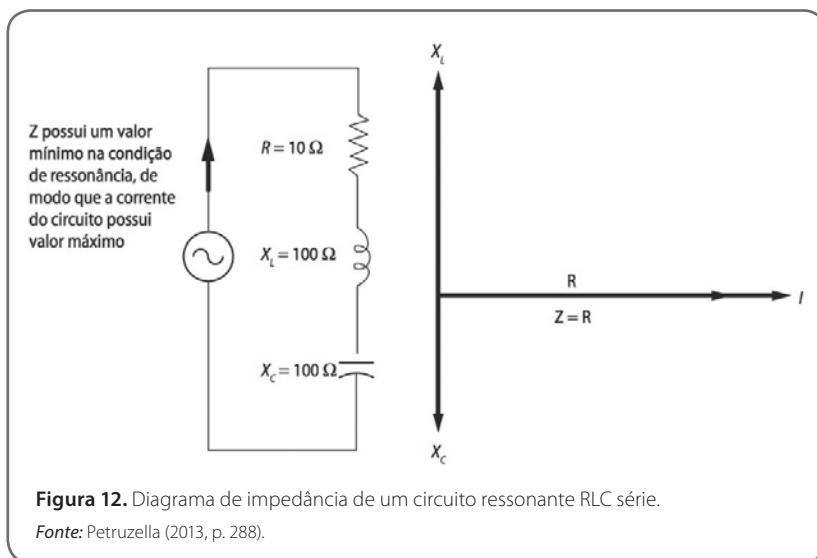
Primeiro desenhamos a linha de referência horizontal, representando a corrente comum. A tensão através da resistência está em fase com a corrente e, portanto, a colocamos diretamente sobre a linha que representa a corrente. A tensão pelo indutor está adiantada da corrente em  $90^\circ$ , por isso, a desenhamos  $90^\circ$  à frente da corrente. A tensão pelo capacitor está atrasada da corrente em  $90^\circ$  e, portanto, a desenhamos  $90^\circ$  atrás da corrente. Para combinar as tensões, subtraímos os dois valores das tensões reativas (associadas ao indutor e ao capacitor), que estão  $180^\circ$  defasadas entre si. A tensão aplicada total ( $E_T$ ) é o vetor resultante da soma da tensão por meio do resistor com a diferença entre as tensões  $E_L$  e  $E_C$ . Calculamos essa tensão utilizando a fórmula a seguir, derivada do Teorema de Pitágoras:

$$E_T = \sqrt{E_R^2 + (E_L - E_C)^2}$$

O ângulo de fase do circuito theta ( $\theta$ ) é sempre o ângulo entre a corrente do circuito e a tensão aplicada. Classificamos um circuito RLC série como indutivo quando a tensão que passa pelo indutor for maior do que a tensão que passa pelo capacitor. Do contrário, ele será classificado como capacitivo.

## Circuitos série ressonantes e filtros

Denominamos **circuitos ressonantes** os circuitos nos quais a reatância induutiva é igual à reatância capacitativa ( $X_L = X_C$ ). Eles podem ser circuitos série ou paralelo, ou circuitos RLC ou LC. Em qualquer circuito série contendo L e C, a corrente possui seu maior valor quando a reatância induutiva  $X_L$  é igual à reatância capacitativa  $X_C$ , pois, nessas condições, a impedância é mínima e igual a R (PETRUZELLA, 2013). Veja na Figura 12 um circuito ressonante série RLC e um diagrama de impedância.



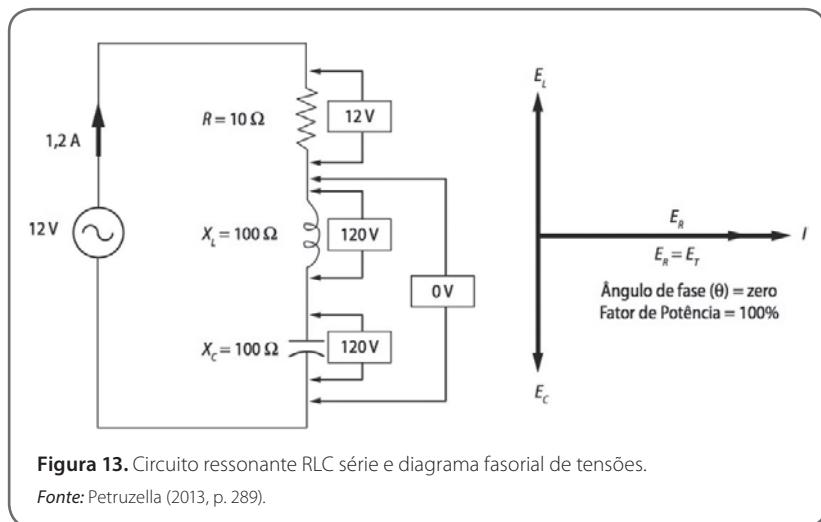
**Figura 12.** Diagrama de impedância de um circuito ressonante RLC série.

Fonte: Petruzella (2013, p. 288).

Não se esqueça de que quando  $X_L$  e  $X_C$  são diferentes, obtemos a impedância Z aplicando o Teorema de Pitágoras, com um dos catetos sendo igual a R e o outro cateto igual à diferença entre  $X_L$  e  $X_C$ . Quando  $X_L$  e  $X_C$  são iguais, Z é igual a R, que equivale ao seu valor mínimo. Assim, com Z mínimo, a corrente possui o seu maior valor. Por isso, em um circuito RLC ressonante, determinamos a corrente pela lei de Ohm do seguinte modo:

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

Em um circuito ressonante RLC série, a mesma corrente flui por todos os componentes. Como a reatância indutiva e a reatância capacitativa em ohms são iguais, as tensões que passam por  $X_L$  e  $X_C$  também serão iguais e defasadas em  $180^\circ$  entre si, neutralizando-se. Veja na Figura 13 um circuito RLC série ressonante e o diagrama fasorial das tensões.



**Figura 13.** Circuito ressonante RLC série e diagrama fasorial de tensões.

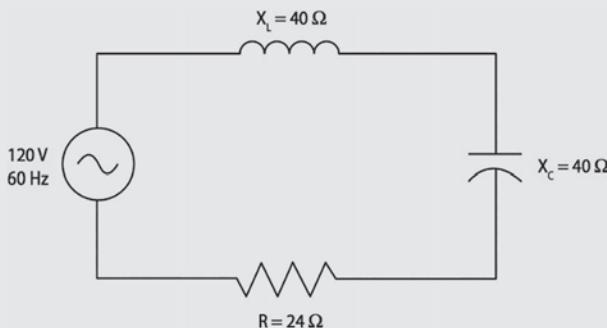
Fonte: Petruzella (2013, p. 289).

Com os efeitos do capacitor e do indutor se anulando, o resistor será o único componente limitador de corrente, e a tensão de alimentação total aplicada aparece por meio dos terminais do resistor. Portanto, o ângulo de fase entre a corrente do circuito e a tensão de alimentação será zero, e o fator de potência será 1 ou 100%. Com a potência reativa indutiva, associada ao indutor, sendo anulada pela potência reativa capacitativa, associada ao capacitor, podemos considerar o circuito de natureza puramente resistiva.



## Exemplo

Para o circuito RLC série (figura a seguir), vamos determinar o fator de potência:



*Fonte:* Petruzella (2013, p. 291).

- a impedância ( $Z$ )
- a corrente ( $I$ )
- a queda de tensão através do resistor ( $E_R$ ), indutor ( $E_L$ ) e capacitor ( $E_C$ )
- a potência aparente, ativa e reativa líquida
- o fator de potência

Solução:

$$\mathbf{a)} Z = R \\ = 24 \Omega$$

$$\mathbf{b)} I = \frac{E_T}{R} \\ = \frac{120}{24} \\ = 5A$$

$$\mathbf{c)} E_R = I \cdot R \\ = 5 \cdot 24 \\ = 120 V$$

$$E_L = I \cdot X_L \\ = 5 \cdot 40 \\ = 200 V$$

$$E_C = I \cdot X_C \\ = 5 \cdot 40 \\ = 200V$$

$$\text{d) Potência aparente} = E_T \cdot I \\ = 120 \cdot 5 \\ = 600 \text{ VA}$$

$$\text{Potência ativa} = E_R \cdot I \\ = 120 \cdot 5 \\ = 600 \text{ Watts}$$

$$\text{Potência reativa líquida} = (I \cdot E_L) - (I \cdot E_C) \\ = (5 \cdot 200) (5 \cdot 200) \\ = 1000 - 1000 \\ = \text{zero VARs}$$

$$\text{e) Fator de potência} = \frac{\text{Watts}}{\text{VA}} \\ = \frac{600}{600} \\ = 1 \text{ ou } 100\%$$

Sempre é bom lembrar: a reatância indutiva varia diretamente com a frequência da tensão de alimentação CA ( $X_L = 2\pi fL$ ), enquanto a reatância capacitiva varia inversamente ( $X_C = 1/\pi fC$ ). Quando um indutor e um capacitor são conectados em série em um circuito, haverá uma frequência de ressonância na qual a reatância indutiva e a reatância capacitiva serão iguais. Isso acontece porque à medida que a frequência aumenta, a reatância indutiva cresce e, então, a reatância capacitiva diminui. Utilizamos a seguinte fórmula para determinar a frequência de ressonância quando conhecemos os valores de indutância e de capacidade:

$$f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

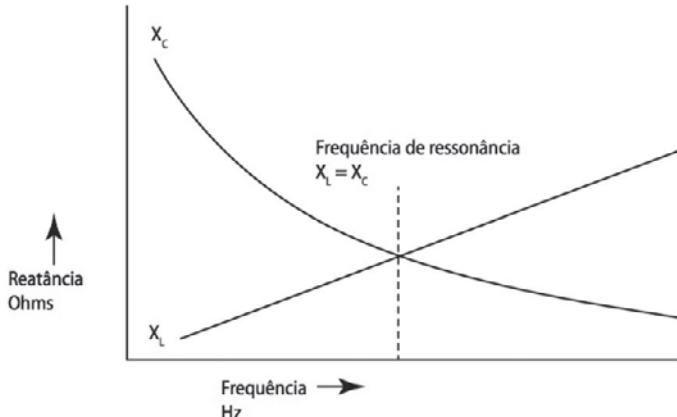
Onde:

$f_R$  = é a frequência de ressonância em hertz

$L$  = é a indutância em henries

$C$  = é a capacidade em farads

Para exemplificar, suponhamos que uma tensão CA de valor fixo e frequência variável seja aplicada a um circuito RLC série. À medida que a frequência da tensão aplicada aumenta, a reatância indutiva  $X_L$  se eleva, porém a reatância capacitiva  $X_C$  diminui. Veja no gráfico da Figura 14 o comportamento de  $X_L$  e  $X_C$  com variações na frequência; note que na frequência de ressonância  $X_L = X_C$ .



**Figura 14.** Gráfico mostrando como  $X_L$  e  $X_c$  variam com o aumento da frequência.

Fonte: Petruzella (2013, p. 292).



### Exemplo

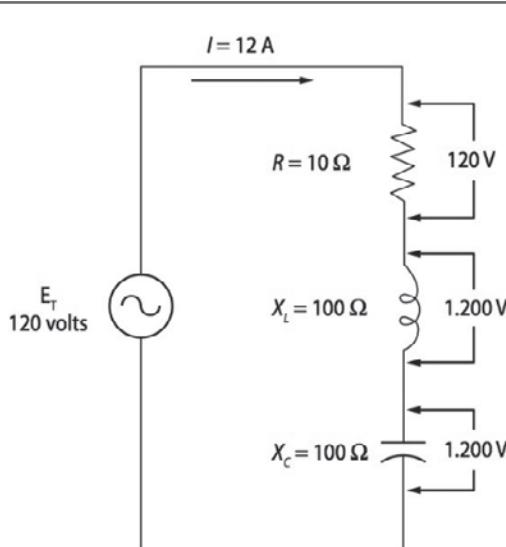
Agora vamos calcular a frequência de ressonância de um circuito RLC série se  $L = 750 \text{ mH}$  e  $C$

$$\begin{aligned}
 f_R &= \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \\
 &= \frac{1}{2 \times 3,14 \sqrt{0,75 \times 0,000047}} \\
 &= \frac{1}{6,28 (0,00594)} \\
 &= 26,8 \text{ Hz}
 \end{aligned}$$

De acordo com Petruzella (2013), nos casos em que o circuito não está em ressonância, o fluxo de corrente é limitado pela combinação das reatâncias indutiva e capacitativa, junto com a eventual resistência presente no circuito. Se a frequência é reduzida abaixo da frequência de ressonância, a reatância indutiva diminui, a impedância aumenta e a reatância capacitativa aumenta. Quando a frequência é aumentada acima da frequência de ressonância, a

reatância indutiva e a impedância crescem e a reatância capacitiva diminui. Em ambos os casos, haverá uma impedância maior do que na situação em que as duas reatâncias se neutralizam (condição de ressonância).

Utilizamos os circuitos ressonantes série para proporcionar um grande aumento (ganho) de corrente e de tensão na frequência de ressonância. Para exemplificar, vejamos o circuito ressonante série da Figura 15: a tensão por meio dos elementos reativos é muito mais elevada do que a tensão total aplicada. Essa condição aparentemente impossível advém da interação entre o capacitor e o indutor. A tensão por meio do indutor e do capacitor é de 1.200 V, enquanto a tensão aplicada é de apenas 120 V. As duas tensões nos elementos reativos (indutor e capacitor) se anulam, deixando a tensão no resistor igual à tensão total aplicada, 120 V.



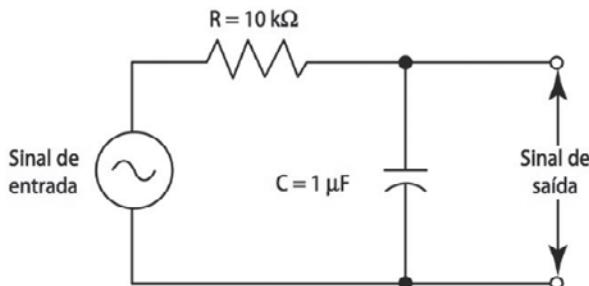
**Figura 15.** A tensão através dos elementos reativos é muito mais elevada do que a tensão total aplicada.

Fonte: Petruzella (2013, p. 293).

No campo da eletrônica, comumente utilizamos os componentes reativos na filtragem. A função de um filtro é eliminar ou deixar passar sinais de certas frequências. Nos sistemas de comunicação, os circuitos de filtragem são muito usados, pois eles podem separar sinais desejados de sinais indesejados, bloquear

sinais de interferência, aumentar a fala e o vídeo e alterar os sinais de outras maneiras. Classificamos os filtros em quatro tipos principais (dependendo dos componentes de frequência do sinal de entrada que são passados para a saída do filtro): passa-baixas, passa-altas, passa-faixa e rejeita-faixa. Você vai ver agora uma breve explicação sobre cada um deles.

- Um **filtro passa-baixas** é aquele que deixa passar através dele para a carga todos os sinais de frequência igual a zero até uma dada frequência de corte. Os sinais de frequências mais elevadas são bloqueados ou atenuados.
- Um **filtro passa-altas** é aquele que rejeita os sinais de frequência igual a zero até uma dada frequência de corte, e deixa passar sinais de frequências mais elevadas.
- Um **filtro passa-faixa** é aquele que deixa passar sinais com frequências compreendidas entre dois limites e bloqueia sinais com frequências abaixo ou acima desses limites.
- Um **filtro rejeita-faixa** é aquele que bloqueia, ou rejeita, uma faixa (banda) específica de frequências. Ele bloqueia todas as frequências entre certos limites e deixa passar sinais com frequências acima e abaixo desses limites. Veja na Figura 16 a forma mais simples de um filtro passa-baixas: um circuito RC série.

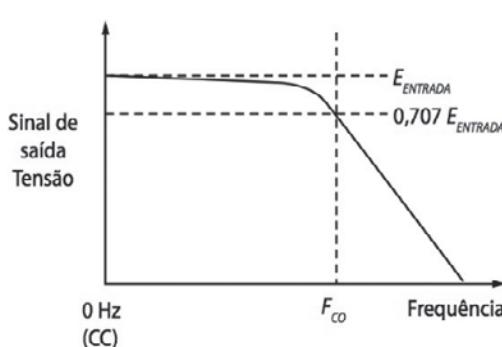


**Figura 16.** Filtro passa-baixas.

Fonte: Petruzella (2013, p. 294).

A tensão de entrada é aplicada por meio do resistor e capacitor em série. A tensão de saída é tomada através dos terminais do capacitor. Obtemos a tensão pelo capacitor aplicando a regra do divisor de tensão à resistência ( $R$ ) em série com a reatância capacitiva ( $X_C$ ). Suponha que a tensão de entrada tem um valor rms fixo, porém a sua frequência pode variar. Quando a frequência varia, o valor de  $R$  permanece constante, mas o valor de  $X_C$  muda (isto é, ele diminui à medida que a frequência aumenta). Em baixas freqüências,  $X_C$  é maior que  $R$ , e a maior parte do sinal de entrada aparecerá na saída. Em freqüências muito elevadas,  $X_C$  é muito menor que  $R$ , e praticamente não haverá tensão na saída.

Veja na Figura 17 a curva de resposta de freqüência para o filtro passa-baixas que mostra o valor de tensão na saída em função da freqüência.



**Figura 17.** Resposta em freqüência de um filtro passa-baixa.

*Fonte:* Petruzella (2013, p. 295).

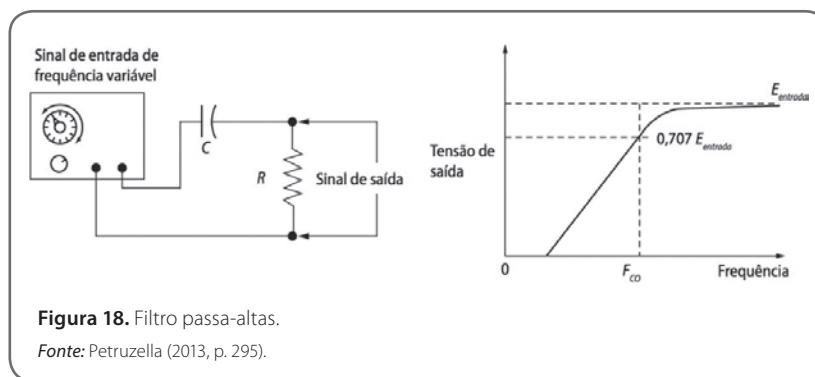
Para uma freqüência de zero hertz ou CC, o capacitor oferece uma oposição máxima ( $X_C$  máximo), e a tensão de saída é igual à tensão de entrada. Conforme a freqüência aumenta,  $X_C$  começa a diminuir, e a tensão de saída começa a reduzir. Na freqüência de corte ( $F_{CO}$ ), a tensão de saída é igual a aproximadamente 70,7% da tensão de entrada. Após alcançar a freqüência de corte, a tensão de saída diminui a uma taxa constante. A freqüência de corte é uma função dos valores da resistência e da capacidade, sua reatância

capacitiva será igual ao valor da resistência. Calculamos a frequência de corte utilizando essa fórmula:

$$\begin{aligned}
 f_{co} &= \frac{1}{2\pi RC} \\
 &= \frac{1}{2\pi(10\Omega \times 1\mu F)} \\
 &= \frac{1}{2\pi\sqrt{(1 \times 10^4)(1 \times 10^{-6})}} \\
 &= \frac{1}{6,28 \times 10^{-2}} \\
 &= 15,9 \text{ Hz}
 \end{aligned}$$

Esse filtro passará todos os sinais (com atenuação mínima) de frequências inferiores a 15,9 Hz e atenuará os sinais com frequências superiores a 15,9 Hz. Dependendo dos pontos entre os quais se mede a tensão (sinal) de saída, o filtro se comporta como um passa-baixas ou como um passa-altas.

Veja na Figura 18 um circuito RC série simples passa-altas:



**Figura 18.** Filtro passa-altas.

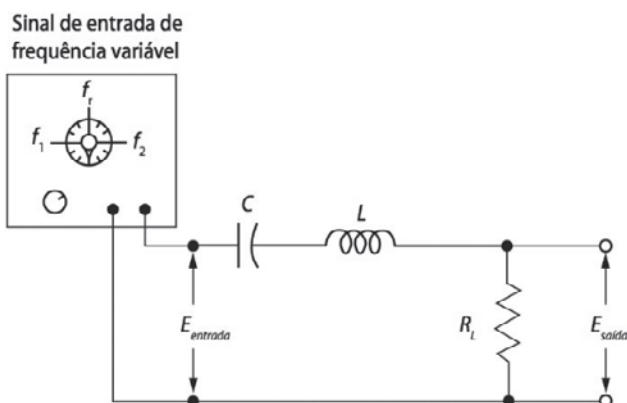
Fonte: Petruzella (2013, p. 295).

Assim como o filtro passa-baixas, o filtro passa-altas consiste em um resistor e um capacitor conectados em série com a tensão de entrada (sinal a ser filtrado). No filtro passa-altas, porém, a tensão de saída é obtida por meio do resistor. Para frequências de entrada altas, a reatância capacitativa será muito baixa. Então, o capacitor funciona como um curto entre o sinal de entrada e o resistor para frequências mais altas. São bloqueadas as frequências mais

baixas proporcionalmente até o valor da reatância em ohms. Note que, em frequências elevadas, a tensão de saída é aproximadamente igual à tensão de entrada. Conforme a frequência diminui, a tensão de saída começa a reduzir. Na frequência de corte, a tensão de saída é aproximadamente 70,7% da tensão de entrada. Abaixo da frequência de corte, a atenuação aumenta e a tensão de saída, consequentemente, diminui. Calculamos a frequência de corte utilizando a seguinte fórmula:

$$f_{CO} = \frac{1}{6,28 RC}$$

Veja na Figura 19 um filtro ressonante passa-faixa.

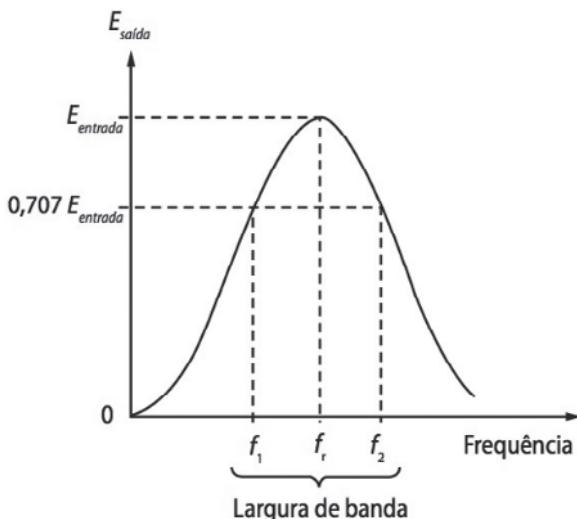


**Figura 19.** Filtro passa-altas.

Fonte: Petruzella (2013, p. 295).

O filtro é basicamente um circuito série ressonante composto de L e C. O resistor  $R_L$  é a carga na qual a tensão de saída do filtro é aplicada. Na frequência de ressonância, o circuito série ressonante tem uma impedância muito baixa. Assim, há uma queda de tensão muito pequena nos elementos L e C, e a maior parte da tensão fica na carga  $R_L$ . Portanto, na frequência de ressonância, a maior parte da tensão de entrada aparece através de  $R_L$ . Abaixo da frequência de ressonância, a reatância  $XC$  é maior que a resistência  $R_L$ , e a maior parte da tensão fica nos terminais do capacitor. Acima da frequência de ressonância,  $X_L$  é maior que a resistência  $R_L$ , e a maior parte da tensão fica nos terminais do indutor.

Um filtro passa-faixa é equivalente à combinação de um filtro passa-baixas e um filtro passa-altas. Veja na Figura 20 a curva de resposta resultante.

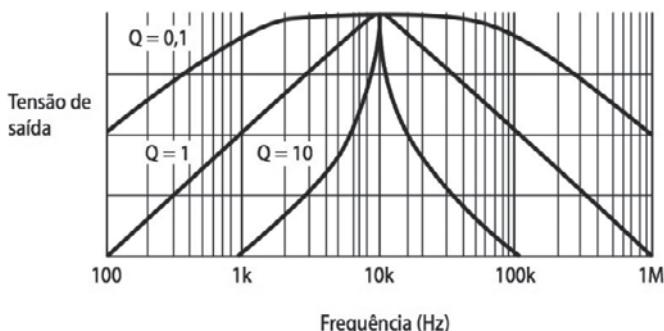


**Figura 20.** Curva de resposta em frequência de um filtro passa-faixa.

Fonte: Petruzella (2013, p. 296).

O filtro ressonante série passa-faixa possui duas frequências de corte,  $f_1$  e  $f_2$ . A largura de banda ou faixa de passagem de um filtro passa-faixa consiste na faixa de frequência para a qual a tensão de saída é igual ou maior que 70,7% do seu valor na frequência de ressonância. Normalmente os filtros passa-faixa são projetados para ter resposta em frequência bem definida e seletiva. A frequência de corte da seção passa-altas se torna o limite inferior de frequência ( $f_1$ ) no passa-faixa. Já a frequência de corte da seção passa-baixas se torna o limite superior ( $f_2$ ) de frequência no passa-faixa. A largura de banda é a diferença entre  $f_2$  e  $f_1$ . Na frequência de ressonância ( $f_r$ ),  $X_L = X_C$ , e a tensão de saída é igual àquela do sinal de entrada.

Denominamos fator “Q” a medida da qualidade de um filtro série ressonante passa-faixa. Quanto maior for o Q de um circuito, mais estreita será a banda de passagem (Figura 21).



**Figura 21.** Quanto maior for o Q, mais estreita será a faixa de passagem (largura de banda) e mais seletivo será o filtro.

Fonte: Petruzella (2013, p. 297).

Em filtros passa-faixa normalmente é desejável um alto Q, a fim de que tenhamos uma seleção precisa de uma certa faixa de frequências. Para obter um Q elevado, a resistência  $R_L$  deve ter baixo valor e a reatância indutiva  $X_L$  precisa ser alta na frequência de ressonância. Calculamos o Q de duas maneiras (PETRUZELLA, 2013):

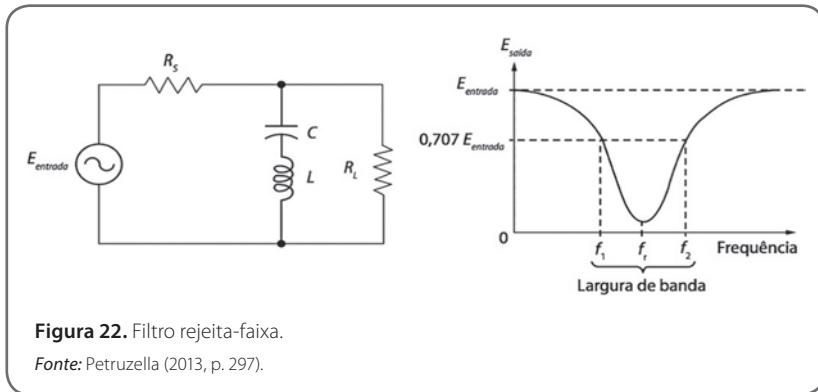
- Pela razão de tensões. A razão entre a tensão através do indutor e a tensão na saída é avaliada na ressonância, conforme a seguir:

$$Q = \frac{E_L(\text{na ressonância})}{E_{\text{entrada}}}$$

- Pela relação entre  $X_L$  e  $X_C$ . Calculamos a razão entre a reatância indutiva e a resistência do circuito da seguinte forma: se o circuito não tem um resistor série, então usamos a resistência CC do indutor. Um indutor terá alguma resistência CC em função do fio utilizado em seu enrolamento.

$$Q = \frac{X_L}{R_L}$$

A resposta de um filtro rejeita-faixa é oposta à de um filtro passa-faixa. Veja na Figura 22 um filtro rejeita-faixa simples.



**Figura 22.** Filtro rejeita-faixa.

Fonte: Petruzella (2013, p. 297).

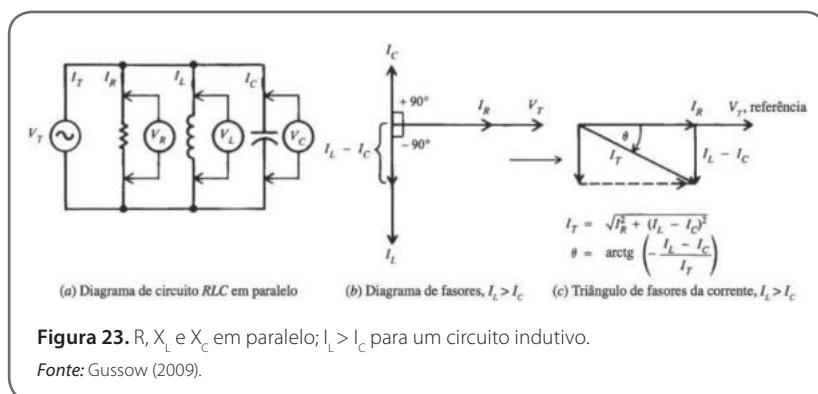
Observe que temos um circuito LC série ressonante ligado em paralelo com a carga. Em ressonância, o circuito série ressonante oferece uma impedância muito baixa ao fluxo de corrente, o que praticamente provoca um curto-círcuito em paralelo com a resistência  $RL$ , e a maior parte da tensão de entrada fica em  $RS$ . Acima e abaixo da frequência de ressonância, a impedância do filtro é muito maior, e  $RL$  não é mais curto-circuitado por um ramo paralelo. Esse filtro também é conhecido como eliminação de banda.

## Circuitos RLC (resistência, indutância e capacidade) paralelo

As características dos circuitos paralelos se aplicam aos circuitos de corrente alternada que possuem componentes de resistência, indutância e capacidade ligados em paralelo. Nos circuitos CA paralelos, as quedas de tensão através de cada um dos componentes estão em fase entre si e são iguais em módulo ao valor da tensão aplicada da fonte. No entanto, as correntes não estão em fase e vão variar em módulo de acordo com as regras de circuitos CA paralelos.

Veja na Figura 23a um circuito CA com três ramos em paralelo, uma resistência em um ramo, uma indutância no segundo ramo e uma capacidade

no terceiro ramo. A tensão é a mesma em cada ramo em paralelo, de modo que  $VT = VR = VL = VC$ . Utilizamos a tensão aplicada  $VT$  como a linha de referência para medir o ângulo de fase  $\theta$ . A corrente total  $IT$  é a soma dos fasores  $IR$ ,  $IL$  e  $IC$ . A corrente na resistência  $IR$  está em fase com a tensão aplicada  $VT$  (Figura 23b). A corrente na indutância  $IL$  está atrasada em relação à tensão  $VT$  em  $90^\circ$ . A corrente no capacitor  $IC$  está adiantada em relação à tensão  $VT$  em  $90^\circ$ .  $IL$  e  $IC$  estão exatamente  $180^\circ$  fora de fase e atuam, portanto, em sentidos opostos (Figura 23b). Quando  $IL > IC$ ,  $IT$  está atrasada em relação a  $VT$  (Figura 23c), de modo que o circuito RLC em paralelo é considerado indutivo.



**Figura 23.** R,  $X_L$  e  $X_C$  em paralelo;  $I_L > I_C$  para um circuito indutivo.

Fonte: Gussow (2009).

Em um circuito RLC em paralelo, quando  $X_L > X_C$ , a corrente capacitativa será maior do que a indutiva, logo, consideramos o circuito como capacitivo. Quando  $X_C > X_L$ , a corrente indutiva é maior do que a capacitativa, logo, consideramos o circuito como indutivo. Essas relações são opostas às do circuito RLC em série (GUSSOW, 2009).



## Exercícios

- 1.** Um circuito ressonante série ou paralelo apresenta a seguinte propriedade:
  - a)** Não apresenta resistência elétrica.
  - b)** A reatância indutiva é igual a reatância capacitativa.
  - c)** As reatâncias indutivas são iguais a zero.
  - d)** As reatâncias são iguais à tensão.
  - e)** Nenhuma das alternativas anteriores.
- 2.** A frequência de ressonância é dada pela fórmula a seguir. Calcule a frequência de ressonância  $f_R$  para um circuito LC série se  $L = 750 \text{ mH}$  e  $C = 47 \text{ microFarad}$ :
 
$$f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Onde:  
 $f_R$  é a frequência de ressonância em hertz.  
 $L$  é a indutância em henries  
 $C$  é a capacidade em farads

  - a)** 2680 Hz.
  - b)** 268 Hz.
  - c)** 26,8 Hz.
  - d)** 2,68 Hz.
  - e)** 26,8 KHz.
- 3.** Qual é a potência aparente de um motor de 15 Ampères alimentado com uma fonte de alimentação monofásica de 120 V? Lembre-se de que a potência aparente é igual ao produto da tensão pela corrente, e a unidade é VA.
  - a)** 1000 VA.
  - b)** 1800 VA.
  - c)** 2200 VA.
  - d)** 2800 VA.
  - e)** 3800 VA.
- 4.** Um dispositivo elétrico de iluminação de descarga de gás de 250 Watts tem o fator de potência de 0,8. Qual é a potência aparente? Lembre-se de que a potência aparente é o quociente entre a potência ativa e o fator de potência.  $P_{ap} = \frac{P_{ativa}}{\text{Fator de potência}}$ 
  - a)** 180 VA.
  - b)** 220 VA.
  - c)** 280 VA.
  - d)** 313 VA.
  - e)** 380 VA.
- 5.** A correção do fator de potência de cargas indutivas (motores, transformadores) é feita colocando-se em \_\_\_\_\_ componentes chamados \_\_\_\_\_?
  - a)** paralelo, capacitores.
  - b)** série, indutores.
  - c)** paralelo, resistores.
  - d)** paralelo, indutores.
  - e)** série, capacitores.

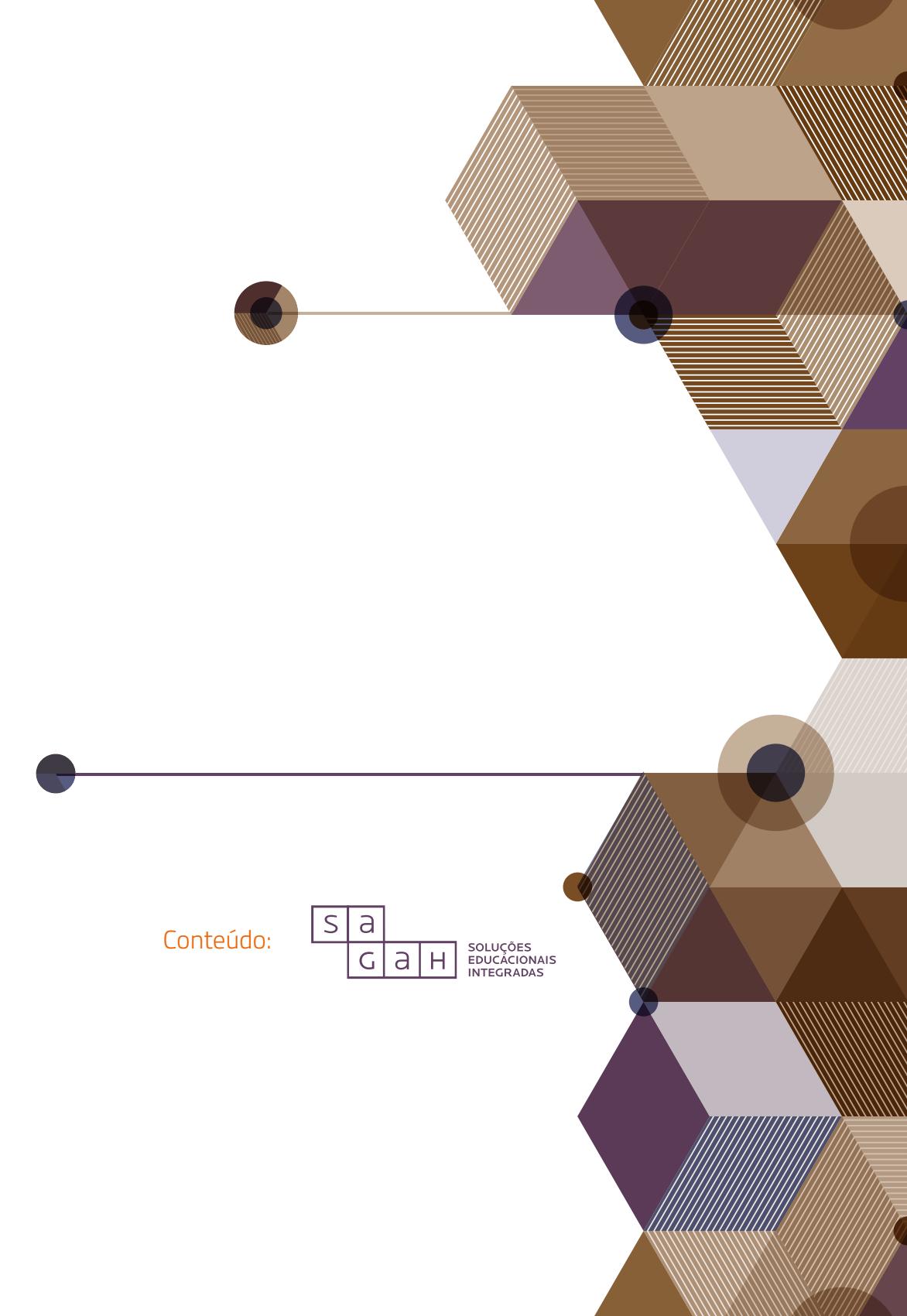


## Referências

GUSSOW, M. *Eletrodade básica*. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009. (Coleção Schaum).

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



## DICA DO PROFESSOR

Iremos analisar nesta unidade circuitos **CA**, que contêm combinações série e paralelo de resistência e indutância (**RL**), resistência e capacitors (**RC**), indutância e capacitors (**LC**) e resistência, indutância e capacitors (**RLC**). Conceitos de circuitos ressonantes, onde a reatância indutiva é igual a reatância capacitiva, se aplicam a filtros, como passa baixa, passa faixa, passa alta, rejeita faixa. Do mesmo modo, como aplicação, temos a correção do fator de potência de cargas indutivas (**como motores, transformadores, reatores**) pela adição de banco de capacitores para melhorar o fator de potência, fazendo economia no consumo e evitando multas (**as concessionárias aplicam multas se o fator de potência for menor que 0,91**).

**Vamos acompanhar mais detalhes no vídeo.**

Conteúdo interativo disponível na plataforma de ensino!



## EXERCÍCIOS

- 1) Um circuito ressonante série ou paralelo apresenta a seguinte propriedade:
  - A) Não apresenta resistência elétrica.
  - B) A reatância indutiva é igual a reatância capacitativa.
  - C) As reatâncias indutivas são iguais a zero.
  - D) As reatâncias são iguais a tensão.
  - E) Nenhuma alternativa acima.
  
- 2) A frequência de ressonância é dada pela fórmula anexa. Calcule a frequência de

ressonância FR para um circuito LC série se L= 750 mH e C= 47 microFarad.

$$f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Onde

$f_R$  é a frequência de ressonância em hertz.

L é a indutância em henries.

C é a capacidade em farads.

A) 2680 Hz.

B) 268 Hz.

C) 26,8 Hz.

D) 2,68 Hz.

E) 26,8 KHz.

3) Qual a potência aparente de um motor de 15 Amperes alimentado com uma fonte

**de alimentação monofásica de 120 V? Lembre-se que a potência aparente é igual ao produto da tensão pela corrente, e a unidade é VA.**

- A) 1000 VA.
  - B) 1800 VA.
  - C) 2200 VA.
  - D) 2800 VA.
  - E) 3800 VA.
- 4) Um dispositivo elétrico de iluminação de descarga de gás de 250 Watts tem o fator de potência de 0,8. Qual a potência aparente? Lembre-se que a Potência aparente é o quociente entre a potencia ativa e o fator de potência.  $P_{ap} = \text{Potência ativa} / \text{Fator de potência}$ .
- A) 180 VA.
  - B) 220 VA.
  - C) 280 VA.
  - D) 313 VA.
  - E) 380 VA.
- 5) A correção do fator de potência de cargas indutivas (motores, transformadores) é feita colocando-se em \_\_\_\_\_ componentes chamados de \_\_\_\_\_.

A) paralelo, capacitores.

B) série, indutores.

C) paralelo, resistores.

D) paralelo, indutores.

E) série, capacitores.



## NA PRÁTICA



"Sintonize seu rádio e vamos Na Prática o que acontece com circuitos série e paralelo de cargas indutivas e capacitivas." Circuitos série e paralelo de cargas indutivas e capacitativas são muito utilizados, tendo muitas aplicações práticas.



Circuitos ressonantes, onde a reatância indutiva é igual a reatância capacitativa, se aplicam a filtros, como passa baixa, passa faixa, passa alta, rejeita faixa. Como exemplo de filtro passa faixa, temos a sintonia de frequências de radio, tanto para emissoras AM e FM. Filtros passa baixa são muito utilizados como filtros de linha, que retiram da rede elétrica as interferências de ruído elétrico (alta frequência). São utilizados capacitores e indutores, num filtro chamado Pi, projetado com frequência de corte.



Do mesmo modo, como aplicação, temos a correção do fator de potência de cargas indutivas (**como motores, transformadores, reatores**) pela adição de banco de capacitores para melhorar o fator de potência, fazendo economia no consumo e evitando multas (**as concessionárias**

**aplicam multas se o fator de potência for menor que 0,91).** Algumas cargas indutivas têm fator de potência inferior a **0,8**, devendo ter correção com banco de capacitores.



## SAIBA MAIS

Para ampliar o seu conhecimento a respeito desse assunto, veja abaixo as sugestões do professor:

### **RLC27 - Circuito RLC - Introdução**

Conteúdo interativo disponível na plataforma de ensino!

### **Corrigindo Fator de Potência em Motores I**

Conteúdo interativo disponível na plataforma de ensino!

### **Site do fabricante de motores WEG**

Conteúdo interativo disponível na plataforma de ensino!

# Circuitos RLC paralelos



## APRESENTAÇÃO

Nesta Unidade de Aprendizagem, estudaremos Circuitos RLC paralelos, impedância ( $Z$ ), fator de potência (FP) e correção de fator de potência.

Bons estudos.

**Ao final desta Unidade de Aprendizagem, você deve apresentar os seguintes aprendizados:**

- Identificar circuitos com resistores, indutores e capacitores em corrente alternada.
- Expressar os conceitos de reatância indutiva e capacitiva e os fatores que as afetam em circuitos de corrente alternada.
- Comparar os defasamentos entre tensão e corrente introduzidos por indutores e capacitores.

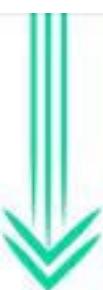
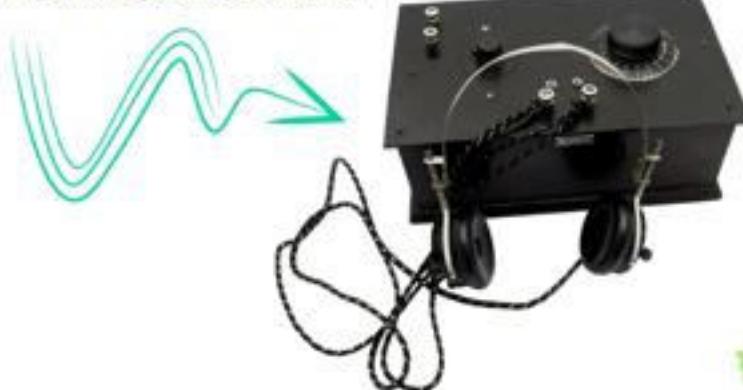


## DESAFIO

Explore o conteúdo, pesquise. Use todas as ferramentas disponíveis para solucionar o problema.

Vamos ao experimento!

Radio galena é um circuito experimental que permite captar estações de rádios em amplitude modulada (AM) em um circuito passivo (sem baterias e amplificação de sinais).



Antigamente era muito usado, bastando ligar a antena do circuito em um pedaço longo de fio. O circuito de sintonia (circuito tanque) tem um capacitor variável e um indutor.

Explique o funcionamento deste circuito, baseado em pesquisa na internet levando em consideração o material estudado nesta Unidade:



## INFOGRÁFICO

Veja na ilustração o esquema do que veremos nesta unidade referente a Circuitos LC paralelo e sua aplicação:



## CONTEÚDO DO LIVRO

Leia o capítulo Circuitos RLC Paralelos que faz parte da obra *Eletrotécnica* e é a base teórica desta Unidade de Aprendizagem.

Boa leitura.

# ELETROTÉCNICA

Diogo Braga da  
Costa Souza



S719e Souza, Diogo Braga da Costa.  
Eletrotécnica [recurso eletrônico] / Diogo Braga da Costa Souza, Rodrigo Rodrigues. – Porto Alegre : SAGAH, 2017.

Editado como livro em 2017.  
ISBN 978-85-9502-055-9

1. Eletrotécnica. 2. Engenharia elétrica. I. Rodrigues, Rodrigo. II. Título.

CDU 621.3

# Circuitos RLC paralelos

## Objetivos de aprendizagem

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

- Identificar circuitos com resistores, indutores e capacitores em corrente alternada.
- Expressar os conceitos de reatância indutiva e capacitiva e os fatores que as afetam em circuitos de corrente alternada.
- Comparar os defasamentos entre tensão e corrente introduzidos por indutores e capacitores.

## Introdução

Neste capítulo, você vai estudar os circuitos RLC paralelos e trabalhar com cálculos envolvendo as principais grandezas, além de conhecer melhor os conceitos de impedância ( $Z$ ), reatância, fator de potência (FP) e correção de fator de potência, visualizando exemplos práticos.

## Reatâncias

A grandeza **reatância** diz respeito à parte da impedância que não é relativa à resistência pura, mas, sim, à parte que representa os elementos capacitivos ou indutivos do circuito. A reatância proporciona às cargas uma tendência a evitar variações no circuito. Como em circuitos CA as grandezas variam constantemente, essa característica faz os componentes reativos interferirem nas respostas do circuito em comparação a circuitos puramente reativos, os quais não interferem nas formas de onda nem na posição das senoides das grandezas tensão e corrente (BOYLESTAD, 2011).

### Reatância indutiva

A **reatância indutiva** é a grandeza que se opõe à variação no nível de corrente no circuito pela presença de indutâncias no circuito. Em circuitos CA, como

há variação constante de corrente proveniente da alimentação, esse tipo de reatância se opõe à corrente (BOYLESTAD, 2011).

Para determinar a reatância em um determinado indutor, utilizamos a seguinte fórmula:

$$X_L = 2\pi f L$$

Onde:

$X_L$  = é a reatância indutiva em ohms ( $\Omega$ );

$f$  = é a frequência de alimentação em hertz (Hz);

$L$  = é a indutância em Henry (H).

## Reatância capacitativa

A **reatância capacitativa** é a grandeza que se opõe à variação no nível de tensão no circuito pela presença de capacitâncias no circuito. Como em circuitos CA há variação constante de tensão proveniente da alimentação, esse tipo de reatância se opõe à tensão (BOYLESTAD, 2011).

Para determinar a reatância em um determinado indutor, utilizamos a seguinte fórmula:

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C}$$

Onde:

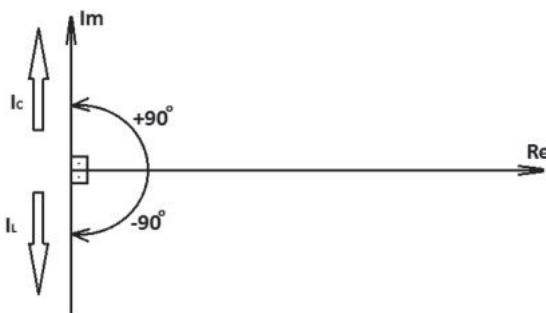
$X_C$  = é a reatância capacitativa em ohms ( $\Omega$ );

$f$  = é a frequência de alimentação em hertz (Hz);

$C$  = é a capacitância em Faraday (F).

## Impedância de elementos puramente reativos

O módulo da impedância de uma carga puramente reativa é igual ao valor da sua reatância. O ângulo da impedância é dado pelo tipo de reatância, capacitiva ou indutiva, do circuito. As indutâncias possuem ângulo de  $90^\circ$ . Já as capacitâncias possuem ângulo de  $-90^\circ$  em relação ao ângulo da tensão de alimentação (BOYLESTAD, 2011).



**Figura 1.** Diagrama complexos de reatâncias.

Fonte: Adaptada de Gussow (2009).

Como o valor da corrente de ramo é determinado pela divisão entre tensão e impedância, isso faz os ângulos da impedância e da corrente serem contrários. As **reatâncias indutivas** possuem **ângulos positivos** e geram ângulos de corrente **negativos**. Já as **reatâncias capacitivas** possuem **ângulos negativos** que geram ângulos de corrente **positivos** (BOYLESTAD, 2011).

## Defasagens entre tensão e corrente em circuitos RCL

As reatâncias capacitiva e indutiva provocam efeitos contrários nos sistemas CA. Conforme descrito anteriormente, o valor do ângulo da corrente em reatâncias indutivas é negativo e, em reatâncias capacitivas, é positivo. Essa variação de ângulo determina a defasagem em relação à forma de onda da tensão (BOYLESTAD, 2011). Com a análise dos ângulos, podemos definir que:

- As indutâncias provocam atrasos da corrente em relação à tensão.
- As capacitâncias provocam atrasos da tensão em relação à corrente.



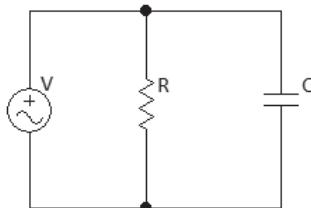
### Fique atento

As análises dos efeitos reativos em circuitos RCL paralelos devem ser feitas pelos valores das correntes de cada ramo, que serão somados conforme a Lei de Kirchhoff das correntes, e não pelas reatâncias, pois estas não podem ser subtraídas como em circuitos RCL série.

## Cálculos em circuitos RCL paralelos

### Circuitos RC paralelo

O circuito RC paralelo consiste em uma associação de um resistor em paralelo a um capacitor, conforme mostrado na Figura 2:



**Figura 2.** Circuito RC paralelo.

Fonte: Adaptada de Gussow (2009).

Como os elementos em paralelo recebem o mesmo nível de tensão, temos:

$$V = V_R = V_C$$

Onde:

$V_R$  é a tensão no resistor em volts (V).

$V_C$  é a tensão no capacitor em volts (V).

Para determinar a corrente em circuitos em paralelo, basta dividir o valor da tensão aplicada em cada componente (neste caso, a mesma em todos) e dividir pela impedância do componente:

$$I_R = \frac{V_R}{R} \quad I_C = \frac{V_C}{-jX_C}$$

Onde:

$I_R$  é a corrente no resistor em ampères (A).

$I_C$  é a corrente no capacitor em ampères (A).

O valor de impedância total para circuitos RC paralelos é obtido por:

$$\frac{1}{Z_T} = \frac{1}{R} + \frac{1}{-jX_C} \quad \text{ou} \quad Z_T = \frac{V_T}{I_T}$$

Veja um exemplo.

## Exemplo

Determine o valor da tensão e da corrente no capacitor e no resistor, e calcule o valor da impedância total do circuito da Figura 2, sendo  $V = 120 \text{ V}/60 \text{ Hz}$ ;  $R = 500 \Omega$  e  $X_C = 100 \Omega$ .

**Resolução:** como os elementos estão em paralelo, a tensão neles é igual:

$$V = V_R = V_C = 120 \text{ V}$$

Vamos considerar o ângulo da tensão como referência para os cálculos:

$$V = 120 \angle 0^\circ \text{ V}$$

Realizamos agora o cálculo das correntes  $I_R$  e  $I_C$ :

$$I_R = \frac{120 \angle 0^\circ}{500 \angle 0^\circ} = 0,24 \angle 0^\circ \text{ A}$$

$$I_C = \frac{120 \angle 0^\circ}{100 \angle -90^\circ} = 1,20 \angle 90^\circ \text{ A}$$

Agora, partimos para o cálculo da corrente  $I_T$ , sendo que o módulo deve ser determinado por:

$$|I_T| = \sqrt{I_R^2 + I_C^2}$$

E o ângulo por:

$$\theta_I = \operatorname{tg}^{-1} \left( \frac{X_C}{R} \right)$$

Assim, obtemos:

$$I_T = I_R + I_C = 0,24 \angle 0^\circ + 1,20 \angle 90^\circ = 1,224 \angle 78,69^\circ \text{ A}$$

Agora, para o cálculo de  $Z_T$  temos:

$$Z_T = \frac{V_T}{I_T} = \frac{120 \angle 0^\circ}{1,224 \angle 78,69^\circ} = 98,058 \angle -78,69^\circ \Omega$$

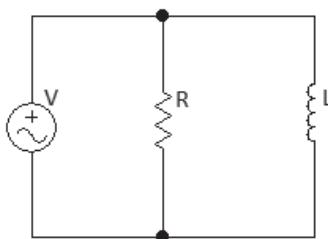
ou

$$\begin{aligned} \frac{1}{Z_T} &= \frac{1}{R} + \frac{1}{jX_C} \rightarrow \frac{1}{Z_T} = \frac{1}{500 \angle 0^\circ} + \frac{1}{100 \angle -90^\circ} \\ Z_T &= 98,058 \angle -78,69^\circ \Omega \end{aligned}$$

**Conclusão:** em circuitos RC paralelos, o valor do ângulo da corrente total é positivo, assim, trata-se de um sistema onde a corrente está adiantada em relação à tensão da fonte. O valor da impedância total do circuito possui ângulo negativo, o que representa a predominância reativa capacitiva no circuito (GUSSOW, 2009).

## Circuitos RL paralelo

O circuito RL paralelo consiste em uma associação de um resistor em paralelo a um indutor, conforme mostrado na Figura 3:



**Figura 3.** Circuito RL paralelo.

*Fonte:* Adaptada de Gussow (2009).

Como os elementos em paralelo recebem o mesmo nível de tensão, temos:

$$V = V_R = V_L$$

Onde:

$V_R$  é a tensão no resistor em volts (V).

$V_L$  é a tensão no indutor em volts (V).

Para determinar a corrente em circuitos em cada elemento, você deve aplicar as seguintes fórmulas:

$$I_R = \frac{V_R}{R} \quad I_C = \frac{V_L}{jX_L}$$

Onde:

$I_R$  é a corrente no resistor em ampères (A).

$I_C$  é a corrente no capacitor em ampères (A).

O valor de impedância total para circuitos RC paralelos é obtido por:

$$\frac{1}{Z_T} = \frac{1}{R} + \frac{1}{jX_L} \quad \text{ou} \quad Z_T = \frac{V_T}{I_T}$$

Veja um exemplo.



## Exemplo

Determine o valor da tensão e da corrente no capacitor e no resistor, e calcule o valor da impedância total do circuito da Figura 3, sendo  $V = 120 \text{ V}$ / $60 \text{ Hz}$ ;  $R = 500 \Omega$  e  $X_L = 100 \Omega$ .

**Resolução:** como os elementos estão em paralelo, a tensão neles é igual:

$$V = V_R = V_L = 120 \text{ V}$$

Vamos considerar o ângulo da tensão como referência para os cálculos:

$$V = 120 \angle 0^\circ \text{ V}$$

Para o cálculo das correntes  $I_R$  e  $I_C$ , temos:

$$I_R = \frac{120 \angle 0^\circ}{500 \angle 0^\circ} = 0,24 \angle 0^\circ \text{ A}$$

$$I_L = \frac{120 \angle 0^\circ}{100 \angle 90^\circ} = 1,20 \angle -90^\circ \text{ A}$$

Agora, partimos para o cálculo da corrente  $I_T$ , sendo que o módulo deve ser determinado por:

$$|I_T| = \sqrt{I_R^2 + (-I_L)^2}$$

E o ângulo por:

$$\theta_I = \operatorname{tg}^{-1} \left( \frac{-X_L}{R} \right)$$

Assim, obtemos:

$$I_T = I_R + I_L = 0,24 \angle 0^\circ + 1,20 \angle -90^\circ = 1,224 \angle -78,69^\circ \text{ A}$$

Agora, vamos para o cálculo de  $Z_T$ :

$$Z_T = \frac{V_T}{I_T} = \frac{120 \angle 0^\circ}{1,224 \angle -78,69^\circ} = 98,058 \angle 78,69^\circ \Omega$$

ou

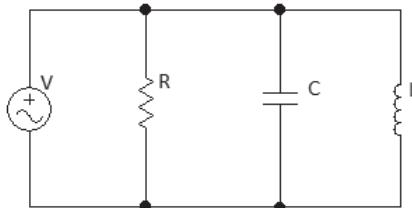
$$\frac{1}{Z_T} = \frac{1}{R} + \frac{1}{jX_L} \rightarrow \frac{1}{Z_T} = \frac{1}{500 \angle 0^\circ} + \frac{1}{100 \angle 90^\circ}$$

$$Z_T = 98,058 \angle 78,69^\circ \Omega$$

**Conclusão:** em circuitos RL paralelos, o valor do ângulo da corrente total é negativo, assim, trata-se de um sistema onde a corrente está atrasada em relação à tensão da fonte. O valor da impedância total do circuito possui ângulo positivo, o que representa a predominância reativa indutiva no circuito (GUSSOW, 2009).

## Circuitos RCL paralelo

O circuito RCL paralelo consiste em uma associação de um resistor, um capacitor e um indutor em paralelo, conforme mostrado na Figura 4:



**Figura 4.** Circuito RCL paralelo.

*Fonte:* Adaptada de Gussow (2009).

Para esse circuito, você vai utilizar as resoluções dos dois últimos exemplos, juntando-as para a constituição da análise do circuito. Como elementos reativos indutivos e capacitivos têm efeitos opostos na corrente, a análise terá como base uma compensação de reatâncias, sendo que a maior determinará qual será o efeito reativo do circuito.

Como os elementos em paralelo recebem o mesmo nível de tensão, temos:

$$V = V_R = V_C = V_L$$

Onde:

$V_R$  é a tensão no resistor em volts (V).

$V_C$  é a tensão no capacitor em volts (V).

$V_L$  é a tensão no indutor em volts (V).

O valor de impedância total para circuitos RC paralelos é obtido por:

$$\frac{1}{Z_T} = \frac{1}{R} + \frac{1}{-jX_C} + \frac{1}{jX_L}$$

ou

$$Z_T = \frac{V_T}{I_T}$$

Veja um exemplo.



## Exemplo

Determine o valor da tensão e da corrente no capacitor e no resistor, e calcule o valor da impedância total do circuito da Figura 4, sendo  $V = 120 \text{ V}/60 \text{ Hz}$ ;  $R = 500 \Omega$ ,  $X_C = 120 \Omega$  e  $X_L = 100 \Omega$ .

**Resolução:** como os elementos estão em paralelo, a tensão neles é igual:

$$V = V_R = V_L = 120 \text{ V}$$

Vamos considerar o ângulo da tensão como referência para os cálculos:

$$V = 120 \angle 0^\circ \text{ V}$$

Para o cálculo das correntes  $I_R$  e  $I_C$ , temos:

$$I_R = \frac{120 \angle 0^\circ}{500 \angle 0^\circ} = 0,24 \angle 0^\circ \text{ A}$$

$$I_C = \frac{120 \angle 0^\circ}{120 \angle -90^\circ} = 1 \angle 90^\circ \text{ A}$$

$$I_L = \frac{120 \angle 0^\circ}{100 \angle 90^\circ} = 1,2 \angle -90^\circ \text{ A}$$

Para o cálculo da corrente  $I_T$ , o módulo deve ser calculado por:

$$|I_T| = \sqrt{I_R^2 + (I_C - I_L)^2}$$

E o ângulo por:

$$\theta_I = \operatorname{tg}^{-1} \left( \frac{X_C - X_L}{R} \right)$$

Assim, obtemos:

$$I_T = I_R + I_C + I_L = 0,24 \angle 0^\circ + 1 \angle 90^\circ + 1,2 \angle -90^\circ = 0,312 \angle -39,80^\circ \text{ A}$$

Para o cálculo de  $Z_T$ , fazemos o seguinte:

$$Z_T = \frac{V_T}{I_T} = \frac{120 \angle 0^\circ}{0,312 \angle -39,80^\circ} = 384,111 \angle 39,80^\circ \Omega$$

ou

$$\frac{1}{Z_T} = \frac{1}{R} + \frac{1}{jX_L} \rightarrow \frac{1}{Z_T} = \frac{1}{500 \angle 0^\circ} + \frac{1}{120 \angle -90^\circ} + \frac{1}{100 \angle 90^\circ}$$

$$Z_T = 384,111 \angle 39,80^\circ \Omega$$

**Conclusão:** em circuitos RCL paralelos, o valor do ângulo da corrente total depende da predominância do circuito. Quanto menor for a reatância de um dos tipos, maior será sua influência na resultante, ou seja, se a reatância indutiva possuir menor valor que a reatância capacitiva, maior será o efeito indutivo no circuito, pois maior será a corrente que passa na indutância do circuito, conforme o exemplo anterior (GUSSOW, 2009).



### Saiba mais

Para saber mais sobre os circuitos filtros passivos, consulte o livro *Circuitos Elétricos* (NILSSON; RIEDEL, 2009).

## Reatâncias em circuitos reais

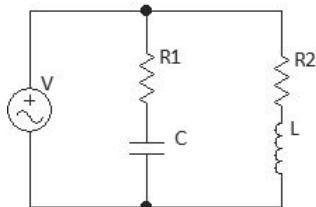
Os circuitos usuais não são constituídos somente de indutâncias. Assim, quando analisamos circuitos RCL paralelo para situações reais, existem resistores associados às indutâncias e capacitâncias. Em caso de acionamento de motores assíncronos, há uma predominância da carga reativa indutiva, mas com uma resistência dos enrolamentos das bobinas. Isso ocasiona uma relação RL, na qual o ângulo da impedância  $\theta$  estará entre 0 e -90°.

Quanto maior for a utilização de cargas com características reativas, maior será o valor da corrente reativa no sistema. A **corrente reativa** não proporciona a entrega de potência ativa ao sistema. Por que isso acontece? Porque ela é um tipo de corrente que aumenta a taxa de ocupação da rede, reduzindo, assim, a possibilidade de entrega de uma maior quantidade de potência ativa.

Para mensurar o quanto críticas são as cargas reativas no sistema, vamos utilizar o **fator de potência (FP)**: quanto maior for o seu valor, mais eficiente, eletricamente, será o circuito.

## Círcuito de ramos RL e RC em paralelo

Os circuitos de ramos RL e RC em paralelo são mais comuns em circuitos reais, e se constituem da associação paralela entre um ramo RL e um ramo RC, conforme mostrado na Figura 5:



**Figura 5.** Circuito de ramos RC e RL em paralelo.

**Fonte:** Adaptada de Gussow (2009).

Para esse circuito, você vai utilizar as resoluções dos dois últimos, juntando-as para a constituição da análise do circuito. Como elementos reativos indutivos e capacitivos têm efeitos opostos na corrente, a análise terá como base uma compensação de reatâncias, sendo que a maior determinará qual será o efeito reativo do circuito.

Como os elementos em paralelo recebem o mesmo nível de tensão, temos:

$$V = V_{R1} + V_C = V_{R2} + V_L$$

Onde:

$V_{R1}$  = é a tensão no resistor 1 em volts (V);

$V_{R2}$  = é a tensão no resistor 2 em volts (V);

$V_C$  = é a tensão no capacitor em volts (V);

$V_L$  = é a tensão no indutor em volts (V).

Para determinar a corrente em circuitos em paralelo, basta dividir o valor da tensão aplicada em cada componente (neste caso, a mesma em todos) e dividir pela impedância do componente utilizando as seguintes fórmulas:

$$I_R = \frac{V}{R - JX_C} \quad I_C = \frac{V}{R + JX_L}$$

O valor de impedância total para circuitos RC paralelos é obtido por:

$$\frac{1}{Z_T} = \frac{1}{R - jX_C} + \frac{1}{R + jX_L}$$

ou

$$Z_T = \frac{V_T}{I_T}$$

Veja um exemplo.



### Exemplo

Determine o valor da tensão e da corrente no capacitor e no resistor, e calcule o valor da impedância total do circuito da Figura 5, sendo  $V = 120 \angle 0^\circ$  V/60 Hz;  $R_1 = 10 \Omega$ ,  $R_2 = 8 \Omega$ ,  $X_C = 40 \Omega$  e  $X_L = 30 \Omega$ .

**Resolução:** Como os elementos estão em paralelo, a tensão neles é igual:

$$V = V_{R1} + V_C = V_{R2} + V_L$$

Vamos considerar o ângulo da tensão como referência para os cálculos:

$$V = 120 \angle 0^\circ$$

As resistências equivalentes dos ramos  $Z_{RC}$  e  $Z_{RL}$  são calculadas por:

$$|Z_T| = \sqrt{R^2 + X^2}$$

E o ângulo por:

$$\theta_Z = \operatorname{tg}^{-1} \left( \frac{X}{R} \right)$$

Assim, obtemos:

$$Z_{RC} = Z_{R1} + Z_C = 10 \angle 0^\circ + 40 \angle -90^\circ = 41,231 \angle -75,96^\circ \Omega$$

$$Z_{RL} = Z_{R2} + Z_L = 8 \angle 0^\circ + 30 \angle 90^\circ = 31,048 \angle 75,07^\circ \Omega$$

Para o cálculo das correntes  $I_R$  e  $I_C$  temos:

$$I_{RC} = \frac{120 \angle 0^\circ}{41,231 \angle -75,96^\circ} = 2,910 \angle 75,96^\circ A$$

$$I_{RL} = \frac{120 \angle 0^\circ}{31,048 \angle 75,07^\circ} = 3,865 \angle -75,07^\circ A$$

Para o cálculo da corrente  $I_T$ , o módulo deve ser calculado por:

$$|I_T| = \sqrt{I_R^2 + (I_C - I_L)^2}$$

E o ângulo por:

$$\theta_I = \operatorname{tg}^{-1} \left( \frac{X_C - X_L}{R} \right)$$

Assim obtemos:

$$I_T = I_{RC} + I_{RL} = 2,910 \angle 75,96^\circ + 3,865 \angle -75,07^\circ = 1,930 \angle -28,16^\circ A$$

Agora fazemos o cálculo de  $Z_T$  utilizando:

$$Z_T = \frac{V_T}{I_T} = \frac{120 \angle 0^\circ}{1,930 \angle -28,16^\circ} = 62,17 \angle 28,16^\circ \Omega$$

ou

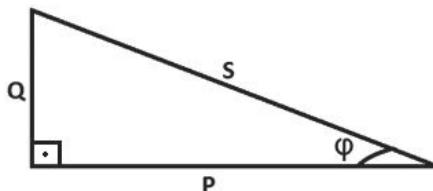
$$\frac{1}{Z_T} = \frac{1}{R - JX_C} + \frac{1}{R + JX_L} \rightarrow \frac{1}{Z_T} = \frac{1}{41,231 \angle -75,96^\circ} + \frac{1}{31,048 \angle 75,07^\circ}$$

$$Z_T = 62,17 \angle 28,16^\circ \Omega$$

**Conclusão:** Em circuitos com ramos RC e RL paralelos, define-se como predominância do circuito a corrente do ramo de maior valor, associada a seu ângulo. Esse tipo de circuito é usual quando se deseja atenuar os efeitos reativos de uma instalação ao inserir em paralelo com o circuito uma carga reativa contrária (GUSSOW, 2009).

## Fator de potência

O fator de potência (FP) é a relação entre a quantidade de potência ativa consumida em relação à potência total, aparente. Esse valor é obtido pelo cosseno do ângulo do triângulo de potências da Figura 6, sendo que P é a potência ativa consumida, Q é a potência reativa, e S é a potência total (MARKUS, 2001).



**Figura 6.** Triângulo de potências.

*Fonte:* Adaptada de Markus (2001).

Sabendo que as potências são provenientes dos respectivos elementos, ou seja, a **potência ativa** é proveniente de **resistências**, e a **potência reativa** é proveniente de **reatâncias**, temos:

$$S = V \cdot I$$

$$P = V_R \cdot I_R$$

$$Q = V_X \cdot I_X$$

Podemos calcular o fator de potência pelas seguintes fórmulas:

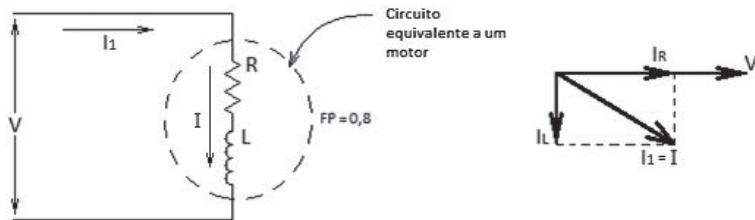
$$FP = \frac{P}{S} = \cos(\varphi)$$

## Correção do fator de potência

Para realizar o mesmo trabalho em sistemas alimentados por energia elétrica, não podemos reduzir a potência ativa do circuito. Sendo assim, como a potência reativa pode ser reduzida para que haja uma redução consequente na potência aparente do sistema? O ângulo  $\varphi$  representa o quanto eficiente é a instalação: quanto menor for seu valor, menor será o consumo reativo da instalação. A correção do fator de potência ocorre com esse princípio: quando a intenção é reduzir o consumo reativo para que haja uma redução da corrente que circula nos circuitos da instalação.

Para permitir a redução do consumo reativo da instalação, utilizamos o método de instalação paralela de elementos de reatância contrária. Será essa reatância que reduzirá o consumo reativo total do sistema.

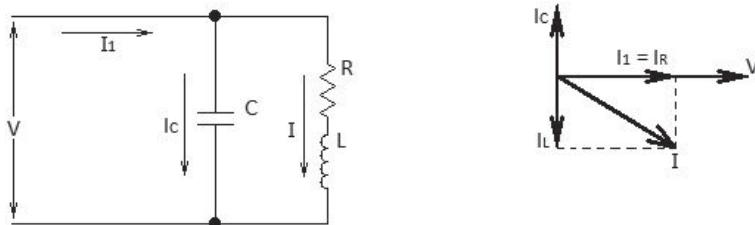
Um exemplo típico da correção do fator de potência é a aplicação desse sistema em motores elétricos, conforme representado na Figura 7, cuja carga indutiva provoca um baixo fator de potência da instalação (GUSSOW, 2009).



**Figura 7.** Exemplo de carga com baixo fator de potência.

*Fonte:* Adaptada de Gussow (2009).

Para a correção do fator de potência por excesso de reativo indutivo, utilizamos a instalação de elementos capacitivos em paralelo, como o circuito da Figura 8, no qual a corrente reativa devida à presença de elemento reativo indutivo é suprida pela corrente reativa capacitativa do elemento de correção do fator de potência.



**Figura 8.** Correção do fator de potência com a instalação de capacitor em paralelo.

*Fonte:* Adaptada de Gussow (2009).

A correção do fator de potência é bem ilustrada pela Figura 8, na qual o elemento capacitivo compensa toda a corrente reativa indutiva do motor. No entanto, em aplicações industriais, a correção completa do fator de potência não é utilizada, devido à normatização nacional, que estabelece valores aceitáveis de FP próximos a 1 (podendo haver tolerância), o que facilita o controle dessa grandeza (WEG, 2015).



## Exemplo

Instalações elétricas industriais possuem cargas com característica predominantemente indutiva, devido à grande utilização de motores de indução. Em caso de baixo valor de fator de potência em instalações deste tipo, é comum a utilização de bancos de capacitores em paralelo com as cargas para a correção do fator de potência. A compensação de potência reativa indutiva deve ser realizada com a utilização de cargas capacitivas (WEG, 2015).



## Exercícios

1. Leia as seguintes afirmações e assinale a alternativa que apresenta as respostas corretas:
  - I. Em CA, em circuitos resistivos em paralelo, a corrente está em fase com a tensão. Se temos componente indutiva em paralelo, esta estará atrasada 90 graus em relação à tensão.
  - II. Para o capacitor, em um circuito RC paralelo, a corrente está adiantada de 90 graus em relação à tensão.
  - III. Em um circuito LC paralelo, a tensão é a mesma e estão em fase. A corrente no indutor está atrasada 90 graus da tensão, e a corrente através do capacitor está adiantada 90 graus em relação à tensão.

**a)** Apenas I.  
**b)** Apenas II.  
**c)** Apenas III.  
**d)** Todas as afirmações estão corretas.
2. No diagrama fasorial de circuito LC paralelo em corrente alternada, as componentes indutiva e capacitativa estão defasadas entre si de:
  - a) 90°.
  - b) 120 °.
  - c) 180°.
  - d) 200°.

**e)** Nenhuma das alternativas.
3. Em circuitos paralelos em corrente alternada, devido ao diagrama fasorial entre as componentes capacitiva e indutiva, qual efeito se pode ter em relação às reatâncias  $X_L$  e  $X_c$ ?
  - a) Não tem efeito algum entre  $X_L$  e  $X_c$ .
  - b) Como estão defasadas em 180°, podem se anular  $X_L$  e  $X_c$ .
  - c) Podem se somar  $X_L$  e  $X_c$ .
  - d) São defasadas em 90° e têm a diagonal como reatância resultante.

- e) Nenhuma das alternativas.
4. Quando  $X_L = X_C$  se anulam. A isso denominamos:
- a) Reatância.
  - b) Ressonância ou sintonia.
  - c) Fator de potência.
  - d) Filtro passa-baixa.
  - e) Filtro passa-faixa

5. Em uma indústria com muitos motores de carga indutiva, o que deve ser feito para diminuir a componente indutiva?
- a) Colocar resistores em série.
  - b) Colocar resistores em paralelo.
  - c) Colocar indutores em paralelo.
  - d) Colocar capacitores em paralelo.
  - e) Nenhuma das alternativas.



## Referências

BOYLESTAD, R. L. *Introdução à análise de circuitos*. 10. ed. São Paulo: Pearson Education, 2011.

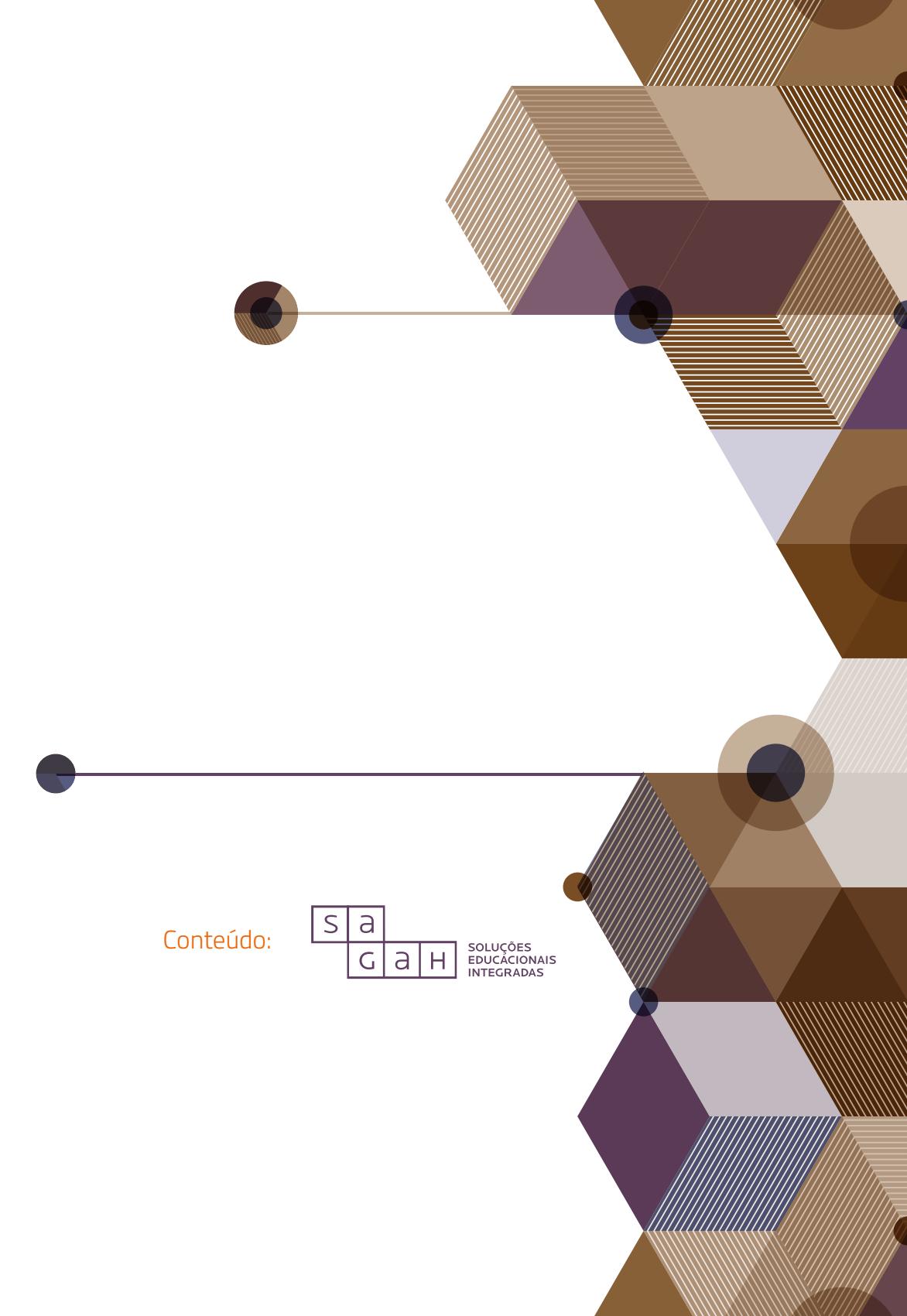
GUSSOW, M. M. S. *Eletrociadade básica*. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009. (Coleção Schaum).

MARKUS, O. *Circuitos elétricos: corrente contínua e corrente alternada*. São Paulo: Érica, 2001.

NILSSON, J. W.; RIEDEL, S. A. *Circuitos elétricos*. 8. ed. São Paulo: Pearson Education, 2009.

WEG. *Manual para correção do fator de potência*. Jaraguá: WEG, 2015. Disponível em: <<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-correcao-do-fator-de-potencia-958-manual-portugues-br.pdf>>. Acesso em: 05 jan. 2017.

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



## DICA DO PROFESSOR

Quando um circuito de corrente alternada tem componentes de resistência, indutância e capacidade, ligados em paralelo, as características associadas aos circuitos em paralelo se aplicam. As quedas de tensão através de cada um dos componentes estão em fase entre si e são iguais em módulo ao valor da tensão aplicada da fonte. As correntes, entretanto, não estão em fase e vão variar em módulo, de acordo com as regras de circuitos CA paralelos.

Vamos acompanhar mais detalhes no vídeo.

Conteúdo interativo disponível na plataforma de ensino!



## EXERCÍCIOS

1) Para as afirmações abaixo, é correto afirmar que:

- I - Em CA, em circuitos resistivos em paralelo, a corrente está em fase com a tensão. Se temos componente indutiva em paralelo, esta estará atrasada 90 graus em relação à tensão.
- II - Para o capacitor, em um circuito RC paralelo, a corrente está adiantada de 90 graus em relação à tensão.
- III - Em circuito LC paralelo, a tensão é a mesma e estão em fase. A corrente no indutor está atrasada 90 graus da tensão, e a corrente através do capacitor está adiantada 90 graus em relação à tensão.

A) Apenas a I.

B) Apenas II.

C) Apenas a III.

- D) Todas afirmativas anteriores estão corretas.
- E) Nenhuma das alternativas.
- 2) **No diagrama fasorial de circuito LC paralelo em corrente alternada, as componentes indutiva e capacitiva estão defasadas entre si de:**
- A) 90 graus.
- B) 120 graus.
- C) 200 graus.
- D) 180 graus.
- E) Nenhuma das alternativas
- 3) **Em circuitos paralelos em corrente alternada, devido ao diagrama fasorial entre as componentes capacitiva e indutiva, qual efeito que se pode ter em relação às reatâncias  $X_C$  e  $X_L$ ?**
- A) Não tem nenhum efeito entre  $X_L$  e  $X_C$ .
- B) Como estão defasadas em 180 graus, podem se anular  $X_L$  e  $X_C$ .
- C) Podem se somar  $X_L$  e  $X_C$ .
- D) São defasadas em 90 graus, e tem a diagonal como reatância resultante.

E) Nenhuma das alternativas.

4) Quando  $Xl = Xc$ , se anulam. A isto denominamos:

A) Reatância.

B) Ressonância ou sintonia.

C) Fator de potência.

D) Filtro passa-baixa.

E) Filtro passa-faixa

5) Em uma indústria, com muitos motores de carga indutiva, o que deve ser feito para diminuir a componente indutiva?

A) Colocar resistores em série.

B) Colocar resistores em paralelo.

C) Colocar indutores em paralelo.

D) Colocar capacitores em paralelo.

E) Nenhuma das alternativas.



NA PRÁTICA

**Circuitos RLC são usados na prática em aplicações onde envolvem as reatâncias.**

Como um motor, que é muito utilizado

**50 %** da energia consumida é devido a motores na indústria

Os motores são fortes cargas indutivas. Quando ligados na rede, esta vai ter componentes indutivas.

O mesmo é válido para qualquer carga indutiva, como transformadores, solenóides, etc.

A carga indutiva força um fator de potência menor que 1, e se for menor que 0,91, a concessionária de energia irá sobretaxar o consumidor.

Neste caso, o uso de banco de capacitores neutraliza, ou aumenta o fator de potência, que deve ficar sempre superior a 0,91.

Outro exemplo de aplicação são circuitos de sintonia, LC, chamados de circuito tanque. A sintonia é quando a reatância indutiva é igual à capacitativa, e este circuito é chamado passa-faixa. A recepção de estações de rádio funcionam assim (circuitos analógicos passivos).



**SAIBA MAIS**

Para ampliar o seu conhecimento a respeito desse assunto, veja abaixo as sugestões do professor:

#### **RLC30 - Circuito RLC Paralelo**

Conteúdo interativo disponível na plataforma de ensino!

#### **Círculo RLC Paralelo**

Conteúdo interativo disponível na plataforma de ensino!

#### **Circuitos RLC série e em paralelo**

Conteúdo interativo disponível na plataforma de ensino!

#### **Rádio de galena**

Conteúdo interativo disponível na plataforma de ensino!

# Sistemas trifásicos equilibrados



## APRESENTAÇÃO

Você sabia que os sistemas trifásicos são utilizados nos processos de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica? As cargas de grande potência são tendencialmente trifásicas, assim ocasionando o equilíbrio de consumo entre as fases, o que proporciona um funcionamento assertivo do fornecimento da energia elétrica.

Nesta Unidade de Aprendizagem, você vai conhecer os sistemas trifásicos equilibrados a fim de interpretar suas características e suas peculiaridades.

Bons estudos.

**Ao final desta Unidade de Aprendizagem, você deve apresentar os seguintes aprendizados:**

- Caracterizar os sistemas trifásicos e seus componentes funcionais.
- Diferenciar os possíveis métodos de fechamentos trifásicos e suas características.
- Obter os valores de potências de circuitos trifásicos equilibrados.



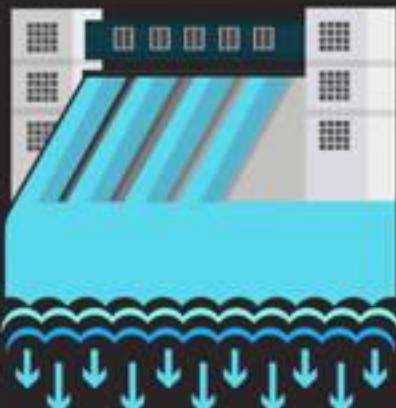
## INFOGRÁFICO

Você sabia que a aplicação dos sistemas trifásicos garante uma série de vantagens se comparada com a de sistemas como os monofásicos e de corrente contínua?

Para ilustrar as vantagens de cada nível de aplicação, o Infográfico exemplifica e descreve as características dos sistemas trifásicos. Confira!

**1**

Máquinas trifásicas de geração têm rendimento maior do que máquinas monofásicas e maior facilidade de operação e manutenção que máquinas de corrente contínua!



**3**

A maior carga industrial é formada por motores, sendo que motores trifásicos têm torque constante, característica ausente em motores monofásicos, e baixo custo de aquisição, operação e manutenção, se comparados com motores de corrente contínua.



**2**

O sistema trifásico possibilita um transporte de energia elétrica maior do que os sistemas monofásicos e uma maior flexibilidade de utilização que os sistemas de corrente contínua.



## CONTEÚDO DO LIVRO

Os sistemas trifásicos são utilizados nos processos de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Normalmente, as cargas de grande potência são trifásicas, propiciando, assim, o equilíbrio de consumo entre as fases. Isso garante um funcionamento eficiente do fornecimento da energia elétrica.

No capítulo Sistemas trifásicos Equilibrados, do livro *Instalações elétricas*, você vai conhecer os sistemas trifásicos equilibrados a fim de interpretar suas características e peculiaridades.

Boa leitura.

# ELETROTÉCNICA

Eliane Dalla Coletta



SOLUÇÕES  
EDUCACIONAIS  
INTEGRADAS

# Sistemas trifásicos equilibrados

## Objetivos de aprendizagem

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

- Caracterizar os sistemas trifásicos e seus componentes funcionais.
- Diferenciar os possíveis métodos de fechamentos trifásicos e suas características.
- Obter os valores de potências de circuitos trifásicos equilibrados.

## Introdução

Você sabia que os sistemas trifásicos são utilizados nos processos de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica? As cargas de grande potência são tendencialmente trifásicas, ocasionando, assim, o equilíbrio de consumo entre as fases. Isso proporciona um funcionamento assertivo do fornecimento da energia elétrica. Neste capítulo você vai conhecer os sistemas trifásicos equilibrados a fim de interpretar suas características e peculiaridades.

## Características e componentes do sistema trifásico

Os sistemas trifásicos são utilizados nos processos de geração, transmissão e distribuição de energia. O sistema possui três fases, cujas tensões possuem formato senoidal e são defasadas  $120^\circ$  entre si.

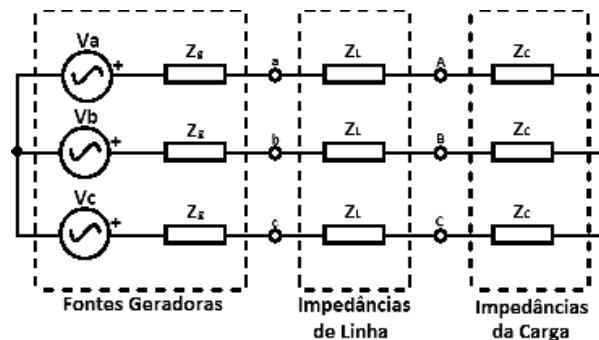
Este tipo de sistema proporciona várias vantagens, como a mudança de nível de tensão de aplicação pela mudança da ligação no gerador ou na carga, e

a possibilidade de transmissão/distribuição de energia com apenas três cabos, sem a utilização de condutor neutro.

Um sistema trifásico é considerado **equilibrado** se:

- no sistema de geração, as três fases forem geradas com as **mesmas características de amplitude e frequência**.
- os cabos que levam energia da fonte geradora às cargas tiverem a **mesma impedância**.
- as cargas conectadas ao sistema de alimentação tiverem o **mesmo valor de impedância nas três fases**.

Você pode verificar essas características na Figura 1, em que um sistema trifásico é representado por meio de fontes geradoras ligadas em estrela. A carga também está ligada em estrela, sendo as impedâncias de linha representadas por  $Z_L$ , e as impedâncias da carga, por  $Z_C$ .



**Figura 1.** Circuito trifásico com suas componentes.

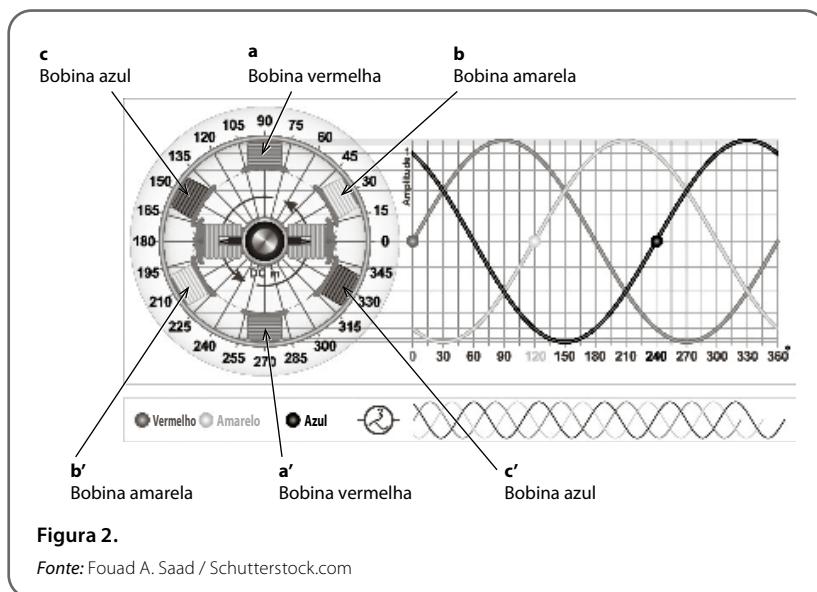
## Geração trifásica

A geração de energia é comumente realizada por meio de três fases de tensão alternada, as quais são obtidas utilizando um gerador trifásico.

Você vai ver agora detalhes importantes do funcionamento de um gerador trifásico, começando pela definição de suas partes principais. O **rotor** do gerador trifásico nada mais é do que as bobinas elétricas presentes no eixo da máquina elétrica. O rotor é excitado por alimentação em corrente contínua externa, emitindo um fluxo magnético fixo ao seu redor. Quando este rotor inicia o seu

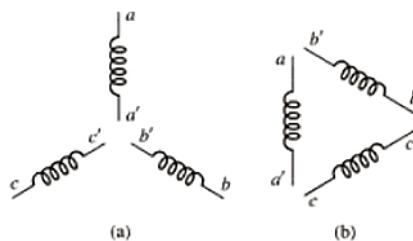
movimento, surge uma variação de campo magnético referente ao movimento, em relação às partes estáticas do motor. De acordo com o **princípio de Faraday da indução eletromagnética**, em um condutor de corrente elétrica submerso em um campo magnético variante, surge uma força eletromotriz entre seus terminais.

Os condutores, nos quais as tensões são induzidas no gerador trifásico, se encontram no **estator**, que nada mais é do que o conjunto de bobinas presentes na parte fixa da máquina elétrica, isto é, da máquina geradora. Os condutores são denominados **enrolamentos de armadura**, sendo que a defasagem de  $120^\circ$  entre as tensões das fases é criada a partir da posição das bobinas no rotor. Lembre-se de que essas bobinas estão localizadas no estator com uma distância geométrica de  $120^\circ$  (UMANS, 2014). Você pode observar as características descritas na Figura 2.



**Figura 2.**

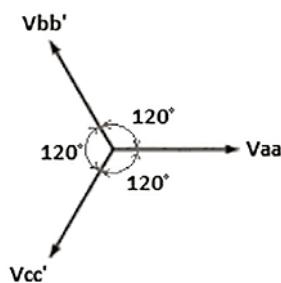
*Fonte:* Fouad A. Saad / Shutterstock.com



**Figura 3.** Representação esquemática das bobinas.

Fonte: Fitzgerald, Kingsley Jr. e Umans (2006, p. 594).

Os geradores possuem três bobinas. São essas bobinas que fornecerão as três fases com tensões defasadas  $120^\circ$  entre si. O diagrama fasorial da Figura 4 representa essas três fases.



**Figura 4.** Representação dos fasores das tensões de fase geradas.

As tensões representadas são tensões obtidas diretamente dos terminais de cada bobina do gerador, conforme a Figura 3, e são denominadas **tensões de fase** (MARCOS, 2001).

Essas tensões são definidas matematicamente por seus fasores:

$$V_{aa'} = V_p \angle 0^\circ$$

$$V_{bb'} = V_p \angle -120^\circ$$

$$V_{cc'} = V_p \angle 120^\circ$$

## Cargas trifásicas balanceadas

Para que as cargas trifásicas ligadas no sistema trifásico sejam平衡adas, é necessário que suas três impedâncias possuam valores de módulo e fase **iguais**. As cargas industriais comumente são trifásicas, possibilitando uma facilidade de equilíbrio do sistema de consumo de energia (MARCOS, 2001).

Um exemplo típico é o motor trifásico de indução, em que as impedâncias dos seus enrolamentos devem estar balanceadas para permitir seu correto funcionamento (WEG, 2015).



### Saiba mais

Para saber mais sobre geradores síncronos trifásicos, consulte o livro *Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley* (UMANS, 2014).

## Tipos de ligação em sistemas trifásicos

Para a ligação de cargas e fontes geradoras trifásicas no sistema trifásico, é possível conexões dos tipos **estrela** e **triângulo**. São essas ligações que possibilitam a aplicação de equipamentos de níveis de tensão diferentes ao mesmo sistema.

Para a análise das ligações dos sistemas trifásicos, é necessário diferenciar as grandezas de fase das grandezas de linha. A seguir você vai saber como realizar essa análise.

As **grandezas de fase** estão relacionadas a apenas uma das três impedâncias (no caso de cargas), ou a apenas uma das três fontes geradoras (no caso de geradores). Outros conceitos importantes são os seguintes:

- **Tensão de fase:** Tensão presente em apenas uma das impedâncias (no caso de cargas), ou a apenas uma das três fontes geradoras (no caso de geradores).
- **Corrente de fase:** corrente que percorre as impedâncias (no caso de cargas), ou que percorre as três fontes geradoras (no caso de geradores).

As **grandezas de linha** são as grandezas presentes nas linhas de transporte de energia. Outros conceitos importantes são os seguintes:

- **Tensão de linha:** diferença de potencial entre fases.
- **Corrente de linha:** corrente que percorre as linhas de transporte de energia.

## Ligaçāo estrela

Considerando os terminais das bobinas de acordo com a Figura 3, para realizar o fechamento estrela é necessária a união dos terminais  $a'$ ,  $b'$  e  $c'$ . A conexão das fases é realizada por meio dos terminais  $a$ ,  $b$  e  $c$ . Você consegue ver essa ligação na Figura 5.

Essa ligação possibilita uma elevação da tensão entregue ao sistema, pois a tensão de fornecimento é a diferença de potencial entre as fases. Como vimos há pouco nos conceitos importantes, as tensões entre fases são denominadas **tensão de linha** (UMANS, 2014).

$$\dot{V}_{ab} = \dot{V}_{aa'} - \dot{V}_{bb'} \Rightarrow \dot{V}_{ab} = (V_F \angle 0^\circ) - (V_F \angle -120^\circ) \Rightarrow \dot{V}_{ab} = V_F \cdot \sqrt{3} \angle 30^\circ$$

$$\dot{V}_{ca} = \dot{V}_{cc} - \dot{V}_{aa'} \Rightarrow \dot{V}_{ca} = (V_F \angle 120^\circ) - (V_F \angle 0^\circ) \Rightarrow \dot{V}_{ca} = V_F \cdot \sqrt{3} \angle 150^\circ$$

$$\dot{V}_{bc} = \dot{V}_{bb'} - \dot{V}_{cc} \Rightarrow \dot{V}_{bc} = (V_F \angle -120^\circ) - (V_F \angle 120^\circ) \Rightarrow \dot{V}_{bc} = V_F \cdot \sqrt{3} \angle -90^\circ$$

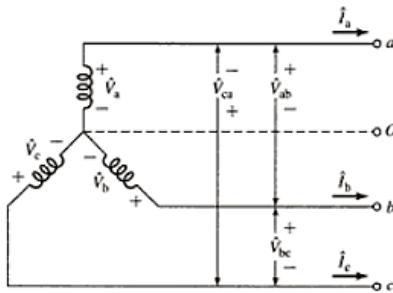
O que não acontece em se tratando das correntes. A corrente que passa na bobina do gerador é igual à corrente que circula nas linhas. Essa situação também é ilustrada na Figura 5.

$$I_a = I_{aa}$$

$$I_b = I_{bb}$$

$$I_c = I_{cc}$$

A obtenção da tensão de linha pelo cálculo da diferença dos potenciais pode ser confirmada pela análise fasorial das tensões de fase. Isso é demonstrado na Figura 6.



**Figura 5.** Conexão trifásica estrela.

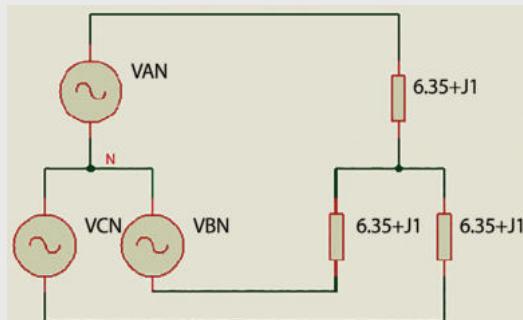
**Fonte:** Fitzgerald, Kingsley Jr. e Umans (2006, p. 595).



## Exemplo

Uma fonte de tensão trifásica equilibrada conectada em Estrela (Y) possui tensão de fase  $V_{an} = 127\angle 30^\circ$ . Essa fonte está conectada a uma carga equilibrada conectada em Y com impedância de  $(6.35+j1)$  Ω por fase. Determine as tensões de fase e as correntes de linha do sistema.

Solução:



$$V_{an} = 120\angle 30^\circ$$

$$V_{bn} = 120\angle -120 + 30^\circ = 120\angle -90^\circ V$$

$$V_{bn} = 120\angle +120 + 30^\circ = 120\angle 150^\circ V$$

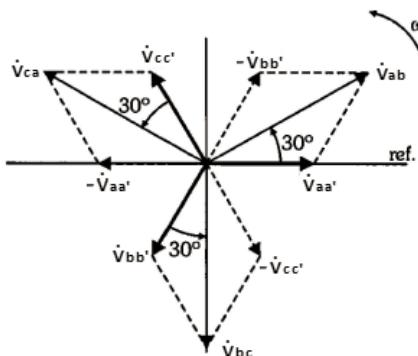
$$I_a = \frac{V_{an}}{Z_y}$$

$$Z_y = 6,35 + j1 = 6,42\angle 8,95^\circ \Omega$$

$$I_a = \frac{127\angle 30^\circ}{6,42\angle 8,95^\circ} = 19,75\angle 21,05^\circ A$$

$$I_b = I_a\angle -120 + 21,05^\circ = 19,75\angle -98,95^\circ A$$

$$I_c = I_a\angle +120 + 21,05^\circ = 19,75\angle 141,05^\circ A$$



**Figura 6.** Aplicação da regra do paralelogramo para obtenção das tensões de linha.

*Fonte:* Adaptada de Marcos (2001, p. 256).

Sendo assim, os equipamentos trifásicos ligados em estrela possibilitam a utilização de níveis de tensão de linha superiores em relação à tensão de fase, modificando o ângulo dessa tensão em mais  $30^\circ$ , e mantendo o valor da corrente de linha igual à corrente de fase.

## Ligaçāo triângulo

A ligação de componentes trifásicos em triângulo é realizada por meio da união entre bobinas conectando os terminais  $a$  com  $c'$ ,  $b$  com  $a'$  e  $c$  com  $b'$ , não havendo o surgimento de um terminal comum. A disponibilização das fases se dá por meio dos terminais  $a$ ,  $b$  e  $c$ . Essa ligação é demonstrada na Figura 7 (UMANS, 2014).

Neste tipo de ligação, a tensão de linha é igual à tensão de fase:

$$\dot{V}_{ab} = \dot{V}_{aa'}$$

$$\dot{V}_{ab} = \dot{V}_{aa'}$$

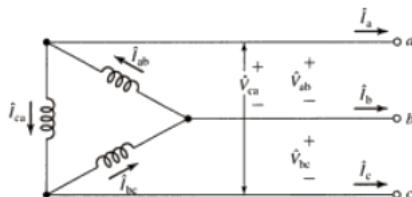
$$\dot{V}_{ab} = \dot{V}_{aa'}$$

Mas, a corrente que circula na linha é **maior** que a corrente que circula na fase:

$$I_a = I_{ab} - I_{ca} \Rightarrow I_a = (I_F \angle 0^\circ) - (I_F \angle 120^\circ) \Rightarrow I_a = I_F \cdot \sqrt{3} \angle 30^\circ$$

$$I_b = I_{bc} - I_{ab} \Rightarrow I_b = (I_F \angle -120^\circ) - (I_F \angle 120^\circ) \Rightarrow I_b = I_F \cdot \sqrt{3} \angle 150^\circ$$

$$I_c = I_{ca} - I_{bc} \Rightarrow I_c = (I_F \angle 0^\circ) - (I_F \angle 120^\circ) \Rightarrow I_c = I_F \cdot \sqrt{3} \angle -90^\circ$$



**Figura 7.** Conexāo trifásica triângulo.

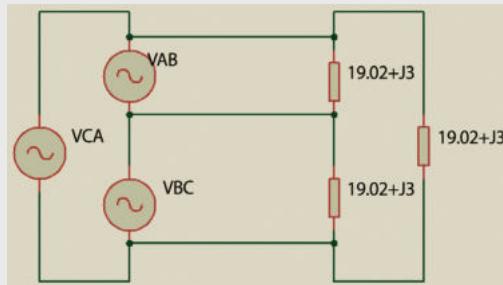
Fonte: Umans (2014, p. 595).



## Exemplo

Uma fonte de tensão trifásica equilibrada conectada em Delta ( $\Delta$ ) possui tensão de fase  $V_{ab} = 220\angle 30^\circ V$ . Essa fonte está conectada a uma carga equilibrada conectada em  $\Delta$  com impedância de  $(19,02+j3) \Omega$  por fase. Determine as correntes de fase e as correntes de linha do sistema.

Solução:



$$Z_\Delta = 19,02 + j3 = 19,25\angle 8,96^\circ \Omega$$

$$I_{AB} = \frac{220\angle 30^\circ}{19,25\angle 8,96^\circ} = 11,17\angle 8,95^\circ A$$

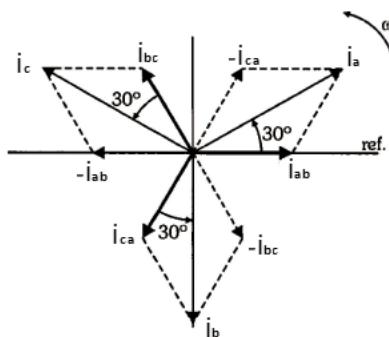
$$I_{BC} = I_{AB}\angle -120 + 8,95^\circ = 11,17\angle -111,05^\circ A$$

$$I_{CA} = I_{AB}\angle +120 + 8,95^\circ = 11,17\angle 128,95^\circ A$$

$$I_a = I_{AB} - I_{CA} = 11,17\angle 8,95^\circ - 11,17\angle 128,95^\circ = 19,35\angle -21,05^\circ$$

$$I_b = I_{BC} - I_{AB} = 11,17\angle -111,05^\circ - 11,17\angle 8,95^\circ = 19,35\angle -141,05^\circ$$

$$I_c = I_{CA} - I_{BC} = 11,17\angle 128,95^\circ - 11,17\angle -111,05^\circ = 19,35\angle 98,95^\circ$$



**Figura 8.** Aplicação da regra do paralelogramo para obtenção das correntes de linha.

Fonte: Adaptada de Marcos (2001, p. 256).

Assim, os equipamentos trifásicos ligados em triângulo possibilitam a utilização do nível de tensão trifásica de linha igual à tensão de fase. A elevação ocorre no nível da corrente de linha em relação à corrente de fase, modificando o ângulo dessa tensão em mais  $30^\circ$  (MARCOS, 2001).

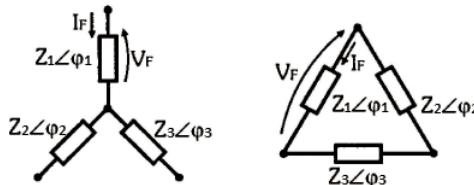


### Fique atento

As cargas que possuem características reativas criam defasagens entre a tensão de linha e a corrente de linha. Mas, mesmo em cargas puramente resistivas, é comum uma defasagem de  $30^\circ$  entre a tensão e a corrente de fase, devido à variação de apenas uma das grandezas de fase para linha, à tensão na ligação estrela e à corrente na ligação triângulo.

## Cálculo de potências para os sistemas trifásicos equilibrados

Os sistemas trifásicos são capazes de alimentar cargas de consumo três vezes maiores que os sistemas monofásicos. Isso se deve aos métodos de ligação das impedâncias da carga. As expressões de potência evidenciam essa característica. A potência total trifásica é obtida pela soma das potências individuais das impedâncias da carga (MARCOS, 2001).



**Figura 9.** Esquemático de demonstração das grandezas de fase em ligações estrela e triângulo.

**Fonte:** Adaptada de Marcos (2001, p. 260).

O valor da potência aparente de cada impedância pode ser obtido a partir da relação entre a tensão aplicada e a corrente que a percorre. Os valores aplicados individualmente nas impedâncias da carga trifásica são denominados tensão e corrente de fase. A partir disso, é possível determinar o valor da potência aparente utilizando a seguinte fórmula:

$$S_Z = V_F \cdot I_F$$

Para o cálculo da potência trifásica, você soma os valores das potências monofásicas, ou seja, as potências de cada impedância:

$$S_{3\phi} = S_{Z1} + S_{Z2} + S_{Z3}$$

Como os circuitos trifásicos equilibrados possuem os mesmos valores de impedância de carga nas três fases, e os mesmos valores de tensão aplicada em cada uma delas, o valor da potência aparente em cada uma das impedâncias é igual:

$$S_{Z1} = S_{Z2} = S_{Z3}$$

Com isso, é possível obter a potência trifásica das cargas trifásicas平衡adas, levando em consideração a potência de apenas uma das impedâncias da carga:

$$S_{3\phi} = 3 \cdot S_{Z1}$$

$$S_{3\phi} = 3 \cdot V_F \cdot I_F$$

Para o cálculo das potências ativa e reativa, você vai utilizar o valor do ângulo do fator de potência das impedâncias da carga. Como todas as impedâncias de uma carga balanceada possuem mesmo módulo e mesmo ângulo, temos que:

$$\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3$$

Para calcular a potência ativa, você pode utilizar a seguinte fórmula:

$$P_{3\phi} = 3 \cdot V_F \cdot I_F \cdot \cos \varphi$$

E, para calcular a potência reativa, use a seguinte expressão:

$$Q_{3\phi} = 3 \cdot V_F \cdot I_F \cdot \sin \varphi$$

Para utilizar as grandezas de linha para o cálculo das potências trifásicas, as quais normalmente são fornecidas ao usuário nas placas dos equipamentos, você deve prestar atenção aos seguintes itens.

- Em **cargas trifásicas ligadas em triângulo**, a tensão aplicada em cada impedância é a tensão entre fases, denominada tensão de linha. Assim  $V_F = V_L$ , e a corrente que circula nas linhas é maior que a corrente que passa em cada impedância da carga, sendo que  $I_F = \frac{I_L}{\sqrt{3}}$ .

$$S_{3\phi} = 3 \cdot V_L \cdot \frac{I_L}{\sqrt{3}} \rightarrow S_{3\phi} = \frac{3}{\sqrt{3}} \cdot V_L \cdot I_L \rightarrow S_{3\phi} = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L$$

- Em **cargas trifásicas ligadas em estrela**, a tensão aplicada em cada impedância é menor que a tensão entre fases. Assim,  $V_F = \frac{V_L}{\sqrt{3}}$ , e a corrente que circula nas linhas é igual à corrente que passa em cada impedância da carga, sendo que  $I_F = I_L$ .

$$S_{3\phi} = 3 \cdot \frac{V_L}{\sqrt{3}} \cdot I_L \rightarrow S_{3\phi} = \frac{3}{\sqrt{3}} \cdot V_L \cdot I_L \rightarrow S_{3\phi} = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L$$

Com essas demonstrações, fica claro que o cálculo da potência aparente utilizando as grandezas de linha deve ser realizado por meio da seguinte fórmula:

$$S_{3\phi} = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L$$

Para o cálculo das potências ativa e reativa com a tensão e corrente de linha, você vai usar a mesma expressão da potência aparente, considerando o ângulo do fator de potência. A potência ativa é calculada pela seguinte expressão:

$$P_{3\phi} = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L \cdot \cos \varphi$$

Para calcular a potência reativa, você utiliza a seguinte fórmula:

$$Q_{3\phi} = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L \cdot \sin \varphi$$



## Saiba mais

Os motores trifásicos de acionamentos de cargas de necessidade de alta potência, como os moinhos utilizados em cimenteiras, são alimentados pelos sistemas trifásicos que possibilitam a entrega desse alto nível de energia. Para economizar no investimento em cabeamentos para a alimentação destes motores, estes sistemas utilizam altos níveis de tensão. Isso mantém a potência de entrega com a redução da corrente que circula no circuito do acionamento (WEG, 2015).



## Referências

FITZGERAL, A. E.; KINGSLEY JR., C.; UMANS, S. D. *Máquinas elétricas com introdução à eletrônica de potência*. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

MARCOS, O. *Circuitos elétricos: corrente contínua e corrente alternada*. São Paulo: Érica, 2001.

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

WEG. DT-6: motores elétricos assíncronos e síncronos de média tensão – especificação, características e manutenção. Jaraguá do Sul: WEG, 2015. Disponível em: <<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-curso-dt-6-motores-eletricos-assincrono-de-alta-tensao-artigo-tecnico-portugues-br.pdf>>. Acesso em: 27 dez. 2016.

## Leituras recomendadas

ELETROBRÁS ELETRONORTE. *Alternativas não convencionais para transmissão de energia*. Brasília: Eletrobrás Eletronorte, [2016]. Disponível em: <[http://www.eln.gov.br/open-cms/opencms/pilares/tecnologia/pepd/Alternativas\\_Nao-Convencionais\\_para\\_Transmissao\\_de\\_Energia\\_Eletrica.html](http://www.eln.gov.br/open-cms/opencms/pilares/tecnologia/pepd/Alternativas_Nao-Convencionais_para_Transmissao_de_Energia_Eletrica.html)>. Acesso em: 28 dez. 2016.

NAHVI, M.; ADMINISTER, J. A. *Circuitos elétricos*. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2014. (Coleção Schaum).

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

Conteúdo:





## DICA DO PROFESSOR

Nesta Dica do Professor, você vai ver uma abordagem das principais características dos sistemas trifásicos equilibrados, como: suas vantagens em relação aos sistemas monofásicos e aos de corrente contínua; seus tipos de ligações e as peculiaridades de cada uma delas; o cálculo de potências nesses circuitos e suas aplicações. Assista e confira!

Conteúdo interativo disponível na plataforma de ensino!

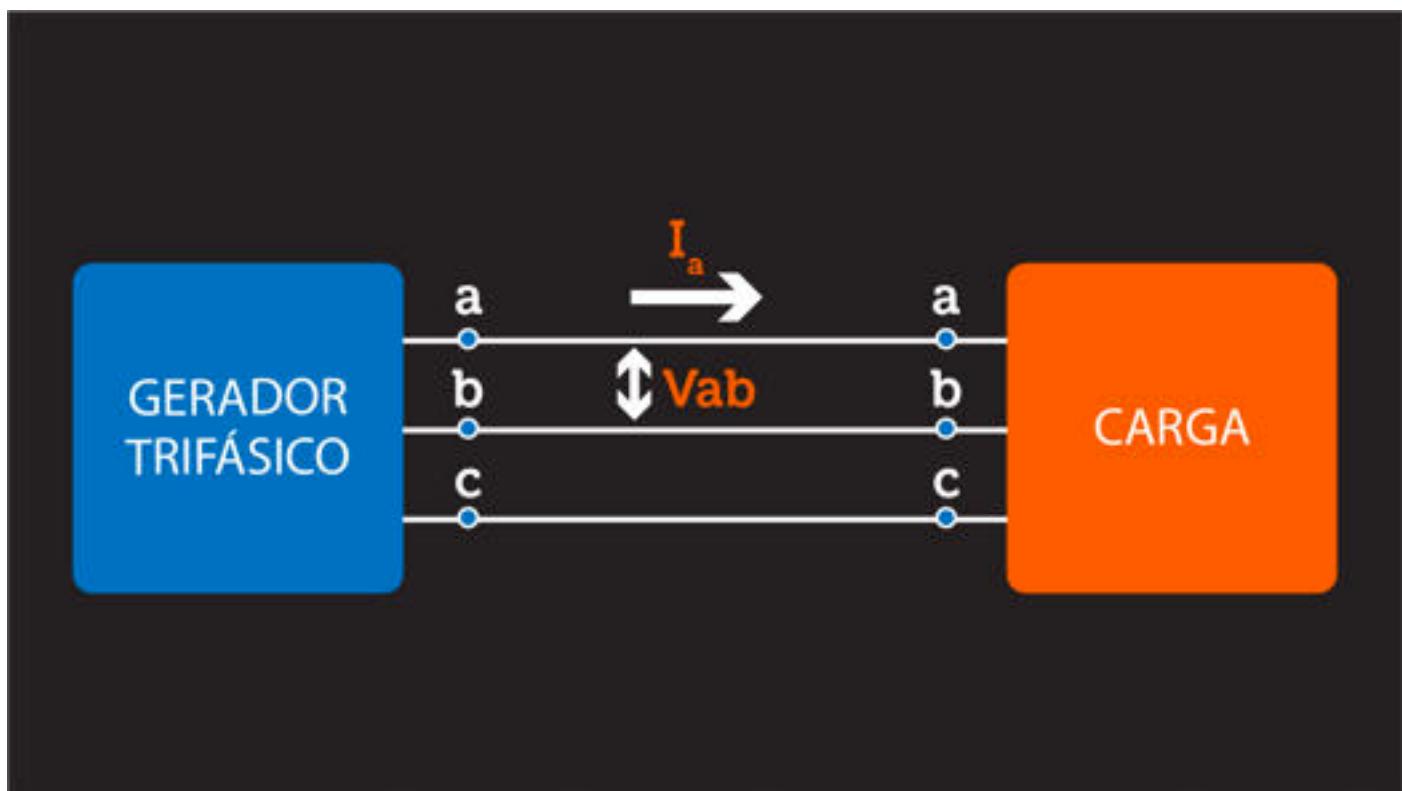


## EXERCÍCIOS

- 1) Uma fonte de tensão trifásica equilibrada conectada em Estrela (Y) possui tensão de fase  $V_{an} = 110\angle 45^\circ V$ . Esta fonte é conectada a uma carga trifásica balanceada conectada em Delta com  $5-j8 \Omega$  por fase. Determine respectivamente, a corrente de fase  $I_{AB}$  e a corrente de linha  $I_a$ .
  - A)  $20,20\angle 133^\circ A$ ,  $34,98\angle 103^\circ A$
  - B)  $30,90\angle 100^\circ A$ ,  $17,84\angle 70^\circ A$
  - C)  $25,30\angle 90^\circ A$ ,  $14,60\angle 60^\circ A$
  - D)  $15,60\angle 75^\circ A$ ,  $9\angle 45^\circ A$
  - E)  $50,60\angle 45^\circ A$ ,  $29,20\angle 15^\circ A$
- 2) Três impedâncias iguais de  $Z = (6,35 + j10) \Omega$  são conectadas em triângulo ao sistema trifásico de tensão equilibrada  $220V$  por fase. Marque a opção que contenha, respectivamente, o módulo da corrente de linha e o fator de potência do circuito.

- A) 10A; 0,52.
- B) 32,5A; 0,73.
- C) 28,15A; 0,866.
- D) 32,1A; 0,88.
- E) 52,33A; 0,63.
- 3) Três impedâncias iguais de  $Z = (6,35 + j10) \Omega$  são conectadas em estrela ao sistema trifásico de tensão equilibrada 220V por fase. Marque a opção que contenha, respectivamente, o módulo da corrente de linha e o fator de potência do circuito.
- A) 18,58 A; 0,53.
- B) 32,5A; 0,73.
- C) 28,15A; 0,866.
- D) 34,26A; 0,93.
- E) 52,33A; 0,63.
- 4) Os sistemas trifásicos possibilitam a variação do nível de tensão a partir da modificação das interconexões entre as partes do circuito. Para que se utilize um motor trifásico alimentado por seu maior nível de tensão, ele deve ser conectado a qual tipo de ligação?
- A) Na conexão estrela, pois nesse tipo de ligação a tensão de linha é igual à tensão de fase.

- B) Na conexão triângulo, pois nesse tipo de ligação a tensão de linha é igual à tensão de fase.
- C) Na conexão estrela, pois essa conexão possibilita que os elementos da carga estejam em série, possibilitando assim, a aplicação do dobro da tensão de alimentação suportada pelas bobinas do motor.
- D) Na conexão estrela, pois que nesse tipo de ligação a tensão de linha é maior que a tensão de fase.
- E) Na conexão triângulo, pois nesse tipo de ligação a tensão de linha é maior que a tensão de fase.
- 5) Uma carga está sendo alimentada por um sistema trifásico de tensão equilibrada 380V. O módulo da corrente, medida "I<sub>a</sub>", dessa carga foi de 152A atrasada 60° em relação à tensão V<sub>ab</sub>, sendo que essa medição foi realizada em um dos três cabos de alimentação do motor. De acordo com os dados fornecidos, marque a opção que contenha, respectivamente, os valores das potências ativa, reativa e aparente do motor.



- A) 86,64 KW; 50,02 KVar; 100,04 KVA.
- B) 50,02 KW; 86,64 KVar; 100,04 KVA.
- C) 150,06 KW; 86,64 KVar; 173,28 KVA.
- D) 50,02 KW; 28,88 KVar; 57,76 KVA.
- E) 100,0 KW; 0 KVar; 100,04 KVA.



## NA PRÁTICA

O sistema elétrico alimenta cargas de diferentes características, sendo que, para o funcionamento correto do sistema, todas as interferências devem ser controladas ou, no mínimo, atenuadas. A utilização de energia elétrica residencial se faz por cargas predominantemente monofásicas, pendente para o desequilíbrio do sistema trifásico.

Conteúdo interativo disponível na plataforma de ensino!



## SAIBA MAIS

Para ampliar o seu conhecimento a respeito desse assunto, veja abaixo as sugestões do professor:

### **Circuitos Trifásicos (Sistemas Equilibrados e Desequilibrados, Grandezas de Fase e Linha)**

Neste vídeo você encontrará uma explicação para grandezas de fase e de linha, circuito trifásico equilibrado e desequilibrado. Confira!

Conteúdo interativo disponível na plataforma de ensino!

## **Tensão de linha e tensão de fase: o que são?**

Assista às definições sobre tensão de linha e tensão de fase. Confira!

**Conteúdo interativo disponível na plataforma de ensino!**

## **Circuitos Elétricos - Aula 8 - Regime Permanente Senoidal**

Nesta aula você revisará o conteúdo sobre sinais senoidais e verá uma introdução ao conceito de fasores, conceitos fundamentais para o estudo de sistemas trifásicos.

**Conteúdo interativo disponível na plataforma de ensino!**