

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° 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 .

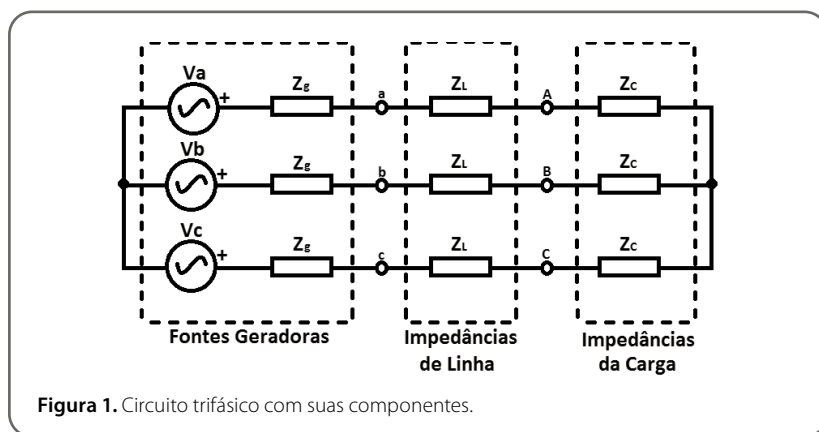


Figura 1. Circuito trifásico com suas componentes.

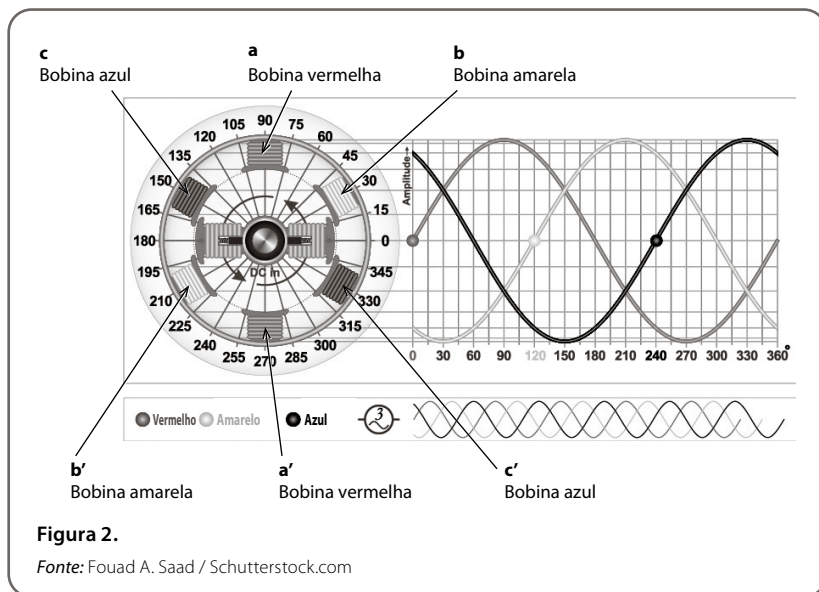
Geração trifásica

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° 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° (UMANS, 2014). Você pode observar as características descritas na Figura 2.



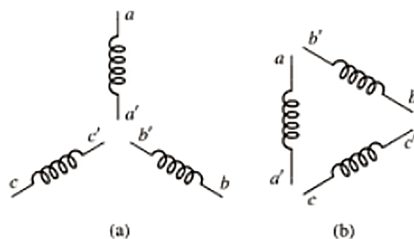


Figura 3. Representação esquemática das bobinas.

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° entre si. O diagrama fasorial da Figura 4 representa essas três fases.

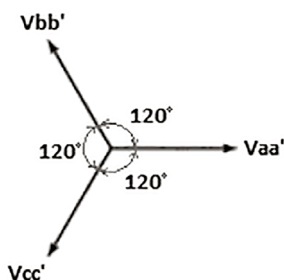


Figura 4. Representação dos fasores das tensões de fase geradas.

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 balanceadas, 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.

Ligação 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.

$$\dot{I}_a = \dot{I}_{aa}$$

$$\dot{I}_b = \dot{I}_{bb}$$

$$\dot{I}_c = \dot{I}_{cc}$$

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.

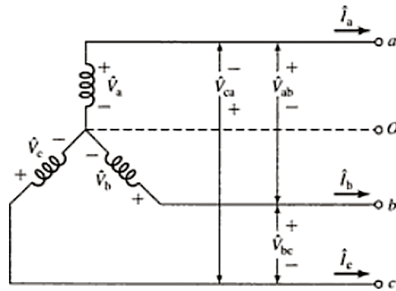


Figura 5. Conexão trifásica estrela.

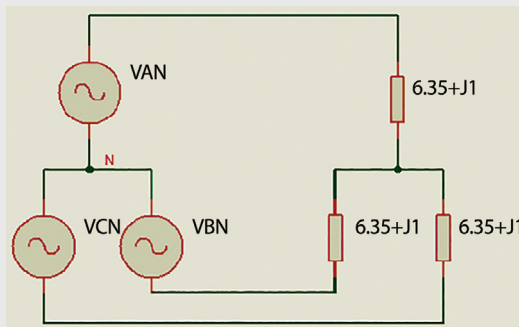
Fonte: Fitzgerald, Kingsley Jr. e Umans (2006, p. 595).



Exemplo

Uma fonte de tensão trifásica equilibrada conectada em Estrela (Y) possui tensão de fase $V_{an} = 127\angle 30^\circ \text{V}$. Essa fonte está conectada a uma carga equilibrada conectada em Y com impedância de $(6,35+j1) \Omega$ por fase. Determine as tensões de fase e as correntes de linha do sistema.

Solução:



$$V_{an} = 120 \angle 30^\circ$$

$$V_{bn} = 120 \angle -120 + 30^\circ = 120 \angle -90^\circ V$$

$$V_{cn} = 120 \angle +120 + 30^\circ = 120 \angle 150^\circ V$$

$$I_a = \frac{V_{an}}{Z_y}$$

$$Z_y = 6,35 + j1 = 6,42 \angle 8,95^\circ \Omega$$

$$I_a = \frac{127 \angle 30^\circ}{6,42 \angle 8,95^\circ} = 19,75 \angle 21,05^\circ A$$

$$I_b = I_a \angle -120 + 21,05^\circ = 19,75 \angle -98,95^\circ A$$

$$I_c = I_a \angle +120 + 21,05^\circ = 19,75 \angle 141,05^\circ A$$

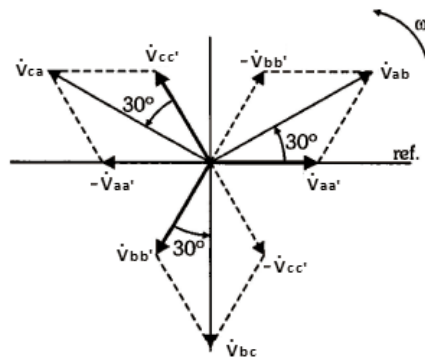


Figura 6. Aplicação da regra do paralelogramo para obtenção das tensões de linha.

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° , e mantendo o valor da corrente de linha igual à corrente de fase.

Ligação 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:

$$\dot{I}_a = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca} \Rightarrow \dot{I}_a = (I_F \angle 0^\circ) - (I_F \angle 120^\circ) \Rightarrow \dot{I}_a = I_F \cdot \sqrt{3} \angle 30^\circ$$

$$\dot{I}_b = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab} \Rightarrow \dot{I}_b = (I_F \angle -120^\circ) - (I_F \angle 120^\circ) \Rightarrow \dot{I}_b = I_F \cdot \sqrt{3} \angle 150^\circ$$

$$\dot{I}_c = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc} \Rightarrow \dot{I}_c = (I_F \angle 0^\circ) - (I_F \angle 120^\circ) \Rightarrow \dot{I}_c = I_F \cdot \sqrt{3} \angle -90^\circ$$

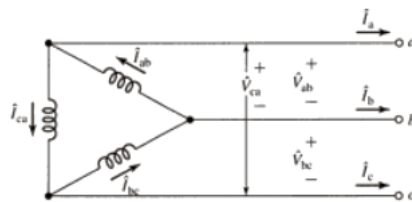


Figura 7. Conexão trifásica triângulo.

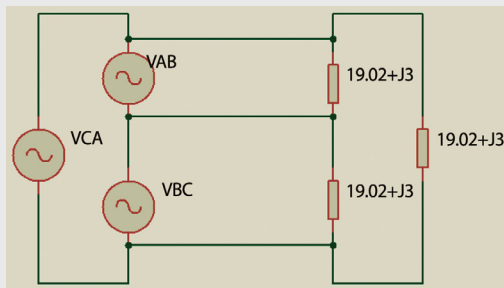
Fonte: Umans (2014, p. 595).



Exemplo

Uma fonte de tensão trifásica equilibrada conectada em Delta (Δ) possui tensão de fase $V_{ab} = 220 \angle 30^\circ \text{V}$. Essa fonte está conectada a uma carga equilibrada conectada em Δ com impedância de $(19,02 + j3) \Omega$ por fase. Determine as correntes de fase e as correntes de linha do sistema.

Solução:



$$Z_{\Delta} = 19,02 + j3 = 19,25 \angle 8,96^\circ \Omega$$

$$I_{AB} = \frac{220 \angle 30^\circ}{19,25 \angle 8,96^\circ} = 11,17 \angle 8,95^\circ \text{A}$$

$$I_{BC} = I_{AB} \angle -120 + 8,95^\circ = 11,17 \angle -111,05^\circ \text{A}$$

$$I_{CA} = I_{AB} \angle +120 + 8,95^\circ = 11,17 \angle 128,95^\circ \text{A}$$

$$I_a = I_{AB} - I_{CA} = 11,17 \angle 8,95^\circ - 11,17 \angle 128,95^\circ = 19,35 \angle -21,05^\circ$$

$$I_b = I_{BC} - I_{AB} = 11,17 \angle -111,05^\circ - 11,17 \angle 8,95^\circ = 19,35 \angle -141,05^\circ$$

$$I_c = I_{CA} - I_{BC} = 11,17 \angle 128,95^\circ - 11,17 \angle -111,05^\circ = 19,35 \angle 98,95^\circ$$

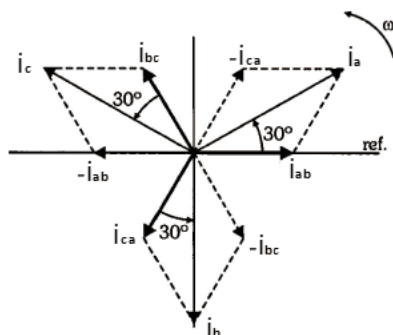


Figura 8. Aplicação da regra do paralelogramo para obtenção das correntes de linha.

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° (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° 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).

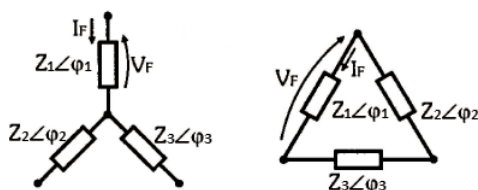


Figura 9. Esquemático de demonstração das grandezas de fase em ligações estrela e triângulo.

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 balanceadas, 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 cabamentos 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>. Acesso em: 28 dez. 2016.

NAHVI, M.; EDMINISTER, 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:



SOLUÇÕES
EDUCACIONAIS
INTEGRADAS