

# SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

Flávio Vanderson Gomes - Lucas Meirelles Pires Deotti

CONTROLE E PROCESSOS INDUSTRIAIS

# SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

Flávio Vanderson Gomes - Lucas Meirelles Pires Deotti

CONTROLE E PROCESSOS INDUSTRIAIS



## **Autores**

### **Flávio Vanderson Gomes**

Graduado em Engenharia Elétrica e mestre em Sistemas de Potência pela Universidade Federal de Juiz de Fora, doutor em Engenharia Elétrica pela COPPE Universidade Federal do Rio de Janeiro. Foi pesquisador do programa PRODOC (2005-2007) da CAPES pela Universidade Federal de Juiz de Fora. Trabalhou três anos (2007-2010) na DlgSILENT (Alemanha) como pesquisador e desenvolvedor de aplicativos para a área de Sistemas de Potência. Tem experiência na área de Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica, atuando principalmente no desenvolvimento de modelos e técnicas para análise de sistemas elétricos: fluxo de potência, curto-circuito, otimização e reconfiguração/planejamento de sistemas de distribuição. Desde 2010 trabalha como professor adjunto na Universidade Federal de Juiz de Fora, onde, no período de 2013 a 2016, exerceu a função de Coordenador do curso de Engenharia Elétrica – Energia.

### **Lucas Meirelles Pires Deotti**

Bacharel em Engenharia Elétrica, com habilitação em Energia, Mestrando em Engenharia Elétrica, na área de Sistemas de Energia Elétrica, pela Universidade Federal de Juiz de Fora. Foi bolsista do “Programa Jovens Talentos para a Ciência” da CAPES (2012-2013) e dos programas de iniciação científica da Universidade Federal de Juiz de Fora (2013-2014) e do Instituto Nacional de Energia Elétrica/CNPq (2014-2016). Tem experiência nas áreas de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica, geração distribuída e eficiência energética.

### **Design Instrucional**

Rodolfo Rodrigues

### **Projeto Gráfico**

NT Editora

### **Revisão**

Ricardo Moura

### **Capa**

NT Editora

### **Editoração Eletrônica**

Nathália Nunes

### **Ilustração**

Rodrigo Souza

### **NT Editora, uma empresa do Grupo NT**

SCS Quadra 2 – Bl. C – 4º andar – Ed. Cedro II

CEP 70.302-914 – Brasília – DF

Fone: (61) 3421-9200

sac@grupont.com.br

www.nteditora.com.br e www.grupont.com.br

Gomes, Flávio Vanderson; Deotti, Lucas Meirelles Pires.

Sistemas elétricos de potência / Flávio Vanderson Gomes; Lucas Meirelles Pires Deotti – 1. ed. – Brasília: NT Editora, 2018.

204 p. il. ; 21,0 X 29,7 cm.

ISBN 978-85-8416-250-5

1. Sistemas elétricos. 2. Potência.

I. Título

Copyright © 2018 por NT Editora.

Nenhuma parte desta publicação poderá ser reproduzida por qualquer modo ou meio, seja eletrônico, fotográfico, mecânico ou outros, sem autorização prévia e escrita da NT Editora.

## ÍCONES

Prezado(a) aluno(a),

Ao longo dos seus estudos, você encontrará alguns ícones na coluna lateral do material didático. A presença desses ícones o(a) ajudará a compreender melhor o conteúdo abordado e a fazer os exercícios propostos. Conheça os ícones logo abaixo:



### **Saiba mais**

Esse ícone apontará para informações complementares sobre o assunto que você está estudando. Serão curiosidades, temas afins ou exemplos do cotidiano que o ajudarão a fixar o conteúdo estudado.



### **Importante**

O conteúdo indicado com esse ícone tem bastante importância para seus estudos. Leia com atenção e, tendo dúvida, pergunte ao seu tutor.



### **Dicas**

Esse ícone apresenta dicas de estudo.



### **Exercícios**

Toda vez que você vir o ícone de exercícios, responda às questões propostas.



### **Exercícios**

Ao final das lições, você deverá responder aos exercícios no seu livro.

### **Bons estudos!**

## Sumário

<b>1 VISÃO GERAL DOS SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA .....</b>	<b>9</b>
1.1 Função dos sistemas elétricos de potência .....	9
1.2 Histórico dos sistemas elétricos de potência .....	13
1.3 Principais componentes de um sistema elétrico de potência .....	17
1.4 Perfil do(a) técnico(a) atuante na área de sistemas elétricos de potência .....	22
<b>2 ESTRUTURA DO SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO .....</b>	<b>28</b>
2.1 Histórico da indústria da eletricidade no Brasil.....	28
2.2 Estrutura organizacional do setor elétrico brasileiro .....	34
2.3 Visão geral da atual conjuntura do setor elétrico brasileiro .....	37
2.4 Panorama do setor elétrico brasileiro .....	40
<b>3 SISTEMAS DE ENERGIA.....</b>	<b>47</b>
3.1 Noções básicas sobre sistemas de energia elétrica .....	47
3.2 Processo de geração de energia elétrica .....	50
3.3 Processo de transformação de energia elétrica .....	54
3.4 Transmissão e distribuição de energia elétrica.....	57
3.5 Consumo de energia elétrica .....	59
<b>4 GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA .....</b>	<b>67</b>
4.1 Geração de energia elétrica através de centrais hidrelétricas.....	67
4.2 Geração de energia elétrica através de centrais termelétricas .....	73
4.3 Geração de energia elétrica através de centrais nucleares .....	78
4.4 Geração de energia elétrica através das fontes alternativas de energia .....	81
<b>5 TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA .....</b>	<b>88</b>
5.1 Evolução histórica e sistema brasileiro .....	88
5.2 Transmissão .....	94
<b>6 DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....</b>	<b>108</b>
6.1 Distribuição de energia elétrica no Brasil.....	108
6.2 Iluminação pública: medição de energia elétrica.....	118
<b>7 PERTURBAÇÕES NO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA .....</b>	<b>127</b>
7.1 Perturbações de tensão e corrente.....	127
7.2 Proteção no sistema elétrico de potência .....	130
<b>8 EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS DE ALTA-TENSÃO.....</b>	<b>144</b>
8.1 Princípios de funcionamento dos equipamentos de alta-tensão .....	144

<b>9 ATERRAMENTO E EQUIPOTENCIALIZAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA .....</b>	<b>164</b>
9.1 Elementos de um projeto de aterramento .....	164
9.2 Principais tipos de aterramento.....	170
9.3 Projetando o aterramento .....	172
9.4 Efeitos dos diversos surtos em uma rede de energia.....	175
9.5 Orientações básicas de um aterramento eficiente baseado na NBR 5419.....	177
<b>10 SUSTENTABILIDADE DOS SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA .....</b>	<b>184</b>
10.1 Qualidade de energia elétrica (QEE) .....	184
10.2 Desenvolvimentos tecnológicos e sustentabilidade .....	197
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>204</b>



Seja bem-vindo aos **Sistemas elétricos de potência!**

A riqueza de um país ocorre de várias maneiras: às vezes pelo seu potencial petrolífero, pela sua capacidade industrial, agropecuária ou até mesmo pelo potencial humano. O Brasil possui todos esses potenciais, mas existem dois nítidos: potencial hidráulico e energético. Com efeito, as grandes bacias hidrográficas são responsáveis por mais de 68% da energia elétrica produzida no Brasil (BEN, 2017), ou seja, de origem hídrica, seguida da energia de origem térmica, eólica, nuclear e das demais fontes alternativas existentes.

Nesse contexto, este livro, portanto, tem como objetivo tratar de diversas questões, desde a origem da energia elétrica até a sua entrega ao consumidor final, porém prioriza a demanda futura de energia elétrica no Brasil e no mundo e as consequências de um produto disponível, viável e de qualidade. Este material propiciará a você habilidades e competências na obtenção de uma visão sistêmica dos sistemas elétricos de potência e ampliará sua visão e seu domínio no processo de aplicabilidade prática nessas diversas áreas tecnológicas.

**Bons estudos!**

**Flávio Vanderson Gomes**

**Lucas Meirelles Pires Deotti**



# 1 VISÃO GERAL DOS SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

Vamos iniciar os estudos em uma nova área, a de sistemas elétricos de potência. Dessa forma, nosso primeiro passo será adquirir uma visão geral do tema, ou seja, do que se trata, seus principais componentes, quais são e para que servem os estudos realizados nessa área e, finalmente, quais requisitos deve possuir um profissional habilitado a trabalhar nessa área.

## Objetivos

Ao finalizar esta lição, você deverá ser capaz de:

- compreender as funções de um sistema elétrico de potência;
- entender de forma sucinta suas principais partes componentes;
- identificar os principais tipos de estudos realizados em um sistema de potência;
- assimilar, por meio de um breve histórico, o surgimento dos primeiros sistemas;
- conhecer o perfil de um profissional atuante na área e as tendências futuras.

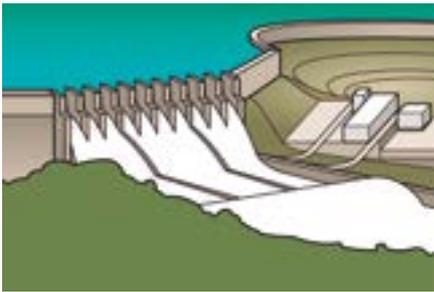
## 1.1 Função dos sistemas elétricos de potência

A crescente demanda por energia tornou-se tópico de imensa importância e interesse para cidadãos, indústrias e governos em todo o mundo, pois a oferta de energia é a condição para a existência da indústria, dos meios de transporte e até mesmo da agricultura e da vida urbana. Enfim, é a condição para a existência de nossa sociedade como a conhecemos.

A energia elétrica é uma das principais formas de energia utilizadas pelo ser humano no atendimento às suas necessidades. Dessa forma, para que um país como o Brasil possa crescer, é necessário que haja disponibilidade de energia de boa qualidade e a preços acessíveis, caso contrário toda a perspectiva de crescimento e desenvolvimento econômico ficará comprometida.

A principal razão pela qual a energia elétrica tem uma posição dominante entre as outras formas de energia, como a térmica ou a mecânica, é que toda a grande demanda necessária ao atendimento de indústrias, residências, serviços de transporte, entre outros, pode ser produzida em uma central geradora, em um local onde haja disponibilidade de uma fonte primária de energia – normalmente afastado dos centros urbanos – transmitida por longas distâncias e, finalmente, distribuída e convertida em outra forma de energia no local de utilização. Esse modelo é denominado geração centralizada.





Para fornecer toda essa energia, na quantidade e no instante em que for solicitada pelos diversos consumidores – como residências, comércios, setor de serviços e indústrias –, dentro de padrões de qualidade e a preços economicamente viáveis, é necessário um complexo sistema por meio do qual tal energia seja produzida, transmitida e distribuída. É necessário, ainda, minimizar distúrbios e possíveis impactos ambientais e sociais, de forma a atingir um equilíbrio perfeito entre produção energética, consumo e sustentabilidade.



**Diagrama simplificado de um sistema elétrico de potência**

Podemos definir um sistema elétrico de potência (neste material, mencionaremos muitas vezes na forma abreviada como SEP) como um grande sistema de energia que deve possuir capacidade de geração, transmissão e distribuição suficientes ao atendimento da demanda das cargas, levando em consideração as perdas envolvidas na conversão e no transporte.



#### Dicas

Uma outra alternativa seria a produção de energia em menor escala, utilizando-se unidades geradoras mais próximas dos centros de consumo. Nesse caso, chamamos de geração distribuída.

Conforme ilustrado no diagrama simplificado da figura anterior, um SEP pode ser subdividido em três grandes segmentos ou subsistemas:

- **geração ou produção:** responsável por converter a energia vinda de uma fonte primária em energia elétrica. Como exemplos de fontes primárias de energia, podemos citar a energia potencial hidráulica, a energia nuclear, a energia eólica e a energia química armazenada em combustíveis fósseis, como petróleo, gás natural, carvão, óleo etc.;



- **transmissão:** responsável pelo transporte de grandes blocos de energia a longas distâncias, desde a geração até os grandes centros de consumo. É caracterizada pelo alto nível de tensão e por linhas de transmissão em torres e cabos elétricos de elevada capacidade;



- **distribuição:** responsável pela entrega da energia diretamente aos consumidores. É caracterizada por apresentar um nível de tensão mais baixo e linhas de menor capacidade, denominadas alimentadores, os quais se confundem com a própria topografia das cidades, pois se ramificam ao longo de ruas e avenidas para conectar os consumidores (indústrias, comércios e residências) ao sistema elétrico.



O atendimento aos requisitos acima, por sua vez, exige uma complexa estrutura de rede, na qual devem ser realizados vultosos investimentos desde a fase de projeto e construção até a operação e a manutenção. É necessário, ainda, o conhecimento de modelos e técnicas de representação dos diversos equipamentos componentes da rede para que possam ser realizados diversos estudos e simulações computacionais.

Entre os diversos estudos realizados na área de SEP, podemos destacar:

- estudos de fluxo de potência: compreendem o levantamento das condições operacionais, ou seja, cálculo dos valores das tensões e das correntes em diversos pontos da rede elétrica;
- estudos de qualidade de energia: cálculos de desvios de tensão e frequência, afundamentos de tensão, etc.;



- estudos de confiabilidade e análise de contingências: necessários para avaliação do comportamento do sistema na ocorrência de falhas;
- estudos de transitórios eletromagnéticos e estabilidade eletromecânica: necessários para avaliar o comportamento da rede mediante distúrbios;
- estudos de reconfiguração do sistema de distribuição: alterações na topologia física da rede, de forma a minimizar perdas técnicas ou atender a alguma restrição operacional;
- estudos de cálculo de correntes de curto-circuito: necessários ao dimensionamento e à coordenação dos equipamentos de proteção;
- estudos de operação para longo, médio e curto prazo: definição de diretrizes para operação segura e econômica do sistema;
- estudos de planejamento da expansão do sistema: por meio do cálculo do crescimento da carga, reforços de rede ou ampliação/construção de novas usinas e linhas de transmissão;
- outros.



Como podemos perceber, um SEP constitui um sistema altamente complexo no qual devem ser realizados diversos estudos e ações desde seu planejamento até sua operação e manutenção. Esse trabalho é realizado por diversos profissionais de nível técnico e superior, desempenhando atividades na solução de problemas, elaboração de recomendações e implementação de ações, visando à construção de um sistema que atenda aos requisitos atuais e demandas futuras.



## Potencializando o conhecimento

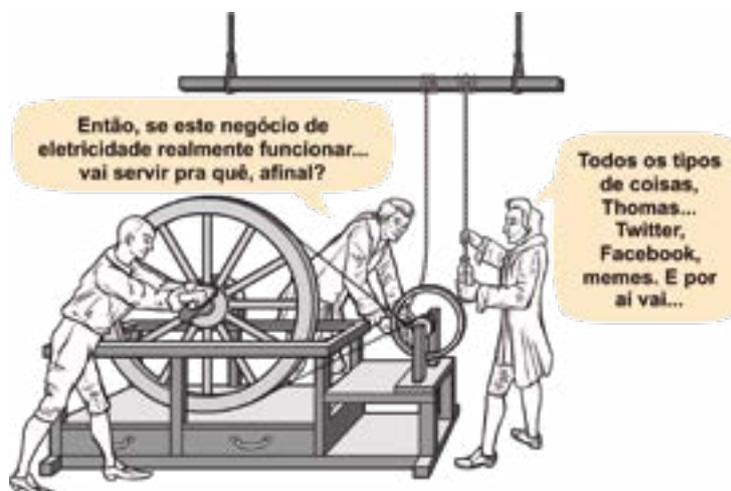
Indique qual alternativa abaixo melhor define um sistema elétrico de potência.

- Sistema de energia que deve possuir a máxima eficiência de conversão entre formas de energia.
- Sistema de energia que deve possuir capacidade de potência e frequência suficientes para atender às cargas.
- Sistema de energia que deve possuir capacidade de geração, transmissão e distribuição suficientes ao atendimento da demanda das cargas.
- Sistema de energia que deve ser capaz de atender a sua demanda de potência sem ocasionar perdas na conversão e no transporte.

**Comentário:** a alternativa correta é a letra “c”, pois é a que melhor define, de forma completa, um sistema elétrico de potência.

## 1.2 Histórico dos sistemas elétricos de potência

Na primeira metade do século XIX, físicos e químicos construíam dispositivos e instrumentos de medidas que eram alimentados com baterias galvânicas, portanto estavam interessados em construir geradores elétricos que produzissem energia em forma de corrente contínua.



Dessa forma, durante as duas últimas décadas do século XIX, os primeiros sistemas elétricos tiveram seu desenvolvimento baseado no uso dessas baterias como geradores de energia elétrica, possibilitando que a corrente contínua fosse definida como padrão nos Estados Unidos nos primeiros serviços de abastecimento de energia.

Thomas Alva Edison, idealizador e empresário americano, era detentor da patente da tecnologia que utilizava a eletricidade na forma de corrente contínua como fonte de energia para suprimento de sistemas de iluminação (constituída por lâmpadas incandescentes) e motores elétricos (utilizados principalmente em sistemas de transporte). A corrente contínua permitia, ainda, ser armazenada em baterias, as quais podiam ser utilizadas como valiosos estoques energéticos nos momentos de interrupções ou falhas de funcionamento dos geradores.



**Thomas Alva Edison**

Em 4 de setembro de 1882, foi construída a primeira central de geração de energia em escala comercial do mundo, localizada em Pearl Street, em Manhattan, Estados Unidos. Considerado hoje como o "primeiro sistema elétrico de potência em corrente contínua, essa central inicialmente possuía um gerador em corrente contínua que alimentava 400 lâmpadas atendendo a 82 consumidores.



Em resumo, esses sistemas de distribuição em corrente contínua compreendiam usinas de geração alimentando residências e outras instalações por meio de sistemas de distribuição compostos de condutores de elevada seção. Esses sistemas operavam integralmente em um único nível de tensão, de aproximadamente 100 volts, definido segundo critérios de produção dos filamentos de carbono de alta resistência das lâmpadas incandescentes. Tais lâmpadas eram projetadas para possuírem desempenho similar ao da iluminação a gás, largamente utilizada na época. Além disso, naquele tempo, havia uma ideia generalizada de que 100 volts não constituíam uma tensão que ocasionaria um grande risco de morte por choque elétrico.

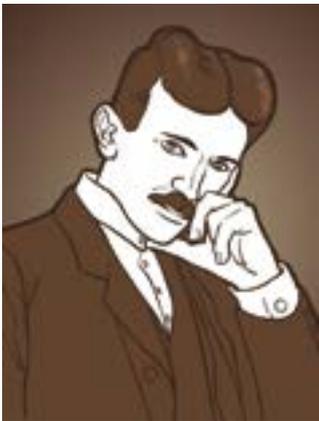
Prevendo uma queda de tensão ao longo do trecho, a energia era produzida em uma tensão ligeiramente superior, entretanto a queda de tensão devida à resistência dos cabos condutores era tão elevada que limitava a poucos quilômetros as distâncias das usinas produtoras aos centros consumidores. Tensões mais elevadas não podiam ser adotadas, pois não existiam alternativas de conversão entre esses diferentes níveis de corrente contínua.

Em 1886, foi construído para demonstração o primeiro sistema elétrico de potência em corrente alternada em Great Barrington, Massachusetts, Estados Unidos, por William Stanley, e financiado pelo empresário e engenheiro americano George Westinghouse. Esse evento inédito atraiu toda a atenção da indústria da eletricidade da época ao utilizar o primeiro transformador e inspirou George Westinghouse a mergulhar no universo dos sistemas em corrente alternada.

Nos Estados Unidos, em 1887, Nikola Tesla, engenheiro e físico eletromecânico sérvio, com base nos trabalhos de campos magnéticos rotacionais até então existentes, aperfeiçoou todo um sistema de produção, transmissão e uso final da eletricidade em corrente alternada.



**George Westinghouse**



**Nikola Tesla**

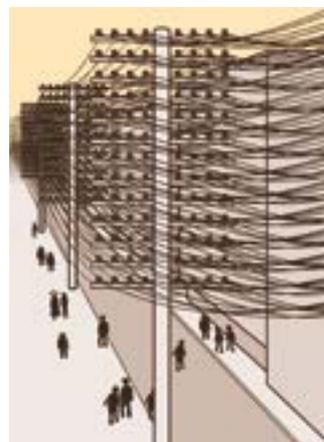
Em 1888, Nikola Tesla, após obter as patentes de um sistema polifásico completo, em corrente alternada, constituído por geradores, transformadores e motores, associou-se a George Westinghouse para comercializar tal sistema. Westinghouse, por sua vez, ainda adquiriu as garantias legais de diversas patentes relacionadas à tecnologia de transformadores em corrente alternada, principalmente as relativas aos trabalhos de John Gibbs e Lucien Gaulard, tornando-se, nos Estados Unidos, o pioneiro na introdução dos sistemas de eletricidade em corrente alternada.

Na época, o transformador possibilitou que a energia elétrica pudesse ser transmitida em um nível de tensão muito mais elevado que o utilizado para consumo, proporcionando menores perdas. Os transformadores eram também empregados para converter os altos níveis de tensão da transmissão em níveis inferiores necessários para realizar, com segurança, o atendimento às cargas compostas principalmente por lâmpadas e pequenos motores elétricos. Dessa forma, usinas geradoras de maior porte podiam suprir a demanda de grandes áreas, permitindo que equipamentos de maior capacidade como grandes motores industriais e conversores utilizados no transporte ferroviário pudessem ser atendidos pelo mesmo sistema que alimentava as pequenas cargas residenciais.



As ações de Thomas Edison para abrandar as deficiências do sistema em corrente contínua consistiram, resumidamente, em produzir a energia em localizações próximas ao consumo (geração distribuída) e instalar condutores de elevada bitola para atendimento à crescente demanda de energia elétrica.

No entanto, devido ao capital necessário para construção dessas instalações, tais medidas mostraram-se extremamente dispendiosas, especialmente para consumidores situados em regiões remotas e áreas rurais. Além disso, não havia uma tecnologia disponível na época, com custos módicos, para efetuar a conversão dos valores de tensão em corrente contínua. De certa forma, a alternativa existente consistia em disponibilizar várias linhas elétricas, uma para cada nível de tensão, com a finalidade de abastecer de eletricidade os aparelhos que operavam em cada nível diferente de tensão, como iluminação e motores. Tal fato resultou em um grande incremento no número de condutores elétricos utilizados para fornecimento de energia além de inconvenientes na instalação e manutenção resultando em perdas financeiras e riscos de acidentes.



Em relação à corrente alternada, ela podia ser transportada a altas tensões e a grandes distâncias utilizando-se cabos de menor bitola e, portanto, a preços mais acessíveis. Ao aproximar-se dos centros de consumo, a tensão era adequadamente reduzida aos patamares de segurança adequados aos equipamentos residenciais e fabris. No momento em que Nikola Tesla, no final de 1887, estabeleceu seu sistema em corrente alternada constituído por geradores, transformadores e outros equipamentos, tornou-se evidente que essa tecnologia seria adotada como modelo de sistemas de energia elétrica, embora o sistema em corrente contínua ainda continuasse a ser empregado nos centros consumidores por décadas subsequentes.

A baixa frequência (50 a 60 Hz), a corrente alternada pode ser mais grave que níveis similares em corrente contínua, pois as oscilações alternadas podem ocasionar perda da coordenação do ritmo cardíaco e fibrilação ventricular, resultando em morte, em tempos relativamente curtos (seis a oito minutos) devido à insuficiência de oxigenação na medula óssea e no cérebro. Entretanto, em termos práticos, os níveis de tensão adotados, tanto em CA quanto em CC, são elevados o suficiente para que a quantidade de corrente elétrica que circule pelo corpo cause danos severos à saúde.

#### Importante

A grande vantagem, naquela época, da corrente alternada em relação à corrente contínua, para a distribuição de energia, residia na facilidade de variação nos níveis de tensão. De forma sucinta, a potência elétrica  $P$  consiste no produto da corrente  $I$  pela tensão  $V$ , ou seja:  $P = V \cdot I$ . Dessa forma, se considerarmos uma determinada potência constante, uma redução na tensão implica uma elevação da corrente e vice-versa.

Os cabos condutores, compostos normalmente de materiais metálicos, como cobre ou alumínio, apresentam resistência elétrica  $R$ , sendo parte da energia desperdiçada sob forma de calor quando percorridos por corrente por meio da equação:  $P = R \times I^2$ .

Consequentemente, se desejarmos transportar determinada quantidade constante de potência, quanto maior a tensão, menor será sua corrente, resultando em menores perdas, uma vez que,



segundo a equação (x), as perdas por aquecimento variam quadraticamente com a corrente. Tal comportamento se aplica tanto à corrente contínua quanto à alternada; todavia, naquela época, a conversão de níveis de tensão em corrente contínua exigia dispendiosos conversores giratórios, enquanto, em corrente alternada, essa tarefa poderia ser facilmente resolvida, de forma eficaz, empregando-se um transformador (sem partes móveis e restrita manutenção). Tal diferença calhou na chave para o sucesso dos sistemas em corrente alternada.



#### Saiba mais

O primeiro sistema de transmissão trifásico em corrente alternada em alta-tensão foi criado em 1891 durante a Exposição Internacional de Eletricidade em Frankfurt, na qual uma linha de 175 km de distância em 15 kV conectou as cidades de Lauffen am Neckar e Frankfurt am Main.

Em 1895, entra em operação o primeiro sistema de geração hidroelétrica em grande escala, Niagara Falls, fornecendo energia para Buffalo, Nova Iorque, através de linhas de transmissão. Esse fato é conhecido na literatura como o marco da vitória dos sistemas em corrente alternada sobre os sistemas em corrente contínua. Dessa forma, Tesla convenceu o governo americano a adotar o novo padrão de corrente alternada como meio mais eficiente para geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, contrariando interesses de seu antigo empregador, Thomas Alva Edison, que defendia o sistema de corrente contínua.

A tabela apresenta uma cronologia dos principais fatos ocorridos no mundo, durante o século XIX, relacionados ao surgimento dos primeiros sistemas elétricos de potência.

#### Cronologia dos principais relacionados aos sistemas elétricos

<b>1831</b>	Descoberta da indução eletromagnética por Michael Faraday. A indução eletromagnética é o nome que se dá ao fenômeno no qual um campo magnético variável produz em um circuito uma corrente elétrica, chamada de corrente induzida.
<b>1867</b>	Dinamo – Werner von Siemens
<b>1881</b>	Transformador – Gaulard-Gibbs
<b>1882</b>	Primeiro “sistema” de distribuição de energia elétrica, Thomas Edison – Nova York – Pearl Street (540 kW – 110 Vcc)
<b>1886</b>	Primeiro “sistema” em corrente alternada – William Stanley e Franklin Pope – George Westinghouse – Great Barrington-MA (500V – 3kV – 100V)
<b>1888</b>	Campo girante – Nikola Tesla
<b>1891</b>	Primeiro “sistema” trifásico – Alemanha – 135km
<b>1892</b>	Motor de indução – Nikola Tesla
<b>1895</b>	Entra em operação complexo de Niagara Falls (20MW/30km) – vitória do sistema em corrente alternada



## Potencializando o conhecimento

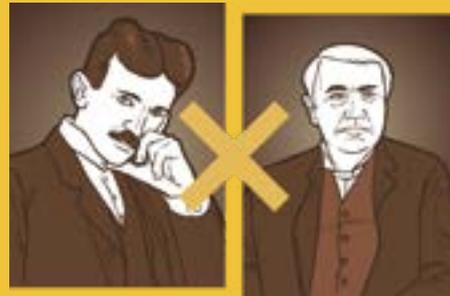
No início de seu desenvolvimento, os primeiros sistemas elétricos eram em corrente contínua. A principal razão pela qual esses sistemas foram suplantados pelos de corrente alternada deveu-se, na época:

- a) à corrente alternada poder ter seus níveis de tensão facilmente alterados, permitindo que transmissão fosse realizada com menores perdas.
- b) à corrente alternada ser menos perigosa para o ser humano.
- c) ao sistema em corrente contínua não possuir mais capacidade para atender aos grandes sistemas de iluminação e motores que surgiam.
- d) a não ser possível que as novas máquinas utilizadas no sistema de transporte elétrico da época funcionassem em corrente contínua.

**Comentário:** a alternativa correta é a de letra “a”, pois, na época, não havia uma tecnologia eficiente e de baixo custo que permitisse a alteração dos níveis de tensão em corrente contínua. O transformador tornou isso possível para a corrente alternada. Para viabilizar a transmissão a grandes distâncias, é necessário que a tensão seja superior aos níveis utilizados em pequenas cargas, como lâmpadas utilizadas em iluminação.

## Saiba mais

A disputa entre corrente alternada e corrente contínua começou como um conflito bem corriqueiro entre dois padrões técnicos, uma batalha entre dois métodos competindo para entregar essencialmente o mesmo produto: a eletricidade. Mas a briga logo se transformou em algo maior e mais sombrio: em 6 de agosto de 1890, acontecia a primeira execução por cadeira elétrica da História. A execução de William Kemmler, assassino da própria esposa, foi o auge da Guerra das Correntes. As curiosidades desse fato histórico, assim como a descrição detalhada dos eventos que ocorreram no contexto das Guerras das Correntes, podem ser encontradas na matéria de Fabio Marton, revista Aventuras na História, nº151, edição de fevereiro de 2016.



## 1.3 Principais componentes de um sistema elétrico de potência

Como vimos, um sistema elétrico de potência deverá ser constituído, basicamente, por um conjunto de dispositivos necessários para a geração, a transmissão, a distribuição e o consumo de energia elétrica. Faremos, aqui, uma descrição breve dos seus principais componentes.

## Gerador

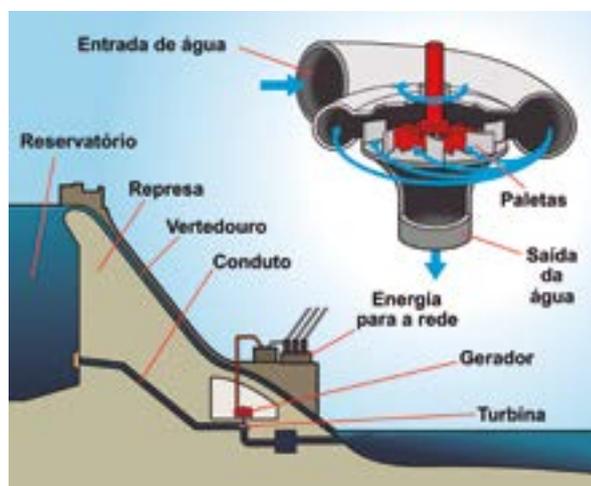
Embora os termos “geração” ou “produção” sejam comumente empregados na literatura técnica da área de sistemas elétricos, na física, o princípio da conservação de energia estabelece que a quantidade total de energia em um sistema isolado permanece constante. Essa afirmação significa dizer que a energia não pode ser criada nem destruída, mas apenas convertida de uma forma em outra. Dessa maneira, podemos definir gerador como um componente utilizado para a conversão da energia em uma forma dita primária, por exemplo, energia potencial, energia cinética, energia mecânica, energia térmica ou energia nuclear em outra forma denominada secundária, a energia elétrica.

Para a produção de energia elétrica a partir de energia mecânica podem ser empregados geradores do tipo eletromagnéticos e, a partir de energia química, podem ser utilizados pilhas e geradores de célula combustível. Um outro exemplo de tipo de gerador, em crescimento na atualidade, seriam dispositivos que convertem diretamente a energia luminosa em elétrica, os denominados geradores fotovoltaicos.



### Importante

Os geradores eletromagnéticos, muito utilizados para conversão de grandes blocos de potência, são acionados mecanicamente por meio de uma turbina, normalmente do tipo hidráulica, a gás ou a vapor. Essa energia mecânica é utilizada para fazer girar o rotor, o qual induz uma tensão senoidal nos terminais dos enrolamentos que, ao serem conectados às cargas, resultam na circulação de correntes elétricas pelos seus enrolamentos. No Brasil, essa geração deverá, segundo padrão fixado por decreto governamental, ser sob a forma trifásica, senoidal, com frequência de 60 ciclos/segundo (Hz).

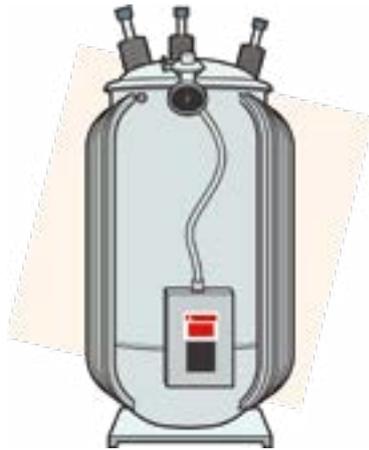


A geração de energia elétrica se faz em usinas localizadas em função de suas características próprias. Usinas hidrelétricas, que usam represamento de rios e lagos, são localizadas nos pontos considerados mais eficientes para o armazenamento do volume ideal de água. Usinas térmicas podem ser localizadas em pontos mais convenientes para a transmissão e o controle. Geradores eólicos são localizados, entre várias possibilidades, em pontos com maior volume de ventos.



No Brasil, devido ao grande potencial hídrico existente, a maior parte da energia elétrica é obtida pela conversão da energia hidráulica em usinas hidrelétricas, as quais normalmente se encontram no curso de grandes rios, afastadas dos grandes centros de consumo. Para que esses grandes blocos de energia sejam transportados das centrais geradoras até os grandes centros de consumo, rompendo distâncias que, no caso brasileiro, chega a ser superior a mil quilômetros, há necessidade de um outro componente capaz de elevar a tensão a um nível em que as perdas da transmissão sejam reduzidas: o transformador.

## Transformador

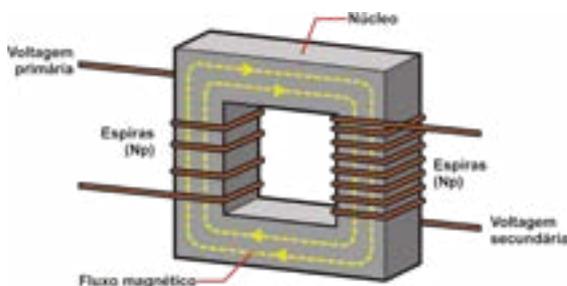


O transformador é uma máquina elétrica estática que funciona com base nos princípios eletromagnéticos que estabelece que um campo magnético variável produz em um circuito uma corrente elétrica, chamada de corrente induzida. É por necessitar dessa variação no fluxo magnético que os transformadores só funcionam em corrente alternada. O equipamento é utilizado para transferir energia elétrica entre dois ou mais circuitos elétricos acoplados magneticamente, com mudanças na tensão e na corrente, porém mantendo constante a potência.

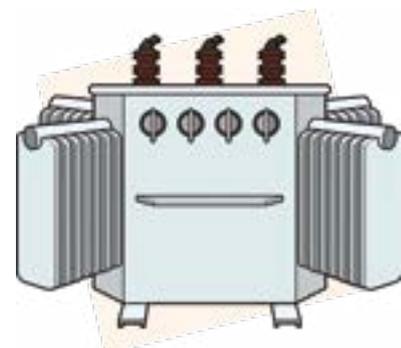
A ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) define o transformador como: "um dispositivo que por meio da indução eletromagnética, transfere energia elétrica de um ou mais circuitos (primário) para outro ou outros circuitos (secundário), usando a mesma frequência, mas, geralmente, com tensões e intensidades de correntes diferentes". Logo, o transformador é um conversor de energia eletromagnética, cuja operação pode ser explicada em termos do comportamento de um circuito magnético excitado por uma corrente alternada.

De forma sucinta, o transformador é constituído por um núcleo de ferro ao redor do qual são enroladas duas bobinas. A figura ilustra um esquema simplificado de um transformador. Em uma dessas bobinas, é aplicada a tensão que se deseja transformar, ou seja, aumentar ou diminuir. Essa bobina é chamada de bobina primária ou enrolamento primário. Depois de transformada, a tensão é estabelecida nos terminais da outra bobina, que é denominada bobina secundária ou enrolamento secundário.

Esquema simplificado de um transformador.



A figura a seguir ilustra um transformador trifásico muito utilizado em redes de distribuição de energia para atendimentos aos consumidores.



## Linha de transmissão

Desde o início dos primeiros serviços de fornecimento de eletricidade, os engenheiros trabalham no desenvolvimento de tecnologias para realizar o transporte dessa energia, entre as usinas e os centros consumidores, de forma cada vez mais econômica. As linhas de transmissão de energia (figura a seguir) são compostas, basicamente, por cabos condutores e cabos para-raios, normalmente suspensos (aéreos) por meio de torres metálicas e apoiados em isoladores fabricados em materiais de alta resistividade elétrica, tais como cerâmica, vidro e porcelana. Além disso, tais linhas são, em sua maioria, trifásicas, possuindo outros componentes como cabos para-raios, ferragens e fundações.

A transmissão de energia elétrica pode ser feita em corrente contínua (CC) ou corrente alternada (CA). Hoje, somente em alguns casos específicos, é utilizada a transmissão em corrente contínua. Como vimos, as vantagens da utilização de alternadores (máquinas CA) em relação aos dínamos (máquinas CC) na produção da energia elétrica levaram ao uso quase que exclusivo da corrente alternada. No entanto, convém ressaltar que o uso de CC não foi completamente abandonado, pois há casos em que ela é utilizada na transmissão de energia elétrica, como é o caso do transporte de grandes quantidades de energia a longas distâncias devido a um efeito denominado pelicular ou quando é necessário efetuar a interligação de dois sistemas a frequência diferentes.



### Importante

O desempenho elétrico de uma linha aérea de transmissão depende quase exclusivamente de sua geometria, ou seja, de suas características físicas. Existem diferentes tipos de condutores, porém os mais usados em linhas de transmissão aéreas são, normalmente, por razões econômicas, condutores de alumínio.

## Redes de distribuição

Conforme disposto pela ABRADEE (Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica),

o sistema de distribuição de energia é aquela rede de energia elétrica que se confunde com a própria topografia das cidades, ramificado ao longo de ruas e avenidas para conectar fisicamente o sistema de transmissão (ou mesmo unidades geradoras de médio e pequeno porte) aos consumidores finais.

A figura a seguir ilustra uma estrutura utilizada em redes de distribuição urbana.

Por um lado, analogamente ao sistema de transmissão, a rede de distribuição é constituída por cabos condutores, transformadores, medidores além de dispositivos de controle e de proteção. Por outro lado, diferentemente do sistema de transmissão, a rede de distribuição é bem mais ramificada e vasta, uma vez que precisa atender milhares de consumidores, tais como residências, indústrias e mercados, dispersos por uma extensa área territorial.

Na distribuição existem, ainda, dois níveis de tensão bem definidos, denominados distribuição primária e secundária, correspondendo à média e à baixa tensão, respectivamente. O nível primário é aquele que ocupa a posição física mais elevada nas estruturas e cujas tensões oscilam na faixa de 2,3 a 44 kV. Tais sistemas podem ser normalmente aéreos ou subterrâneos, trifásicos a três condutores, cabos de alumínio nus e dispostos em cruzetas ou condutores isolados, no caso de redes compactas.

Nas redes de distribuição de média tensão, também são frequentemente encontrados equipamentos auxiliares, tais como capacitores, religadores e transformadores reguladores de tensão.

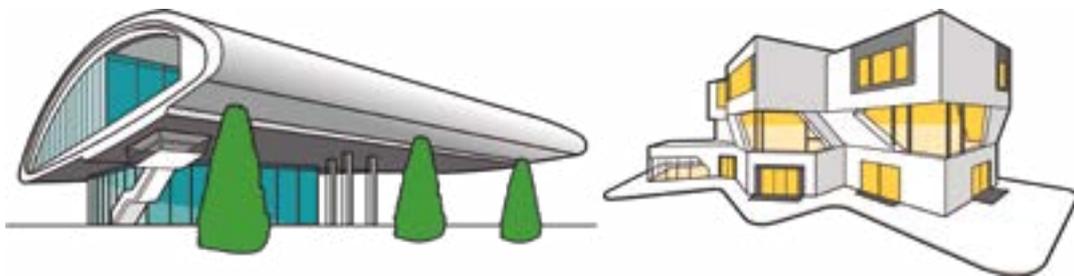
Já a distribuição secundária ocupa a posição física mais baixa das estruturas, com tensões na faixa de 110 a 380V e compostos de sistemas trifásicos a quatro fios, ou seja, com condutor neutro multiterrados. É a partir dessas redes secundárias que é realizado o ramal de conexão (ramal de ligação) aos consumidores: residências, supermercados, comércios e pequenas indústrias.



**Foto de uma estrutura utilizada em sistemas de distribuição urbana.**

### **Cargas**

Analogamente ao que ocorre com a geração, a energia não é consumida, mas, sim, em um processo inverso, convertida de elétrica para outras formas de energia. As principais cargas utilizadas pelos consumidores industriais, comerciais e residenciais (figura a seguir) são: motores (conversão para energia mecânica), lâmpadas (energia luminosa) e dispositivos para conversão para energia térmica.



**Residências: lâmpadas e equipamentos eletroeletrônicos – exemplos de consumidores de energia elétrica.**

### **Potencializando o conhecimento**

O transformador é um dos componentes essenciais ao funcionamento dos sistemas elétricos de potência em corrente alternada. Eles tornam possível que os níveis de tensão e corrente possam ser modificados permitindo, por exemplo, que, em um mesmo sistema, possam ser ligados equipamentos de diferentes potências com diferentes tensões de funcionamento.

Em relação ao transformador, indique qual alternativa não está correta.

a) Os níveis de tensão e corrente podem ser alterados mantendo-se a potência praticamente constante.



- b) O transformador foi um dos equipamentos que permitiu o desenvolvimento dos sistemas elétricos de potência em corrente alternada ao tornar possível a variação de frequência.
- c) Os transformadores permitem que a energia seja transmitida sob tensões muito mais elevadas do que as destinadas ao consumo, proporcionando menores perdas.
- d) No sistema de corrente alternada, os transformadores são utilizados para reduzir os níveis de tensão próximos aos centros de consumo.

**Comentário:** se você pensou na alternativa “b”, acertou. Apesar de a resposta, inicialmente, parecer correta ao afirmar que o “transformador foi um dos equipamentos que permitiu o desenvolvimento dos sistemas elétricos de potência em corrente alternada”, ela não está totalmente correta, pois finaliza a frase afirmando que é possível alterar a frequência do sistema, o que não é verdade!

## 1.4 Perfil do(a) técnico(a) atuante na área de sistemas elétricos de potência

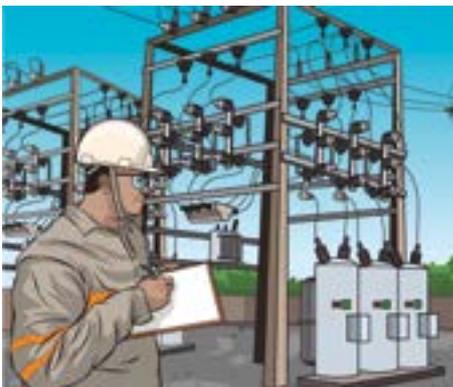
O Conselho Federal de Engenharia e Agronomia (CONFEA) é um órgão de fiscalização profissional responsável pela regulamentação e julgamento final no Brasil das atividades profissionais relacionadas às classes que abrange: Engenharia, Agronomia, bacharéis em Geografia, Geologia e Meteorologia, possuindo mais de trezentos títulos profissionais, nos níveis técnico e superior.

A Resolução do CONFEA nº 473, de 26 de novembro de 2002 instituiu a Tabela de Títulos Profissionais, considerando que o **Grupo 1** – Engenharia, **modalidade 2** – Eletricista e **nível 3** Técnico de Nível Médio apresenta a relação de títulos profissionais de nível técnico que poderão ser registrados no conselho de classe. As atividades, competências e caracterização do âmbito de atuação desses profissionais para efeito de fiscalização do exercício profissional são regulamentadas por meio da Resolução CONFEA nº 1.010, de 22 de agosto de 2005.



O profissional destinado a atuar na área de sistemas elétricos de potência deve possuir as atividades, competências e caracterização do âmbito de atuação emitidas pelo Conselhos Regionais de Engenharia e Agronomia (CREA).

De forma geral, um técnico atuante nessa área deverá ser um profissional capaz de projetar, instalar, operar e manter os elementos do sistema elétrico de potência, além de possuir as seguintes características:



- ser um profissional capacitado para discutir e propor soluções aos desafios contemporâneos nas áreas de geração, transmissão, distribuição e utilização da energia elétrica, seja no projeto, na operação ou no planejamento desses sistemas;
- ter iniciativa, responsabilidade e espírito empreendedor, exercer liderança, saber trabalhar em equipes multidisciplinares, respeitando a diversidade de ideias e ter atitudes éticas, visando ao exercício da cidadania e à preparação para o trabalho;

- compreender seu papel crítico e atuante na sociedade e no desenvolvimento do país, reconhecendo as implicações políticas, econômicas, sociais e ambientais de suas intervenções profissionais;
- apresentar capacidade para a elaboração de projetos e proposição de soluções técnicas e economicamente competitivas;
- executar atividades atendendo às normas de segurança, de proteção ao meio ambiente, de saúde laboral, e atendendo também ao sistema de gestão e à responsabilidade social, agindo de acordo com preceitos éticos profissionais na área de eletrotécnica;
- ser um empreendedor, possibilitando a geração de novas iniciativas propulsoras do desenvolvimento individual e coletivo, na comunidade em que vive;
- possuir uma sólida base teórica que permita entender os principais conceitos e assimilar novas tecnologias, mantendo-se atualizado frente à evolução tecnológica da área e aplicando esses conhecimentos na solução de problemas;
- ter capacidade de expressão oral e escrita na língua nacional e desejável compreensão em língua estrangeira.

### Novas tendências

Os novos desafios impostos aos profissionais da área de eletricidade atualmente superam a exclusiva formação tecnológica. Conceitos de sustentabilidade ambiental, conhecimentos de métodos e procedimentos para avaliações técnico-econômicas e financeiras, capacidade de gestão de projetos e processos e a compreensão dos sistemas elétricos em uma abordagem de negócios e de mercados competitivos são alguns exemplos das novas faculdades de que esses profissionais, sejam técnicos ou engenheiros, devem dispor. Equipados com esse conjunto de conceitos e aptidões poderão melhor inserir-se no mercado de trabalho e estarão atentos às demandas socioeconômicas de nosso tempo. Nota-se que esses novos desafios não são restritos apenas aos novos profissionais da área de eletricidade, mas a todos que desejam manter-se na dinâmica atividade profissional.



A incômoda possibilidade de uma mudança climática catastrófica, o aumento nos preços, a perspectiva de escassez de combustíveis fósseis e a dependência total do homem de fontes de energia são alguns dos fatores que combinados fazem emergir a necessidade de um novo profissional, o qual deve possuir os conhecimentos na área de eletricidade e também habilidades que o qualifiquem para atuar de forma sistêmica junto a diferentes fontes, formas de exploração, distribuição e uso de energias.

Recentemente tem ocorrido uma grande revolução na área energética devido à busca de fontes renováveis de energia, considerando que há dificuldades crescentes de manter os níveis de consumo como os atuais utilizando as fontes tradicionais de energia (combustíveis fósseis).

#### Importante

O desafio de hoje é fazer a transição para um modelo energético sustentável, menos dependente dos combustíveis fósseis, sem que esse processo tenha repercussões traumáticas no desenvolvimento social e econômico.



A característica essencial das energias renováveis é a capacidade de serem regeneradas e, como tal, são virtualmente inesgotáveis, além de não serem nocivas ao meio ambiente. Essas são as duas principais propriedades que as distinguem de fontes de energia tradicionais.

Nos últimos anos, essas duas características colocaram as energias renováveis no cenário energético mundial, pois, se as atuais taxas de consumo de combustíveis fósseis forem mantidas, eles só serão capazes de satisfazer as nossas necessidades de energia para mais algumas décadas antes de esgotar-se. Os danos ao meio ambiente, por outro lado, causados pela queima de combustíveis fósseis e as mudanças climáticas resultantes, forçam-nos a considerar as fontes alternativas de energia, se quisermos preservar o planeta e garantir o bem-estar das gerações futuras.



### Potencializando o conhecimento

Indique, entre as alternativas abaixo, aquela que melhor identifica as características adequadas a um profissional técnico para atuar na área de sistemas elétricos de potência.

- a) Deverá ter realizado um curso de formação na área de eletricidade de nível superior engenharia ou de nível técnico.
- b) Deverá possuir registro profissional com as competências e a caracterização do âmbito de atuação emitidas pelo Conselhos Regionais de Engenharia e Agronomia (CREA).
- c) Deverá possuir iniciativa, responsabilidade e espírito empreendedor, exercer liderança, saber trabalhar em equipes multidisciplinares, respeitando a diversidade de ideias e ter atitudes éticas, visando o exercício da cidadania e a preparação para o trabalho.
- d) Todas as alternativas anteriores.

**Comentário:** se você pensou na alternativa “d”, acertou, pois um bom profissional precisa ter, além da qualificação (formação) e habilitação (registro no conselho), diversas características adicionais, tais como, ter capacidade de expressão oral e escrita em língua nacional e estrangeira (principalmente inglês), ter espírito empreendedor, ter liderança, saber trabalhar em equipes multidisciplinares, respeitar a diversidade de ideias e ter atitudes éticas, visando ao exercício da cidadania e a preparação para o trabalho.

## Resumindo

Nesta lição, estudamos os sistemas elétricos de potência, os quais são responsáveis por produzir, transmitir e distribuir toda a energia elétrica necessária ao desenvolvimento da sociedade moderna. A energia elétrica pode ser convertida em luz, força para movimentar motores ou acionar diversos produtos elétricos e eletrônicos que possuímos em nossas residências (computador, geladeira, micro-ondas, chuveiro, etc.) e no abastecimento de indústrias e comércios.

Vimos, ainda, que, apesar de um SEP possuir atualmente um alto grau de complexidade, necessitando da realização de diversos estudos e ações envolvendo vários profissionais, seu desenvolvimento é relativamente recente. Os primeiros sistemas eram em corrente contínua e surgiram nas duas últimas décadas do século XIX, ou seja, há apenas 130 anos.

Estudamos, de uma forma sucinta, que um SEP é constituído por diversos componentes, tais como: geradores, transformadores, linhas de transmissão, alimentadores de distribuição e cargas. Cada componente desempenha uma função específica dentro do sistema para que a energia possa ser produzida, transportada e se transforme em trabalho nos equipamentos projetados para facilitar nossa vida moderna.

Finalmente, vimos que um profissional destinado a atuar na área de SEP deve possuir, além de uma base teórica sólida, um perfil dinâmico com qualidades adicionais, como iniciativa, responsabilidade, capacidade de expressão e disposição para encarar novos desafios presentes em uma área tecnológica.

Veja se você se sente apto a:

- relatar as funções de um sistema elétrico de potência;
- explicar de forma sucinta suas principais partes componentes;
- citar os principais tipos de estudos realizados em um sistema de potência;
- descrever um breve histórico de como surgiram os primeiros sistemas;
- entender o perfil de um profissional atuante na área.

Convidamos a estudar a lição 2 – Estrutura do Sistema Elétrico Brasileiro –, na qual passaremos a discutir diversos aspectos específicos do nosso sistema elétrico. Caso ainda não se sinta apto a prosseguir com os estudos, recomendamos a releitura desta lição introdutória.



Parabéns, você finalizou esta lição!

Agora responda às questões ao lado.

## Exercícios

**Questão 1** – Por que cidadãos, indústrias e governos se preocupam cada vez mais com a crescente necessidade de energia elétrica?

- a) Porque a oferta de energia é a condição para a existência da sociedade moderna.
- b) Porque a energia elétrica é uma das formas de energia mais utilizadas e versáteis.
- c) Porque, para um país crescer, é necessário ter disponibilidade de energia e a preços competitivos.
- d) Todas as alternativas estão corretas.

**Questão 2** – A principal razão pela qual a energia elétrica tem uma posição dominante entre as outras formas de energia deve-se ao fato de:

- a) poder ser produzida em uma central próxima ao centro de consumo e sem nenhuma perda de conversão.
- b) poder ser facilmente convertida em outras formas de energia.
- c) poder ser produzida em uma central geradora, em um local com disponibilidade de uma fonte primária e ser transmitida por longas distâncias aos centros de consumo.
- d) todas as alternativas estão corretas.

**Questão 3** – Para o funcionamento correto de um sistema elétrico de potência, são necessários diversos tipos de estudos. Assinale a alternativa que não corresponde ao estudo de um sistema elétrico de potência.

- a) Estudos de fluxo de potência.
- b) Estudos de impacto ambiental das redes.
- c) Estudos de qualidade de energia.
- d) Estudos de planejamento da expansão do sistema.

**Questão 4** – Podemos, corretamente, afirmar sobre um sistema elétrico de potência:

- a) deve possuir capacidade de geração, transmissão e distribuição suficientes ao atendimento da demanda das cargas, levando em consideração as perdas envolvidas na conversão e no transporte.
- b) deve ser capaz de fornecer energia elétrica, na quantidade e no instante em que for solicitada pelos diversos consumidores, como, residências, comércios, setor de serviços e indústrias, dentro de padrões de qualidade e com preços economicamente viáveis.
- c) deve ser capaz de minimizar distúrbios e possíveis impactos ambientais e sociais, de forma a atingir um equilíbrio perfeito entre produção energética, consumo e sustentabilidade.
- d) todas as alternativas estão corretas.

**Questão 5** – Qual a ordem correta dos segmentos ou subsistemas de um SEP?

- a) Produção – transmissão – geração – consumo.
- b) Produção – transmissão – distribuição – consumo.
- c) Geração – consumo – distribuição – transmissão.
- d) Produção – geração – distribuição – consumo.

**Questão 6** – Qual estudo é realizado num SEP com o objetivo de minimizar perdas elétricas?

- a) Estudo de análise de contingências.
- b) Estudo de operação a longo prazo.
- c) Estudo de cálculo de correntes de curto-circuito.
- d) Estudo de reconfiguração de sistemas de distribuição.

**Questão 7** – Os primeiros sistemas elétricos de potência eram:

- a) em corrente alternada, trifásicos.
- b) em corrente alternada, monofásicos.
- c) em corrente contínua.
- d) nenhuma das alternativas anteriores.

**Questão 8** – A briga pela adoção do sistema de corrente contínua *versus* corrente alternada teve como principais personagens:

- a) Thomas Alva Edison e Nikola Tesla.
- b) George Westinghouse e Nikola Tesla.
- c) Thomas Alva Edison, John Gibbs e Lucien Gaulard.
- d) Thomas Alva Edison e George Westinghouse.

**Questão 9** – O grande problema da corrente contínua era:

- a) não ser possível converter facilmente seus níveis de tensão.
- b) não ser possível utilizá-la em todas as cargas da época.
- c) não ser era possível transmiti-la a longas distâncias.
- d) ser bem mais cara do que a alternativa em corrente alternada.

**Questão 10** – O equipamento que, no início do desenvolvimento dos sistemas elétricos, possibilitou a vitória da corrente alternada em relação à corrente contínua chama-se:

- a) transformador.
- b) gerador.
- c) motor.
- d) linha de transmissão.