

Eficiência energética e qualidade de energia

Eficiência energética e qualidade de energia

Leidiane Mariani

Natalí Nunes dos Reis da Silva

© 2017 por Editora e Distribuidora Educacional S.A.

Todos os direitos reservados. Nenhuma parte desta publicação poderá ser reproduzida ou transmitida de qualquer modo ou por qualquer outro meio, eletrônico ou mecânico, incluindo fotocópia, gravação ou qualquer outro tipo de sistema de armazenamento e transmissão de informação, sem prévia autorização, por escrito, da Editora e Distribuidora Educacional S.A.

Presidente

Rodrigo Galindo

Vice-Presidente Acadêmico de Graduação e de Educação Básica

Mário Ghio Júnior

Conselho Acadêmico

Alberto S. Santana

Ana Lucia Jankovic Barduchi

Camila Cardoso Rotella

Cristiane Lisandra Danna

Danielly Nunes Andrade Noé

Emanuel Santana

Grasiele Aparecida Lourenço

Lidiane Cristina Vivaldini Olo

Paulo Heraldo Costa do Valle

Thatiane Cristina dos Santos de Carvalho Ribeiro

Revisão Técnica

Fillipe Matos de Vasconcelos

Hugo Tanzarella Teixeira

Luis Guilherme Trovó Cassanelli

Roberto Mac Intyer Simões

Editorial

Adilson Braga Fontes

André Augusto de Andrade Ramos

Cristiane Lisandra Danna

Diogo Ribeiro Garcia

Emanuel Santana

Erick Silva Griep

Lidiane Cristina Vivaldini Olo

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Mariani, Leidiane

M333e Eficiência energética e qualidade de energia / Leidiane

Mariani, Natalí Nunes dos Reis da Silva. – Londrina : Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2017.

216 p.

ISBN 978-85-8482-827-2

1. Energia elétrica – Controle de qualidade. 2. Energia elétrica – Conservação. 3. Sistemas de energia elétrica. I. Silva, Natalí Nunes dos Reis da. II. Título.

CDD 621.31

Thamiris Mantovani CRB-8/9491

2017

Editora e Distribuidora Educacional S.A.

Avenida Paris, 675 – Parque Residencial João Piza

CEP: 86041-100 – Londrina – PR

e-mail: editora.educacional@kroton.com.br

Homepage: <http://www.kroton.com.br/>

Sumário

| | |
|--|------------|
| Unidade 1 Energia elétrica e o desenvolvimento social | 7 |
| Seção 1.1 - Fontes de energia | 9 |
| Seção 1.2 - Fontes de energia renovável e não renovável | 24 |
| Seção 1.3 - Sistemas de energia monofásicos e polifásicos | 41 |
| Unidade 2 Análise de sistemas elétricos e conservação de energia | 61 |
| Seção 2.1 - Equipamentos elétricos e suas características reativas | 63 |
| Seção 2.2 - Fator de potência | 79 |
| Seção 2.3 - Programas de conservação de energia | 92 |
| Unidade 3 Falhas e distúrbios do sistema elétrico e sua identificação | 109 |
| Seção 3.1 - Qualidade da energia | 111 |
| Seção 3.2 - Falhas no sistema elétrico | 124 |
| Seção 3.3 - Indicadores usados nos sistemas elétricos | 138 |
| Unidade 4 Identificação das fontes de energias renováveis | 155 |
| Seção 4.1 - Desenvolvimento tecnológico e viabilidade das energias renováveis | 157 |
| Seção 4.2 - Sistemas eólicos e fotovoltaicos | 176 |
| Seção 4.3 - Sistema interligado | 194 |

Palavras do autor

Nos últimos anos, a sociedade vem discutindo e se preocupando muito com as questões ambientais, como o aquecimento global. Assim, medidas que reduzam e tornem mais eficiente o consumo energético são essenciais. Além disso, o desenvolvimento dos países e o crescimento populacional vêm aumentando a demanda por energia, e cada vez se exige mais qualidade da energia fornecida para atender ao consumidor e reduzir perdas. Assim, a disciplina de Eficiência energética e qualidade de energia é muito importante para que você, aluno, futuro profissional da área elétrica e eletrônica, possa desenvolver um bom trabalho e estar preparado para atender às expectativas da sociedade.

Para isso, é muito importante que você se dedique a estudar o conteúdo dessa disciplina e aproveite os momentos com seu professor para compreender melhor os conceitos e se aprofundar na prática. Dessa forma, espera-se que ao final desta disciplina você tenha conhecido os principais fundamentos, parâmetros e agentes relacionados à eficiência energética e à qualidade de energia elétrica, especialmente no que condiz ao funcionamento do setor energético nacional, às fontes de energia, à conservação e eficiência energética e à qualidade da energia elétrica.

Nesse sentido, esperamos que você desenvolva as seguintes competências:

- Conhecer os principais fundamentos, parâmetros e agentes relacionados à eficiência energética e à qualidade de energia elétrica.
- Ser capaz de distinguir os diferentes tipos de fontes de energia, conhecer seus prós e contras do ponto de vista econômico e social.
 - Conhecer os equipamentos elétricos residenciais, industriais e comerciais, compreendendo a correção de fatores de potência.
 - Saber identificar as diferentes falhas e distúrbios existentes em uma rede de energia elétrica.
 - Compreender o potencial elétrico no contexto nacional e ter visão a respeito do futuro das fontes renováveis.

- Identificar as principais perdas no sistema de energia elétrica e informar-se com uma visão geral a transmissão de energia elétrica por linhas de transmissão.
- Apresentar a importância do planejamento na rede de energia elétrica.

Para que você alcance esses objetivos, a disciplina foi estruturada em quatro unidades, sendo que na primeira estudaremos o conceito de energia e suas formas, as fontes de energia não renováveis e renováveis, os sistemas monofásicos e polifásicos de energia elétrica e como ela é transportada. Na segunda unidade, o objetivo é entender alguns aspectos para a análise do sistema elétrico, como eficiência dos equipamentos, dimensionamento correto de instalações elétricas e correção do fator de potência, além dos programas de conservação de energia elétrica. Na terceira unidade, estudaremos as falhas e os distúrbios que podem ocorrer em um sistema elétrico e como é possível identificá-los, para, assim, melhorar a qualidade da energia. Finalmente, na quarta unidade será o momento de entender como o desenvolvimento tecnológico pode melhorar a eficiência dos equipamentos elétricos e se aprofundar no tema das fontes eólica e solar de energia elétrica e do sistema interligado.

Caro aluno, esperamos que você esteja motivado a estudar e aprender os conceitos e as aplicações da eficiência energética e da qualidade da energia!

Bons estudos e ótimo aprendizado!

Energia elétrica e o desenvolvimento social

Convite ao estudo

Caro aluno, nesta unidade, estudaremos o setor energético como um todo, apresentando o conceito de energia e onde se encontram as principais fontes de energia renováveis e não renováveis do país. Também estudaremos como o desenvolvimento social e econômico está atrelado à utilização de energia e suas possíveis consequências do ponto de vista ambiental, social e econômico. Por fim, exploraremos aspectos do transporte de energia, em especial o transporte de energia elétrica e a importância do planejamento de sua expansão.

Na primeira seção, estudaremos o conceito e os tipos de energia, as fontes de energia disponíveis e como podem ser utilizadas. Na segunda seção, serão abordadas as fontes não renováveis e renováveis de energia, os aspectos do planejamento energético, focando na energia elétrica, aspectos sociais, ambientais e econômicos e características do setor elétrico nacional. Na última seção, estudaremos os sistemas monofásicos e polifásicos e como é realizada a transmissão de energia elétrica.

Portanto, temos como objetivo dessa unidade que você, aluno, seja capaz de distinguir os diferentes tipos de fontes de energia e conhecer seus prós e contras do ponto de vista econômico, social e ambiental. Com isso, você poderá analisar as fontes de energia para projetos de geração de energia e no planejamento energético de uma empresa, região ou país.

Esta unidade se insere em uma lógica de entender alguns conteúdos necessários para a elaboração de estudos e projetos de energia, que são base para o planejamento energético.

Nesse contexto, você, aluno, é o gestor que lidera uma equipe que realiza estudos para o planejamento energético de um país e precisa entender conceitos e compreender como aplicá-los em uma situação real. Nesse sentido, com o andamento das seções, o nível do planejamento será aprofundado, abordando novas áreas do setor energético e demandando que você construa uma visão integrada do tema.

Seção 1.1

Fontes de energia

Diálogo aberto

Caro aluno, como nesta seção estudaremos o conceito e os tipos de energia, as fontes de energia disponíveis e como podem ser utilizadas, imaginaremos uma situação em que você seja o superintendente de recursos energéticos da empresa pública de planejamento de um país e, com o apoio de uma equipe multidisciplinar, deva realizar o planejamento energético de um país para os próximos dez anos. Esse planejamento de médio prazo deve ser apresentado ao ministro de energia do país no formato de um relatório e, após aprovação, será apresentado para a sociedade e disponibilizado para download no site do Ministério.

Para cumprir esse desafio, você e sua equipe teriam analisado as características econômicas, sociais e geográficas do país e conseguido inferir o seguinte:

- A expectativa de crescimento da população é de 1% a.a. (ao ano) e do Produto Interno Bruto é de 4% a.a. Para atender a esse crescimento, o planejamento é aumentar em 5% a.a. a capacidade elétrica instalada e a oferta de combustíveis no prazo de 10 anos.
- Sua economia é baseada na atividade florestal, agropecuária e industrial, com grande produção de eucalipto, cana-de-açúcar, suínos e soja. Possui reservas minerais e petrolíferas pouco exploradas.
- Possui uma extensa costa marítima, com cerca de 1000 km de extensão, e uma densa rede de rios caudalosos. É formado por planícies e tem um regime de ventos bastante regulares e intensos. Localiza-se próximo ao Trópico de Capricórnio, com clima ameno e insolação regular.
- Tem como vizinho um país que possui vastas reservas de gás natural e outro que possui uma matriz energética com grande disponibilidade de energia hidrelétrica e uma rede de transmissão de energia elétrica densa e consolidada.

A primeira etapa do seu trabalho seria definir alguns pontos-chave do planejamento e, com isso, elaborar um texto a ser enviado para o diretor da sua empresa para aprovação.

Considerando isso, elabore um texto com um resumo de algumas decisões técnicas que você e sua equipe tomariam para realizar o planejamento energético do país para os próximos dez anos. Pedimos que responda às seguintes perguntas ao longo do texto:

- Quais fontes de energia estão disponíveis no país? E quais fontes de energia estão disponíveis para importação de seus países vizinhos?
- Em uma avaliação inicial e sem considerar os custos, quais seriam as melhores fontes se os governantes e a sociedade optassem por reduzir o uso de fontes não renováveis?
- Se o país tiver necessidade de importar energia, seria mais eficiente importar energia elétrica ou gás natural de seus vizinhos?

Discuta o assunto usando os conceitos apresentados na disciplina, como os tipos e as fontes de energia e sua utilização, e faça considerações além das apresentadas para detalhar a situação e justificar melhor sua decisão.

Caro superintendente de recursos energéticos, você está preparado para resolver essa tarefa?

Espero que você esteja animado. Bons estudos e um ótimo trabalho!

Não pode faltar

Conceito de energia

Existem diversos conceitos para a palavra energia, porém, no âmbito da ciência, a energia pode ser vista como a capacidade de um corpo realizar trabalho. Uma forma interessante de entender isso é pela definição de Halliday (2012, p. 145), que diz que “a energia é como um número que associamos a um sistema de um ou mais objetos, sendo que se uma força afeta um dos objetivos, fazendo-o, por exemplo, entrar em movimento, o número que descreve a energia do sistema varia”.

A unidade utilizada para representar esse tipo de energia, segundo o Sistema Internacional de Unidades, é o Joule (J), sendo

que $1J = 1kg \times m^2 \times s^{-2}$.

Tipos de energia

A energia pode existir em quatro formas, segundo a classificação científica: cinética, potencial, massa e radiante.

A **energia cinética** refere-se ao movimento de um corpo e é proporcional à massa e à velocidade do corpo que se movimenta. Assim, se o corpo estiver em repouso, a energia cinética será nula. Essa forma de energia está presente quando uma pessoa caminha ou quando um carro está em movimento.

Já a **energia potencial** tem relação com a configuração ou posição de um corpo em um sistema, podendo ser também vista como a energia “armazenada” em um objeto e que com a realização de trabalho será transformada em outros tipos de energia. Há dois tipos de energia potencial: a gravitacional e a elástica.

A energia potencial gravitacional é a energia armazenada em um objeto sujeito à força da gravidade, que faz com que a Terra e um corpo se atraiam mutuamente.



Exemplificando

Quando uma bola é solta de uma certa altura, a energia potencial gravitacional contida nela por causa da sua distância em relação à Terra se transforma em energia cinética, que movimenta a bola até o chão. Um exemplo disso é quando puxamos um balanço de criança até uma certa altura para que, soltando-o, a energia potencial seja convertida em energia cinética e o balanço se movimente.

A energia potencial elástica está associada à energia armazenada na elasticidade de um corpo, que faz com que ele se deforme com a atuação de uma força e volte a sua forma inicial, quando essa força é interrompida.



Exemplificando

Quando esticamos ou comprimimos uma mola, ela armazena energia potencial elástica, e quando volta ao seu estado inicial, essa energia

é convertida em energia cinética ou outro tipo de energia que pode empurrar ou puxar um objeto, por exemplo.

Outro tipo de energia é a **massa**, conceito que surgiu no âmbito da física moderna (física quântica e relativística). Um corpo em repouso pode ter sua massa convertida em energia por meio de processos físicos. Esse conceito de equivalência entre massa e energia é expresso na equação $E = m \times c^2$ de Albert Einstein.



Exemplificando

O principal exemplo de energia da massa é a gerada por reações nucleares, como a fissão do urânio ou a fusão do hidrogênio, em que a soma das massas dos produtos formados é menor do que a soma das massas dos reagentes, sendo a diferença convertida em energia e liberada no processo.

A **energia radiante** é a energia transmitida por meio de ondas eletromagnéticas e não depende da existência de matéria entre um corpo e outro. O calor proveniente do sol é um exemplo desse tipo de energia, pois as partículas vibrando no sol geram ondas que se propagam pelo espaço e geram calor quando encontram matéria na Terra.

Apesar de os cientistas indicarem que existem apenas os quatro tipos de energia descritos anteriormente, no cotidiano são dados nomes específicos para deixar clara a forma de armazenamento da energia ou o processo de transformação envolvido. Assim, outros tipos de energia podem ser descritos como:

- Energia mecânica: que é a soma da energia cinética e potencial.
- Energia térmica: é a soma das energias cinéticas de suas partículas microscópicas devido aos movimentos de translação, vibração ou rotação.
- Energia elétrica: é a energia potencial que se refere a duas partículas com carga elétrica distantes entre si.

- Energia química: é a energia potencial das ligações químicas entre os átomos, sendo liberada em reações químicas, como a combustão.
- Nuclear: é a energia liberada na transformação de núcleos atômicos, estando ligada à energia da massa já apresentada anteriormente.



Assimile

Lembre-se de que, se analisarmos a sua real origem, as várias formas de energia podem ser agrupadas em apenas quatro tipos: energia cinética, energia potencial, massa e energia radiante. É muito importante que você grave isso para entender as fontes de energia que estudaremos.

Fontes de energia

As fontes de energia podem ser primárias ou secundárias, dependendo da origem. As fontes primárias são originadas diretamente dos recursos naturais, como a água, o sol, o vento, o petróleo, o gás natural, o carvão e o urânio. Já as fontes secundárias são as fontes de energia após uma transformação ou processamento, como a energia elétrica que provém da energia potencial da água ou da queima de combustível em termelétricas, e a gasolina ou o óleo diesel que são produzidos no refino do petróleo.

A energia também pode ser classificada em renovável ou não renovável, dependendo da capacidade de sua fonte se restaurar, ou seja, de ser utilizada ao longo do tempo sem que se esgote. Exemplos de fontes renováveis de energia são: sol, água, biomassa vegetal (florestas, cana de açúcar, soja etc.), biomassa residual, biomassa, vento, ondas, marés, correntes marítimas e geotérmica. Já as fontes de energia não renováveis foram originadas há milhares de anos e dependem dessa escala de tempo para serem renovadas, ou seja, considera-se que na escala de tempo da humanidade essas fontes não se renovam. O petróleo, o gás natural, o carvão mineral e os combustíveis nucleares são exemplos dessas fontes.

No Brasil, as fontes renováveis de energia utilizadas são basicamente: biomassa de cana, hidráulica, lenha e carvão vegetal, eólica, solar, lixívia (efluente da indústria de papel e celulose), biodiesel, biogás e

outras biomassas. As fontes não renováveis são: petróleo e derivados, gás natural, carvão mineral, urânio e outras não renováveis. Na Tabela 1.1 é possível ver a distribuição da oferta dessas fontes no país em 2015, destacando-se o petróleo e derivados (37,3%), o gás natural (13,7%), a biomassa de cana (16,9%) e a hidráulica (11,3%) (EPE, 2016). Observa-se que mais de 58% da energia total do país é proveniente de petróleo e seus derivados e outras fontes não renováveis, revelando a grande dependência que o Brasil tem dessas fontes. Outro ponto interessante é o valor expressivo de oferta de energia de biomassa de cana (16,9 %) em relação ao total, sendo maior que a oferta de energia hidráulica (11,3%).

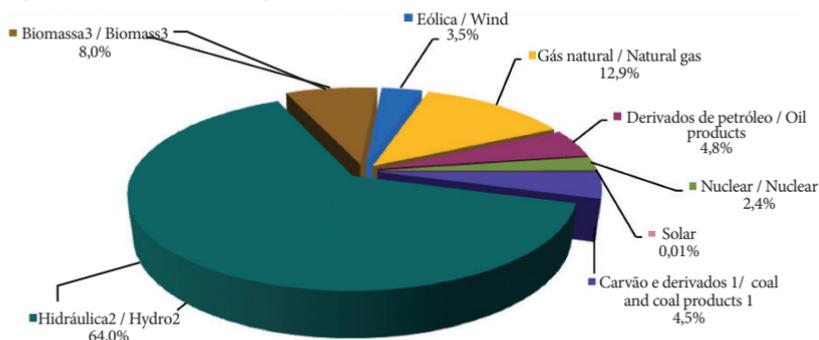
Tabela 1.1 | Fontes de energia do Brasil em 2015

| Fonte | | Participação na oferta de energia total | Total |
|----------------------------------|------------------------|---|-------|
| Não renováveis | Petróleo e derivados | 37,3% | 58,8% |
| | Gás natural | 13,7% | |
| | Carvão mineral | 5,9% | |
| | Urânio | 1,3% | |
| | Outras não renováveis | 0,6% | |
| Renováveis | Biomassa de cana | 16,9% | 41,2% |
| | Hidráulica | 11,3% | |
| | Lenha e carvão vegetal | 8,2% | |
| | Lixívia | 2,62% | |
| | Biodiesel | 1,03% | |
| | Eólica | 0,62% | |
| | Outras biomassas | 0,38% | |
| | Biogás | 0,03% | |
| Gás industrial de carvão vegetal | 0,01% | | |

Fonte: adaptada de EPE (2016).

Uma parte da energia total consumida no país é transformada em energia elétrica, e agora será apresentada qual é a participação das fontes na geração de eletricidade em 2015 no Brasil (Figura 1.1). Segundo a EPE (2016), a fonte hidráulica destacou-se com 64% do total, vindo o gás natural em seguida com 12,9% e a biomassa com 8%.

Figura 1.1 | Fontes de energia do setor elétrico no Brasil em 2015



1 Inclui gás de coqueria. 2 Inclui importação de eletricidade. 3 Inclui lenha, bagaço de cana, lixívia e outras recuperações.

Fonte: adaptada de EPE (2016).

Utilização das fontes de energia

A energia é um recurso muito importante para a sociedade, pois é utilizada para a mobilidade, para a produção de alimentos e bens de consumo, para o abastecimento de água etc. Por isso, o setor energético é estratégico no desenvolvimento dos países e demanda planejamento de longo prazo para garantir sua segurança energética. No entanto, além de suprir a demanda por energia, é importante que se considere outros aspectos no planejamento energético, como sociais, ambientais e econômicos.



Refleta

Energia renovável é igual à energia sustentável? Existe combustível renovável que não é sustentável? Por que a sustentabilidade está tão em pauta nos dias atuais? O aquecimento global pode ter relação com o uso de energia?

O setor energético brasileiro total, ou seja, não apenas o setor de energia elétrica, teve como maiores consumidores o setor industrial e o de transporte, totalizando 65% do consumo total de energia em 2015. Na Figura 1.2, é possível observar a distribuição do consumo de energia.

Figura 1.2 | Consumo de energia por setor no Brasil em 2015

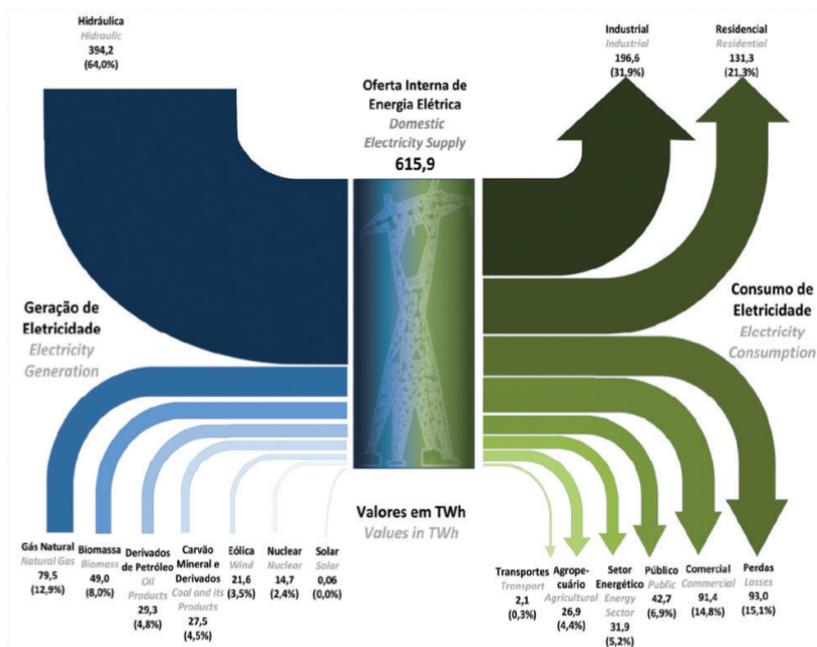


Fonte: adaptada de EPE (2016).

Quando se analisa o setor energético, normalmente se apresentam dados para todo o setor energético e depois apenas para o setor elétrico, por ser um setor muito importante para toda a sociedade. Dessa forma, observa-se que há uma divisão em duas grandes áreas, a área elétrica e a área dos combustíveis. Apesar dessas áreas serem tratadas separadamente, elas se inter-relacionam, já que combustíveis são utilizados para gerar energia elétrica nas termelétricas, por exemplo. No entanto, nessa disciplina focaremos nos aspectos da energia elétrica.

A facilidade de transporte da eletricidade e seu baixo índice de perda energética durante conversões incentivam o uso da energia em grande escala no mundo todo, até mesmo no Brasil (CCEE, 2016). No caso da energia elétrica, como pode ser observado na Figura 1.3, os maiores consumidores são o industrial e o residencial, totalizando 53,2%, segundo dados da EPE (2016).

Figura 1.3 | Consumo de energia elétrica no Brasil por setor em 2015



* Inclui importação e autoprodução.
Fonte: adaptada EPE (2016).

Para o planejamento energético de um país, é essencial que se analise a oferta e a demanda futura. Pelo lado da oferta, deve-se observar quais são as fontes disponíveis e viáveis economicamente para uso. E pelo lado da demanda, deve-se considerar os setores consumidores e sua tendência de crescimento. Assim, é possível garantir o suprimento energético para o desenvolvimento de toda a sociedade.



Pesquise mais

Qual é a importância da energia para a humanidade? A oferta e o uso de energia elétrica e combustíveis têm relação com o nível de desenvolvimento de uma sociedade? Qual é a relação do consumo energético e o nível de desenvolvimento entre países europeus e africanos, por exemplo?

Sem medo de errar

Retomando a situação-problema proposta no no item Diálogo aberto desta seção, percebemos que o país tem disponível em seu território as seguintes fontes: hidráulica, marés, ondas, correntes marítimas, vento, sol, biomassa florestal (eucalipto), etanol (cana-de-açúcar), biomassa residual (efluentes da suinocultura, da indústria de papel e celulose de eucalipto da produção de etanol), biodiesel (soja), petróleo e carvão mineral. Já para importação, o país teria disponível gás natural e energia hidrelétrica.

! Atenção

Aluno, é importante que você analise com atenção todas as características do país em busca dos recursos naturais que estão disponíveis para uso energético. Ter uma visão geral do país é muito importante nesse momento.

No entanto, a disponibilidade de fontes não indica necessariamente que elas tenham viabilidade técnica e econômica para seu uso em larga escala. Assim, é importante deixar claro que o passo seguinte desse planejamento seria analisar esses aspectos para ter certeza de que essas fontes realmente poderiam ser consideradas a médio e longo prazo para abastecimento de um país.

Analisando a vontade dos governantes e da sociedade de reduzir o uso de fontes não renováveis de energia, percebe-se que está ligada a uma tendência mundial de busca pela sustentabilidade, já que a produção e o consumo de energia são grandes causadores de impactos ambientais, principalmente as não renováveis. Assim, considera-se que as melhores fontes de energia para substituir as não renováveis nesse país, em uma avaliação inicial e sem considerar os custos e os detalhes técnicos, seriam: hidráulica, marés, ondas, correntes marítimas, vento, sol, biomassa florestal (eucalipto), etanol (cana-de-açúcar), biomassa residual (efluentes da suinocultura, da indústria de papel e celulose de eucalipto da produção de etanol), biodiesel (soja).

Apesar de as fontes renováveis não serem totalmente limpas e sustentáveis, entre elas há fontes que podem ser ambientalmente menos impactantes se analisarmos todo o seu ciclo de vida.

Entretanto, realizando estudos detalhados acerca disso, há divergências entre pesquisadores sobre o real impacto ambiental e social de uma fonte de energia. Mesmo que exista certa relatividade na avaliação das fontes, é importante deixar claro que a demanda por energia existe e as escolhas devem ser feitas para se garantir a oferta.

Outro ponto importante a ser analisado é a localização das fontes de energia em relação aos centros consumidores. Mesmo que uma fonte tenha grande potencial técnico e viabilidade econômica, se estiver muito distante dos consumidores, os investimentos para transmissão da energia elétrica gerada ou transporte do combustível produzido podem tornar os custos não competitivos ou até impeditivos. Então, também é muito importante que se analise igualmente a distribuição territorial da oferta e da demanda de energia para que o planejamento energético seja praticável e coerente com a realidade do país.

No caso de haver a possibilidade de ser necessária a importação de energia pelo país, caso as fontes internas não atendam à demanda ou sejam muito caras comparadas com as importadas, seria mais eficiente tecnicamente importar energia elétrica ao invés de gás natural de seus vizinhos, pois, no sentido de eficiência, essa energia é a mais facilmente transportada e a que menos tem perdas durante a conversão. No entanto, essa decisão depende da avaliação de diversos aspectos, como: o custo da energia, a distância entre a fonte e o país, a estabilidade política do país vizinho, as condições da economia do próprio país, a capacidade de investimento do país; a disponibilidade de plantas termelétricas para conversão de gás natural em energia elétrica no país, a estabilidade na demanda por gás natural e energia elétrica etc., ou seja, a tomada de decisão, quando se aborda questões energéticas, é bem mais complexa do que parece.

Avançando na prática

Fontes de energia em um país com poucos recursos naturais

Descrição da situação-problema

Caro aluno, agora imaginaremos que você, ainda como superintendente de recursos energéticos da empresa pública de planejamento de um país, tenha sido convidado a apoiar uma equipe

multidisciplinar no planejamento energético de um país vizinho para dez anos, com recursos naturais mais limitados. Esse planejamento de médio prazo também deverá ser apresentado ao ministro de energia desse país vizinho no formato de um relatório e, após aprovação, será apresentado para a sociedade e disponibilizado para download no site do Ministério de Energia.

Para cumprir esse novo desafio, você analisou as características econômicas, sociais e geográficas do país e conseguiu inferir o seguinte:

- Não possui uma costa marítima e todo o seu potencial hidrelétrico já foi aproveitado.
- Tem um regime de ventos bastante regular e intenso.
- Localiza-se em uma região com pouca incidência solar.
- Seus países vizinhos não têm disponibilidade energética para exportação.
- Sua economia é baseada na atividade florestal e agropecuária, com grande produção de eucalipto e soja.
- Não possui reservas minerais e petrolíferas.

A primeira etapa do seu trabalho é definir alguns pontos-chave do planejamento e, com isso, elaborar um texto a ser enviado para a equipe do país vizinho. Então, elabore um resumo de algumas decisões técnicas que você tomaria para realizar o planejamento energético do país vizinho para os próximos dez anos. As questões que você deve responder ao longo do texto são:

- Quais seriam as fontes de energia que poderiam ser aproveitadas para ampliação da oferta de energia elétrica, especificamente?
- Se o país não pudesse importar petróleo e seus derivados, que tipo de combustível poderia produzir?
- Considerando que a questão energética é estratégica para todos os países, em um país como esse, com tão poucas opções para suprimento energético, qual é a importância do planejamento do setor energético?

Resolução da situação-problema

Analisando as características do país, é possível concluir que, a princípio, as fontes disponíveis para aumento na oferta de energia no país seriam: ventos, biomassa florestal (eucalipto), biomassa residual (efluentes da indústria de papel). A fonte solar também poderia ser considerada, apesar da pouca incidência solar, pois os custos para implantação vêm sendo reduzidos nos últimos anos e podem chegar a se tornar atrativos mesmo para locais com pouca incidência solar, principalmente em países que têm pouca disponibilidade energética.

Se o país não pudesse importar petróleo e seus derivados, o combustível que poderia ser produzido seria o biodiesel a partir de soja, analisando-se se os veículos e equipamentos a diesel seriam compatíveis para uso do biodiesel. Esse combustível tem muitos benefícios ambientais, pois emite menos poluentes na sua queima e menos Gases de Efeito Estufa (GEE). Além disso, é renovável, pois utiliza biomassa vegetal que pode ser cultivada. Outro ponto importante é a possibilidade de utilizar soja cultivada por agricultores familiares, promovendo a melhora das condições sociais do país. No entanto, o uso de soja para produção de biodiesel pode promover a conversão do uso de terras para a produção de alimentos em terras para produção de combustível. Isso, segundo alguns estudiosos, poderia diminuir a oferta de alimentos, aumentando seus preços, o que prejudicaria a população do país. No entanto, o biodiesel é visto com bons olhos pela maioria dos especialistas quando se analisam todos os prós e contras.

Assim, para garantir o suprimento energético de um país com poucos recursos energéticos como esse, é muito importante que haja uma atuação muito forte de seu governo, coordenando o planejamento. A infraestrutura de geração de energia deve ser planejada para atender o crescimento da demanda e estar preparada para variações na disponibilidade das fontes. Devem haver políticas públicas claras para o incentivo ao desenvolvimento de novas fontes de energia.



Faça você mesmo

Caro aluno, sugerimos que você aplique os conhecimentos desenvolvidos nesta seção por meio da seguinte leitura:

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética.

Plano Decenal de Expansão de Energia 2023. Brasília: MM/EPE, 2014.

Então, analise como o país está planejando o uso das fontes de energia. As fontes renováveis, como eólica, solar, biomassa e biogás, estão sendo consideradas?

Faça valer a pena

1. A energia hidrelétrica por barramento é gerada, basicamente, a partir da diferença de altura entre a água antes e depois da barragem de altura. No entanto, há uma pequena parcela de energia que é gerada pela vazão de água do rio. Já a energia eólica é gerada por meio do aproveitamento da velocidade do vento, que faz as pás girarem em torno de um eixo.

A energia hidrelétrica por barramento e a energia eólica são geradas principalmente a partir da transformação de que tipo de energia, respectivamente?

- a) Massa e cinética.
- b) Ambas cinética.
- c) Ambas potencial.
- d) Potencial e cinética.
- e) Cinética e potencial.

2. As fontes primárias são originadas diretamente dos recursos naturais e as fontes secundárias são as fontes de energia após uma transformação ou processamento.

Escolha a alternativa que apresenta apenas fontes de energias primárias:

- a) Etanol, sol, gás natural.
- b) Gás natural, sol, urânio.
- c) Urânio, sol, óleo diesel.
- d) Gasolina, carvão mineral, etanol.
- e) Ventos, sol, gasolina.

3. A fonte de energia elétrica de que o Brasil tem maior dependência (segundo dados de 2015 da EPE) é a hidráulica, e grande parte dessa energia é proveniente da região Sudeste. No entanto, já houve períodos de estiagem (pouca chuva) na região Sudeste em alguns anos, o que reduziu bastante a reserva de água dos reservatórios das usinas. Nesses casos, para garantir o abastecimento energético do país, são acionadas termelétricas que suprem a falta de energia, principalmente nos horários

de maior consumo no dia. Como a energia termelétrica é mais cara que a hidrelétrica, o custo da energia gerada no país aumenta, interferindo na tarifa para o consumidor final.

As afirmativas a seguir discorrem sobre as consequências do aumento de tarifas de energia elétrica:

I. Redução do poder aquisitivo das famílias, por gastarem mais com energia elétrica.

II. Redução da competitividade das indústrias, pelo aumento dos custos de produção.

III. Desincentivo ao uso de medidas de eficiência no uso da energia.

Analisando essas afirmativas, escolha a alternativa correta:

- a) As afirmativas I e II são verdadeiras.
- b) Apenas a afirmativa III é verdadeira.
- c) As afirmativas I e III são verdadeiras.
- d) As afirmativas II e III são verdadeiras.
- e) Apenas a afirmativa I é verdadeira.

Seção 1.2

Fontes de energia renovável e não renovável

Diálogo aberto

Caro aluno, nesta seção, imaginaremos que você trabalha na Empresa de Pesquisa Energética, instituição brasileira responsável por apoiar o governo no planejamento energético, e que você é o superintendente de recursos energéticos da empresa pública de planejamento do Brasil e é responsável por coordenar uma equipe multidisciplinar na elaboração do planejamento do setor elétrico no Plano Nacional de Energia 2050 (PNE 2050), que é planejamento de longo prazo para o país.

Considerando essa grande oportunidade profissional de planejar o setor energético brasileiro, você está inserido em uma situação-problema na qual você deve definir as diretrizes para sua equipe iniciar o trabalho. Com essas diretrizes, será realizado o planejamento detalhado da oferta e demanda de energia a ser inserido no relatório do PNE 2050.

Então, agora é o momento de elaborar um texto com as diretrizes do planejamento elétrico para 2050. Para isso, utilize os conceitos que são apresentados nessa seção como a disponibilidade de fontes de energia não renováveis e renováveis no Brasil e o funcionamento do setor elétrico do país. Pedimos que você responda às seguintes perguntas ao longo do texto:

- Você considera necessário analisar a oferta de gás natural ou carvão mineral? Por quê?
- A princípio, quais fontes de energias não renováveis e renováveis você consideraria no planejamento da oferta de energia elétrica especificamente? Justifique suas escolhas no sentido de disponibilidade da fonte no país e viabilidade técnica e econômica a curto, médio e longo prazo.

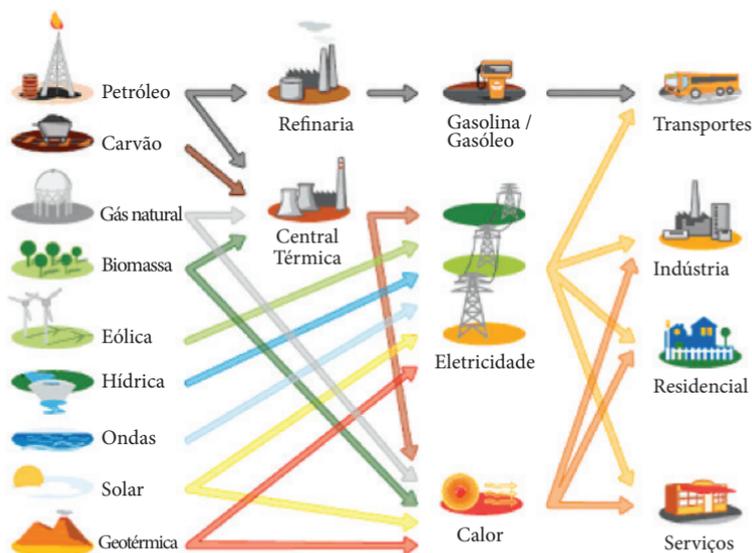
Caro superintendente de recursos energéticos, você está preparado para cumprir mais esse trabalho?

Espero que você esteja animado. Bons estudos e um ótimo trabalho!

Não pode faltar

Denominam-se recursos energéticos ou fontes as reservas acessíveis de energia contidas na natureza, podendo estas serem utilizadas diretamente ou através de processos de transformação na geração de energia elétrica ou térmica ou na produção de combustíveis, para aplicação nos setores de transportes, industrial, residencial e de serviços. É importante que uma mesma fonte possa gerar diversos tipos de energia. Na Figura 1.4, podemos ver um esboço (ou diagrama) com a maioria das fontes de energia disponíveis no planeta. A seguir apresentaremos algumas de suas características.

Figura 1.4 | Fontes de energia não renováveis e renováveis



Fonte: adaptada de EDP (2016).

Energias não renováveis

Os combustíveis fósseis têm origem na degradação de matéria orgânica, ao longo de milhões de anos, em condições específicas de pressão e temperatura no subsolo. Seus derivados energéticos são constituídos por carbono e outros compostos, que quando queimados geram diversos poluentes atmosféricos, como dióxido de enxofre (SO₂) ou dióxido de nitrogênio (NO₂), e gases causadores de efeito estufa (GEE), como dióxido de carbono (CO₂). Por isso, apesar de ainda

serem o principal energético mundialmente, são muito combatidos, pois a velocidade com que a humanidade explora esses combustíveis é muito superior à velocidade com que o meio ambiente nos fornece novamente. Os tipos de combustíveis fósseis mais utilizados são:

- **Petróleo:** é uma mistura de compostos orgânicos que, após o refino, dá origem a derivados que são utilizados energeticamente (gasolina, óleo diesel, querosene, GLP) ou como matéria-prima (asfalto, ceras de parafinas, coque e plásticos). Segundo dados da Agência Internacional de Energia (2016), em 2014, a Arábia Saudita foi o maior produtor mundial de petróleo bruto, seguido por Estados Unidos, Rússia e Canadá. Destaca-se que esses dados variam bastante ao longo do tempo, pois, conforme os preços dos derivados do petróleo, os países reduzem ou aumentam sua produção. O Brasil tem uma produção considerável e um grande potencial, principalmente após a viabilização do petróleo da camada do pré-sal.
- **Gás natural:** é uma mistura de hidrocarbonetos leves, principalmente metano, encontrado isoladamente ou próximo ao petróleo. O Brasil importa gás natural da Bolívia para uso nas indústrias e nas termelétricas. Além disso, nos últimos anos foram descobertas várias reservas no Brasil, assim como as descobertas do pré-sal, o que gera uma tendência de aumento da oferta desse combustível a médio e longo prazo. É considerado um combustível mais “limpo” que os derivados de petróleo, mas também emite GEE.
- **Carvão mineral:** foi o primeiro combustível fóssil explorado pelo homem e, apesar dos impactos ambientais e sociais na exploração e queima, ainda é o segundo energético mais consumido no mundo, perdendo apenas para o petróleo. A China e os EUA são os maiores produtores e consumidores. As poucas reservas do Brasil, localizadas no Sul, são de baixa qualidade e são utilizadas em termelétricas e na indústria siderúrgica.

A **energia nuclear** é gerada a partir de reações de transformação dos núcleos atômicos do urânio, as quais liberam energia térmica. A partir daí o processo é similar a uma termelétrica, onde é produzido

vapor de água para a movimentação da turbina e do gerador. No mundo, há 442 reatores nucleares em operação, com capacidade elétrica instalada de 384 GW, sendo os líderes França, Japão e Rússia (ELETROBRAS, 2016). O Brasil tem duas plantas em operação (Angra 1 e 2) e uma em construção (Angra 3). Depois do acidente com a Usina de Fukushima em 2011, muitos países cancelaram os investimentos e fecharam suas usinas. Contudo, mesmo com a geração de resíduos radioativos, a energia nuclear é considerada "limpa" por especialistas por não gerar poluentes atmosféricos e GEE.

Energias renováveis

Como já estudado na seção anterior, as energias renováveis são geradas a partir de recursos naturais, como sol, vento e água. A seguir apresentaremos as principais energias renováveis.

Os **biocombustíveis** são produzidos pelo processamento de biomassa vegetal ou gorduras animais. Segundo Leite e Leal (2007), as razões para o interesse nesse combustível são muitas e variam de um país para outro e também ao longo do tempo. As principais razões são as seguintes: diminuir a dependência externa de petróleo, por razões de segurança, de suprimento ou impacto na balança de pagamentos; minimizar os efeitos das emissões veiculares na poluição local, principalmente nas grandes cidades; e controlar a concentração de GEE na atmosfera. No entanto, alguns pesquisadores levantam a discussão sobre a concorrência por terras para a produção de alimentos. Os biocombustíveis são:

- **Biodiesel:** produzido pelo processo de transesterificação, a partir de óleos vegetais (óleo de soja, mamona, canola, babaçu), de gorduras animais (sebo, banha de porco, gordura de frango), de algas ou de resíduo gorduroso de estações de tratamento de esgoto. Essa fonte de energia faz parte da matriz energética de diversos países, sendo que os maiores produtores mundiais são EUA, Brasil, Alemanha, Argentina e Colômbia (MME, 2016). No Brasil, há a obrigação de mistura de 7% de biodiesel no diesel, proporção que aumentou nos últimos anos.
- **Etanol:** é produzido a partir da fermentação dos açúcares contidos no caldo de matérias-primas, como cana-de-açúcar,

beterraba, mandioca e milho. Outra forma de obter etanol é pela quebra das moléculas de celulose contidas na palha e no bagaço da planta pelo processo de hidrólise, porém, passa a ser denominado etanol de 2ª geração. Entre os benefícios, estão a redução de emissão de GEE em relação à gasolina e a capacidade de geração de energia elétrica pelas próprias usinas de produção de etanol, por cogeração, para consumo próprio e injeção no sistema elétrico nacional. EUA e Brasil são os países onde o etanol é produzido em larga escala, sendo que a diferença entre os dois é que nos EUA a matéria-prima para a produção de etanol é o milho, que tem uma eficiência menor na conversão para etanol do que a cana-de-açúcar, matéria-prima utilizada no Brasil.

O **biogás** é produzido a partir da degradação de matéria orgânica em condições anaeróbias (sem oxigênio) e é composto por cerca de 60% de metano, gás com alto poder calorífico, que permite seu uso na geração de calor e energia elétrica e para a produção de biometano, gás similar ao gás natural. Uma das grandes vantagens é a possibilidade de uso de resíduos e efluentes para sua produção. O Brasil tem uma produção pouco expressiva, mas o setor vem se organizando no sentido de aproveitar o potencial dos resíduos agropecuários, industriais e das cidades.

Além dos biocombustíveis e do biogás, estudaremos a **biomassa** utilizada diretamente como fonte de energia, como o bagaço de cana-de-açúcar e a lenha.

- **Bagaço de cana-de-açúcar:** é originado do processamento da cana-de-açúcar e é utilizado como combustível nas caldeiras que produzem calor para a produção de álcool e açúcar.
- **Lenha:** é o combustível mais antigo utilizado pela humanidade. Apesar de seu uso ter reduzido bastante pela baixa eficiência, ainda é muito utilizado em regiões onde: não há outras fontes de energia; há abundância de resíduos de indústrias madeireiras; ou quando é a fonte mais barata. Além disso, é muito utilizada como combustível em usinas termelétricas.

A **energia geotérmica** é gerada a partir do calor do interior da Terra. Em algumas partes do planeta esse calor está mais próximo

da superfície, permitindo que poços capturem vapor ou água quente para utilização em aquecimento de residências, energia térmica para indústrias e geração de energia elétrica. É uma energia vantajosa por ser renovável e permitir geração 24 h/dia. No mundo há 13,2 GWe de capacidade instalada, sendo os EUA os líderes (REN21, 2016).

A **energia solar** pode ser aplicada na geração de eletricidade por meio dos seguintes sistemas:

- **Energia solar fotovoltaica:** é gerada pelo princípio de que um material semicondutor, quando exposto à radiação eletromagnética, emite elétrons. As placas de silício, material mais utilizado, são fabricadas para que aproveitem o movimento de emissão e retorno do elétron para criar uma diferença de potencial e, portanto, tensão para, assim, ser gerada energia elétrica. A energia solar pode ser gerada em pequena escala, por exemplo, no telhado de residências (microgeração), ou em larga escala, em grandes usinas solares. No mundo há 227 GWe de capacidade instalada e a China é líder, seguida por Alemanha (REN21, 2016). No Brasil, o uso de energia solar fotovoltaica vem crescendo, principalmente para microgeração, e os leilões de energia do governo já contemplam essa fonte, sendo que a previsão é que até 2018 o Brasil terá 2,6GW instalados (BRASIL, 2016).

- **Energia heliotérmica:** é gerada a partir de espelhos direcionados para refletir e concentrar a irradiação solar em um ponto ou tubulação, onde um fluido é circulado, e, quando aquecido, é utilizado para produzir vapor em uma termelétrica. Uma das vantagens é a possibilidade de armazenar o fluido aquecido e, assim, gerar energia em horários de alta demanda e pouca insolação. O Brasil ainda não possui usinas heliotérmicas, mas, no mundo, há 4,8 GWe de capacidade instalada, sendo que a Espanha tem 2,3 GW e os EUA 1,7 GW (REN21, 2016).

A **energia hidrelétrica** é gerada a partir da energia potencial e cinética dos rios, convertidas em energia mecânica na turbina e, em seguida, em energia elétrica no gerador. Uma usina hidrelétrica é composta basicamente pelo duto de tomada de água, também denominado de conduto forçado, turbina e gerador, havendo outras

estruturas, conforme o tipo de usina hidrelétrica. É importante saber que há dois tipos de hidrelétricas: por barramento e a fio de água. A grande vantagem das usinas com barramento é a possibilidade de armazenar água para períodos de estiagem ou para horários de alto consumo. Para produzir a energia hidrelétrica, é necessário integrar a vazão do rio, a quantidade de água disponível em determinado período de tempo e os desníveis do relevo, sejam eles naturais, como as quedas d'água, ou criados artificialmente (ANEEL, 2005). No mundo há 1.064 GWe de capacidade instalada e a China é o país líder (REN21, 2016). A capacidade instalada de energia hidrelétrica do Brasil é de 91,6 GW, o que representa 65% de toda a capacidade instalada no sistema interligado nacional (EPE, 2016).



Refleta

O alagamento de grandes áreas para geração de energia hidrelétrica causa impactos ambientais e sociais. Por que os impactos ambientais do alagamento para armazenagem de água na Amazônia são maiores que em regiões serranas?

A **energia maremotriz** e a **energia das ondas** são geradas pelo movimento das marés ou das ondas. Uma usina instalada no mar pode fazer a conversão desses dois tipos de energia em energia mecânica e, em seguida, em energia elétrica. Esses sistemas ainda estão em desenvolvimento em busca de maior viabilidade econômica e a maioria dos projetos são pilotos, tendo apenas 530 MW de capacidade elétrica instalada em 2015 (REN21, 2016).

A **energia eólica** é obtida através da energia cinética dos ventos, que é convertida para rotação das pás dos aerogeradores, que geram energia elétrica em processo similar às hidrelétricas. Para geração em escala comercial, o vento precisa ter uma velocidade mínima de 7 a 8 m/s (ANEEL, 2005) e soprar com regularidade ao longo do ano. Quanto menor é a interferência dos obstáculos do solo, menor a turbulência do vento e melhor é o aproveitamento energético. Por isso, os aerogeradores têm cada vez torres mais altas, instaladas em

regiões de maior altitude, em terrenos planos com poucos obstáculos ou no mar (*offshore*). No Brasil há 410 usinas com capacidade instalada de 10,26 GWe (ABEEÓLICA, 2016). No mundo há 433 GWe e a China é líder, seguida por EUA, Alemanha e Índia (REN21, 2016).



Pesquise mais

Aproveite para ver alguns vídeos que mostram exemplos das fontes de energia:

Hidrelétrica:

USINA de Itaipu. Disponível em: <<https://goo.gl/3JHFpT>>. Acesso em: 23 dez. 2016.

COMO funciona uma hidrelétrica. Disponível em: <<https://goo.gl/KuGkDs>>. Acesso em: 23 dez. 2016.

Eólica:

COMO funciona a energia eólica. Disponível em: <<https://goo.gl/RAoZ53>>. Acesso em: 23 dez. 2016.

Geotérmica:

O PODER da energia geotérmica. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=MYdFvHa921g>>. Acesso em: 23 dez. 2016.

Solar fotovoltaica:

REPORTAGEM do Fantástico sobre a energia solar fotovoltaica no Brasil. Disponível em: <<https://goo.gl/cVrB0d>>. Acesso em: 23 dez. 2016.

Solar térmica:

ENERGIA heliotérmica no Brasil. Disponível em: <<https://goo.gl/1SWm7Y>>. Acesso em: 23 dez. 2016.

Aspectos socioeconômicos da energia elétrica

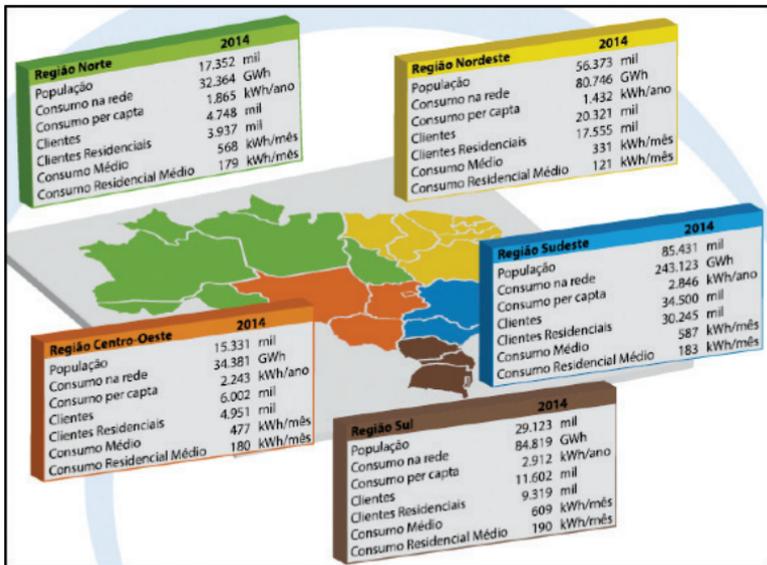
Além de analisar a energia elétrica tecnicamente, é importante perceber que esse recurso é muito importante no desenvolvimento econômico e social do país. Por isso, para garantir o atendimento da demanda de energia da população, o planejamento deve considerar indicadores e projeções demográficas e socioeconômicas relacionadas ao consumo de energia elétrica.



Alguns dos aspectos analisados para o planejamento energético de um país são: crescimento populacional, os fluxos migratórios entre as regiões, projeções de crescimento econômico, escolaridade, inovação e tecnologia, infraestrutura de transportes, taxa de investimento no país, geopolítica, meio ambiente, evolução dos preços dos energéticos.

Analisando alguns indicadores socioeconômicos e de energia elétrica das cinco regiões geográficas do Brasil (Figura 1.5), é possível observar a diferença do consumo de energia per capita da região Sudeste para a região Nordeste, sendo respectivamente 2846 kWh/hab.ano e 1432 kWh/hab.ano. Sabendo da diferença de índices como Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) e Produto Interno Bruto (PIB) dessas duas regiões, podemos concluir que o acesso à energia elétrica pode ser uma consequência do pouco desenvolvimento da região Nordeste, mas também uma causa disso. Assim, é muito importante que o poder público garanta acesso à energia a todas as regiões, como forma de impulsionar o desenvolvimento e melhorar a qualidade de vida da sociedade.

Figura 1.5 | Indicadores socioeconômicos e de energia elétrica do Brasil



Fonte: adaptada de EPE (2015).

O consumo de energia é um dos principais indicadores do desenvolvimento econômico e do nível de qualidade de vida de qualquer sociedade. Ele reflete tanto o ritmo de atividade dos setores industrial, comercial e de serviços, quanto a capacidade da população para adquirir bens e serviços tecnologicamente mais avançados (EPE, 2015).

Nesse sentido, segundo dados da EPE (2015), o crescimento do consumo de energia elétrica per capita do Brasil aumentou em 2,5% ao ano entre 2010 e 2014 e a população cresceu apenas 0,9% ao ano. Isso indica uma melhoria da condição econômica do país e um aumento do uso de eletrodomésticos pelas famílias. Ainda segundo a EPE, parte do crescimento observado no setor residencial ao longo do tempo se deve à inclusão de consumidores de baixa renda no âmbito do Programa Luz para Todos (LpT), que, ao longo de seus 10 anos de existência, acumulou mais de 3 milhões de ligações, representando 5% do total de consumidores residenciais do país e totalizando cerca de 15 milhões de pessoas beneficiadas pelo acesso à energia elétrica. Outro motivo possível e que é independente do crescimento da população é o aumento do consumo por indústrias eletrointensivas, como indústrias de cimento, ferro-gusa e aço, ferro-ligas, não ferrosos e outros da metalúrgica, química, papel e celulose.

O setor elétrico nacional

O modelo do setor elétrico brasileiro atual foi instituído a partir de 2004 e tem os seguintes objetivos: promover a modicidade tarifária (tarifas baixas); garantir a segurança do suprimento de energia elétrica; assegurar a estabilidade do marco regulatório; promover a inserção social por meio do setor elétrico (programas de universalização do atendimento).

Dessa forma, foram criados dois ambientes para comercialização de energia no Brasil: o regulado, que atende aos consumidores cativos, ou seja, obrigados a utilizar a energia da distribuidora da sua região; e o ambiente livre, que permite que consumidores com carga instalada superior ou igual a 3 MW e consumo em tensão superior ou igual a 69 kV façam contratos diretamente com os geradores, tendo garantia de preço, sem as variações do ambiente regulado.



É muito importante entender a diferença entre geração, transmissão e distribuição de eletricidade. Na Figura 1.6 há um diagrama que deixa clara cada uma dessas estruturas.

Figura 1.6 | Agentes do setor elétrico brasileiro



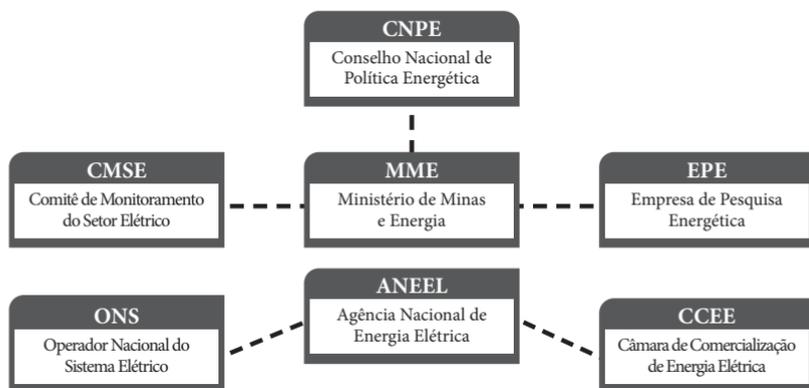
Fonte: adaptada de ABRADEE (2016).

A seguir, destacamos mais algumas características do setor elétrico do país: planejamento e operação centralizados e desverticalização do setor, com segregação das atividades de geração, transmissão e distribuição; coexistência de empresas públicas e privadas e de consumidores cativos e livres; regulação da transmissão e distribuição pelo regime de incentivos, ao invés do “custo do serviço” e regulação da geração para empreendimentos antigos; concorrência na atividade de geração para empreendimentos novos; livres negociações entre geradores, comercializadores e consumidores livres; leilões regulados para contratação de energia para as distribuidoras, que fornecem energia aos consumidores cativos; preço da energia elétrica (commodity) separado dos preços do seu transporte (uso das linhas de transmissão e distribuição); preços distintos para cada área de concessão, em substituição à equalização tarifária de outrora; e mecanismos de regulação contratuais para compartilhamento de ganhos de produtividade nos setores de transmissão e distribuição (ABRADEE, 2016).

Para entender melhor quais são os agentes que fazem parte da estrutura do setor elétrico brasileiro, observe a Figura 1.7. Destaca-se que o CNPE, o MME e o CMSE realizam atividades de

governo, a ANEEL regula e fiscaliza, a EPE planeja, a ONS opera e a CCEE contabiliza.

Figura 1.7 | Agentes do setor elétrico brasileiro



Fonte: adaptada de CCEE (2016).

O Brasil possui uma capacidade instalada para geração de energia elétrica de 140.858 MW e mais 16,5 MW em geração distribuída (EPE, 2016). Veja os detalhes na Tabela 1.2.

Tabela 1.2 | Capacidade instalada de energia elétrica no Brasil

| Fonte | Capacidade instalada (MW) | Capacidade instalada (MW) – Geração distribuída |
|----------------------|---------------------------|---|
| Hidrelétrica | 91.650 | 0,8 |
| Térmica ² | 39.564 | 2,3 |
| Nuclear | 1.990 | - |
| Eólica | 7.633 | 0,1 |
| Solar | 21 | 13,3 |
| Total | 140.858 | 16,5 |

Fonte: adaptada de EPE (2016).

As fontes utilizadas se complementam, para garantir o suprimento de toda a demanda. No entanto, algumas fontes geram a energia da linha de base, ou seja, tem reservas para gerar a qualquer momento que forem demandadas pelo operador nacional do sistema, assegurando, assim, a estabilidade do sistema. Essas fontes são a hidrelétrica, a térmica e a nuclear. As fontes solar e eólica são fontes complementares ao sistema, pois são intermitentes.

Sem medo de errar

Retomando a situação-problema proposta no item Diálogo aberto desta seção, apresentaremos o texto com as diretrizes para o planejamento do setor elétrico do PNE 2050 que você deve enviar para sua equipe.

O setor elétrico brasileiro depende muito de fontes fósseis, como o gás natural e o carvão mineral para a geração, pois eles complementam a energia hidrelétrica na linha de base da oferta. Quando há estiagem, que afeta a reserva de água das usinas do país, é necessário acionar as termelétricas. Por isso, o planejamento do setor elétrico brasileiro precisa prever a demanda de gás natural e carvão mineral para garantir que as termelétricas possam operar quando acionadas.

! Atenção

A energia de base precisa de fontes que tenham disponibilidade de geração no exato momento em que forem demandadas. Além disso, considere que é possível e necessário utilizar diversas fontes.

Para o planejamento energético, o primeiro passo é analisar quais fontes de energias não renováveis e renováveis estão disponíveis. Nesse sentido, o Brasil tem disponível quase todas as fontes de energia descritas nesta seção, com exceção da geotérmica. O que interfere muito na escolha das fontes é a localização, a viabilidade técnica e econômica de exploração e das tecnologias para geração, as questões de licenciamento ambiental, a aceitação da sociedade, os custos envolvidos etc. Assim, fontes que atualmente são viáveis e muito utilizadas no Brasil são a eólica, a hidrelétrica, a termelétrica a gás natural ou a carvão mineral, a nuclear e a biomassa (bagaço de cana-de-açúcar). A energia solar é uma opção que vem se viabilizando e, no médio e longo prazo, provavelmente, terá parte mais significativa da matriz energética. O biogás ainda está em desenvolvimento, mas já vem sendo considerado no planejamento de longo prazo do setor elétrico e tem uma disponibilidade grande. A fonte maremotriz, como explicado no texto, ainda está em estágio inicial de desenvolvimento no mundo todo, dificultando que

se considere um planejamento do setor, ou seja, é imprescindível que se analise a disponibilidade das fontes de energia e a viabilidade técnica e econômica de seu uso no curto, médio e longo prazo. De nada adiantaria elaborar um planejamento que não poderá ser executado, por não ter coerência com a realidade do país. Por isso, os estudos básicos e as projeções de oferta e demanda devem ser realizados por profissionais capacitados e levar em conta dados atualizados e métodos de projeção adequados.

Agora, aproveite para aplicar os conhecimentos que desenvolveu nesta seção em uma nova situação e aprenda um pouco mais.

Avançando na prática

Fontes de energia em substituição à energia hidrelétrica

Descrição da situação-problema

Imagine que você ainda é o superintendente de recursos energéticos da empresa pública de planejamento do Brasil e é responsável por coordenar uma equipe multidisciplinar na elaboração do planejamento do setor elétrico no Plano Nacional de Energia 2050. Para a continuidade do trabalho, sua equipe pediu novas diretrizes e você precisa fazer essas definições. Sendo assim, elabore um texto respondendo a seguinte pergunta, considerando a importância da energia hidrelétrica e que há o risco de haver períodos de estiagem e redução das reservas de água das usinas.

- Quais fontes de energia você consideraria no planejamento para garantir a oferta em épocas de estiagem? Justifique suas escolhas.

Caro superintendente de recursos energéticos, você está preparado para cumprir mais esse trabalho?

Espero que você esteja animado. Bons estudos e um ótimo trabalho!

Resolução da situação-problema

Uma das opções seria a utilização de combustíveis fósseis, o que ocorre atualmente no Brasil, apesar dos impactos ambientais. Tentando reduzir esses impactos, poderia ser aumentada a disponibilidade de

gás natural por meio de importações de gás natural liquefeito (GNL) em navios ou com aumento da exploração dos campos brasileiros. No entanto, isso poderia aumentar os custos da energia elétrica em comparação com a fonte hidráulica.

Outra opção seria o uso de biogás, já que pode ser armazenado. No entanto, da mesma forma que a opção anterior, isso poderia aumentar custos, pois, para haver garantia de produção de biogás e armazenagem, seriam necessárias tecnologias avançadas e confiáveis.

Uma terceira opção seria o armazenamento de energia elétrica de fonte eólica ou solar em baterias. No entanto, isso demanda avanços tecnológicos significativos para redução de custos.

Há diversas outras alternativas tecnológicas em pesquisa e desenvolvimento, mas que provavelmente ainda não seriam viáveis por seus custos. Uma delas seria combinar algumas alternativas que atendessem à demanda, sem grande aumento de custos.

De qualquer forma, é importante ter em mente que a disponibilidade de energia hidrelétrica do Brasil faz com que o preço da energia seja muito baixo, o que dificilmente é mantido com qualquer outra fonte de energia para linha de base. Por isso, em 2015, após um período de estiagem, a tarifa da energia subiu bastante para todos os consumidores cativos.



Faça você mesmo

Caro aluno, sugerimos que você aplique os conhecimentos desenvolvidos nesta seção por meio da seguinte atividade: Como foi substituída a energia elétrica proveniente das hidrelétricas no período de estiagem no Sudeste do Brasil entre 2014 e 2015? Quais foram as fontes de energia utilizadas?

Faça valer a pena

1. No mundo existem diversas fontes de energias renováveis e, com o desenvolvimento tecnológico das últimas décadas, diversas delas se viabilizaram economicamente e foram melhoradas, visando aumentar a eficiência e gerar menos impactos ambientais e sociais. Isso abriu espaço para muitos avanços e mudanças nas formas tradicionais de geração de

energia, havendo hoje diversos arranjos possíveis para uma mesma fonte de energia ser aproveitada.

Considerando isso, marque a alternativa que classifica corretamente os itens a seguir, entre verdadeiro (V) e falso (F):

I. A energia eólica não pode ser gerada no mar.

II. A energia hidrelétrica pode ser gerada em usinas sem barramento de água.

III. A energia solar heliotérmica tem o objetivo de apenas gerar energia térmica.

IV. O biometano, gás proveniente do biogás, pode ser utilizado como substituto do gás natural.

a) V, V, F, V.

b) F, V, V, V.

c) F, F, V, F.

d) F, V, F, V.

e) V, F, V, F.

2. As usinas em construção na Região Amazônica são vistas como forma de garantir o aumento da oferta de energia elétrica do Brasil. No entanto, o processo de licenciamento ambiental de novas usinas nessa região nos últimos anos tem sido muito difícil e demorado, chegando a colocar em xeque novos investimentos.

Em se tratando de fonte hidráulica para geração de energia elétrica, assinale a alternativa incorreta:

a) A fonte hidráulica é uma fonte que pode ser armazenada.

b) A fonte hidráulica ainda foi pouco explorada na Região Norte do país.

c) A fonte hidráulica é utilizada como principal fonte para geração de energia elétrica no Brasil.

d) A fonte hidráulica pode gerar energia elétrica em hidrelétricas sem barragem, chamadas de hidrelétricas a fio de água.

e) A fonte hidráulica é um recurso pouco disponível no Brasil.

3. “A partir da década de 1990, buscando eficiência e autonomia econômica, o setor elétrico mundial começa a passar por reformas estruturais em sua forma de operação, sofrendo influência da doutrina do estado mínimo no pensamento econômico. Como resultado destas reformas, que também ocorreram no Brasil, os segmentos de geração, transporte e comercialização de energia passam a ser separados, sendo administrados e operados por agentes distintos” (ABRADEE, 2016, s.p.).

Sobre o setor elétrico brasileiro, assinale a alternativa que classifica corretamente as alternativas entre verdadeiras e falsas:

I. Atualmente o setor elétrico tem apenas empresas públicas.

II. A Agência Nacional de Energia Elétrica é responsável pela regulação e fiscalização.

III. O primeiro requisito para compra de energia no ambiente livre de comercialização é ter carga instalada superior ou igual a 3 MW e consumo em tensão superior ou igual a 69 kV.

a) V, V, F.

b) F, V, F.

c) F, V, V.

d) V, F, F.

e) F, F, F.

Seção 1.3

Sistemas de energia monofásicos e polifásicos

Diálogo aberto

Caro aluno, nesta seção estudaremos os sistemas monofásicos e polifásicos de energia elétrica e como é feito o transporte de energia elétrica, que é composto pelo sistema de transmissão e de distribuição. Entender os conceitos relacionados aos sistemas de transporte de energia elétrica é muito importante quando estamos estudando a eficiência e a qualidade da energia.

Por isso, considere que você é o superintendente de recursos energéticos da empresa pública de planejamento de um país e, com o apoio de uma equipe multidisciplinar, deve definir os requisitos do projeto básico de uma rede de transmissão de energia elétrica com tensão de 500 kV e extensão de 2500 km, que transporta energia de uma grande usina hidrelétrica no Norte do Brasil até o estado de São Paulo. Na primeira fase dessa atividade, você precisa dar orientações para sua equipe sobre algumas escolhas e definições que balizarão toda a execução. Para isso, elaborará um resumo executivo dos requisitos, respondendo às perguntas a seguir e justificando cada decisão sua.

- A linha de transmissão será em corrente contínua ou alternada? Quais seriam as vantagens e desvantagens da sua escolha?
- A qual subgrupo essa rede de transmissão pertenceria, segundo a classificação da Agência Nacional de Energia? E segundo a extensão, como seria classificada?
- Haverá uma subestação na saída da usina hidrelétrica? Qual será o objetivo dessa subestação?
- Os condutores de energia elétrica serão de qual material?
- Quais seriam as larguras de faixa de servidão da linha de transmissão?

Para resolver esse problema, estudaremos adiante como funcionam os sistemas de transporte de energia elétrica e quais são os requisitos dos seus componentes. Entender a diferença entre um sistema de transmissão e um de distribuição também será muito importante.

Caro superintendente de recursos energéticos, você está preparado para resolver essa nova tarefa?

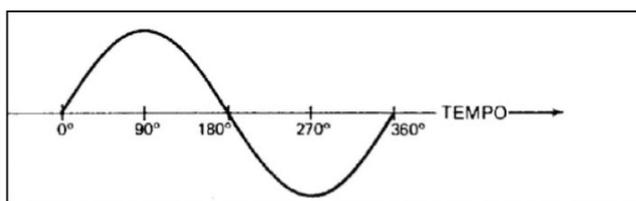
Espero que você esteja animado. Bons estudos e um ótimo trabalho!

Não pode faltar

Sistemas monofásicos de energia elétrica

Um sistema monofásico de energia elétrica é formado por uma fase e um neutro e pode ser de corrente contínua ou alternada, ocorrendo normalmente em redes elétricas de curta distância, como de residências e de áreas rurais. Esses sistemas são utilizados principalmente em iluminação, aquecimento e pequenos motores elétricos. O comportamento da tensão da corrente monofásica alternada pode ser visto na Figura 1.8, que representa que a tensão oscila ao longo do tempo, alternando entre positiva e negativa.

Figura 1.8 | Comportamento da tensão na corrente monofásica



Fonte: adaptada de PHDONLINE (2016).

No caso de uso de uma fonte monofásica em um motor de corrente alternada, é necessário ter um circuito adicional para o arranque, pois a corrente monofásica não produzirá um campo magnético giratório. Por isso, acabam sendo pouco utilizadas para demandas de potência acima de 10 kW.

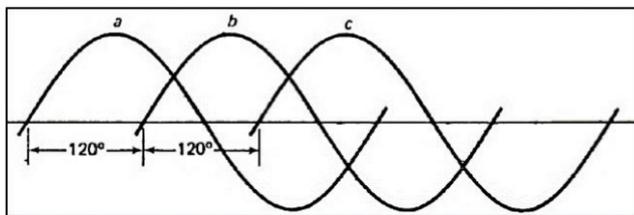
Sistemas polifásicos de energia elétrica

São formados por duas ou mais ondas sinusoidais iguais com

diferença de fase constante. Apesar da possibilidade de utilização de vários sistemas polifásicos (bifásicos, trifásicos, tetrafásicos e assim por diante), o sistema trifásico é o que tem maior importância, devido às vantagens que levaram a sua vasta aplicação (GUEDES, 1993).

Os sistemas polifásicos de energia mais utilizados são: os **sistemas bifásicos**, compostos por duas ondas senoidais defasadas em 180° , e os **sistemas trifásicos**, compostos por três ondas senoidais defasadas em 120° (Figura 1.9).

Figura 1.9 | Tensão na corrente trifásica



Fonte: adaptada de PHDONLINE (2016).

Os sistemas bifásicos são comumente encontrados em áreas rurais e são compostos por três fios, sendo dois fases e um neutro. A vantagem perante aos sistemas monofásicos é que permitem o acionamento de motores – máquinas elétricas que exigem bastante potência para o torque de partida – sem a necessidade de um mecanismo para arranque, pois como têm duas fases defasadas, um campo girante é formado para acionar o motor. No entanto, como os custos para instalação acabam sendo muito próximos aos de um sistema trifásico, normalmente opta-se por esse sistema.

Os sistemas trifásicos são os mais comuns na geração, transmissão e também na utilização em alta potência, por serem mais eficientes e econômicos. Segundo Bird (2009), suas vantagens são:

- O sistema trifásico usa menor quantidade de cobre ou alumínio para entregar a mesma potência que um sistema monofásico equivalente.
- Os geradores trifásicos são fisicamente menores e mais leves que seus equivalentes monofásicos, por usarem com maior eficiência seus enrolamentos.

- Um motor trifásico é menor que seu correspondente monofásico de mesma potência e, da mesma forma que em motores bifásicos, partem sem a necessidade de dispositivos especiais para arranque, devido ao campo girante produzido pelas três fases. Além disso, é menor que seu correspondente monofásico de mesma potência.

- Motores trifásicos produzem um torque constante, o que não é possível nos motores monofásicos. Por causa disso, os motores trifásicos são menos sujeitos a vibrações.

- A potência total em um sistema trifásico nunca é nula, já nos monofásicos, a potência anula-se sempre que a tensão ou a corrente passa pelo zero (apenas continuam girando graças à inércia).

- A potência instantânea total em um sistema trifásico equilibrado (quando suas correntes são iguais e estão defasadas simetricamente) é constante com o tempo.

- A energia trifásica é a forma mais eficiente de distribuir energia para longas distâncias e permite que grandes equipamentos industriais operem com mais eficiência.

Considerando isso, uma das principais razões que levam à escolha pelo sistema trifásico é que permite transmissão de potência de forma mais econômica, por demandar menos material e gerar perdas menores que em um sistema monofásico ou bifásico. Além disso, a potência gerada é constante, o que torna mais eficiente seu uso especialmente para motores que demandam grandes potências ou em grandes centros consumidores de energia elétrica.

Após gerar, transmitir e distribuir energia, os consumidores finais, não interessando se estes são de baixa (residencial/comercial), média ou alta (industrial) tensão, são definidos como cargas conectadas aos sistemas elétricos de potência. O termo carga, ou carregamento, é amplamente difundido no setor elétrico e é definido como a demanda de potência (em kW, kVAr e/ou kVA) de um ou mais consumidores em um determinado instante de tempo. Exemplificando, vamos supor que a carga da sua residência às 18 horas do dia de hoje seja de 10 kVA. Atribui-se a esses 10 kVA demandados o somatório das demandas de todos os equipamentos

ligados à energia naquele momento, como TVs, micro-ondas, chuveiros elétricos, ar-condicionado etc.



Assimile

O sistema mais utilizado para transporte de energia elétrica é o trifásico, devido a sua eficiência e menor custo. No entanto, sistemas monofásicos e bifásicos ainda são utilizados para transporte em pequenas distâncias ou para aplicações específicas quando os custos são mais atraentes, ou seja, é importante que você, aluno, compreenda o funcionamento dos três tipos de sistemas.

Transporte de energia elétrica

A energia elétrica gerada nas usinas normalmente percorre longas distâncias, para ser entregue aos consumidores. O transporte é feito por linhas de transmissão e de distribuição. Os sistemas de transmissão incluem todos os elementos após as usinas de geração de energia elétrica até o ponto de conexão com as subestações de redução de tensão e, a partir daí, o sistema de transporte é denominado de distribuição.

Linhas de transmissão de energia elétrica (LT)

Uma linha de transmissão é formada, basicamente, por condutores, torres, cabos para-raios e isoladores, sendo que o circuito de uma linha pode ser simples, duplo ou múltiplo (PINTO, 2014).

Como as distâncias entre as usinas e os consumidores do Brasil são grandes e a carga do sistema interligado é elevada, a transmissão da energia elétrica demanda cabos de grande bitola (diâmetro) e, conseqüentemente, torres metálicas que suportem o peso desses cabos. Assim, quanto maiores as cargas, maiores seriam os investimentos necessários na infraestrutura de transmissão. Para reduzir esses investimentos, são instaladas subestações de elevação da tensão na saída das usinas, que reduzem a corrente elétrica e permitem o uso de cabos de menor bitola.



Exemplificando

A potência elétrica (S) é igual à intensidade de tensão (V) multiplicada pelo valor da corrente elétrica (I), ou seja, que $S = V \times I$. Veja um exemplo dessa relação:

Considere uma usina hidrelétrica que tenha potência de 30 MVA e tensão de saída de 5 kV e depois da subestação a tensão é elevada para 10 kV. Assim, qual será o valor da corrente elétrica antes e depois da subestação?

Se $S = V \times I$ então $I = S \div V$, ou seja, $I = 30 \times 10^6 \div 5 \times 10^3 = 6KA$ e $I = 30 \times 10^6 \div 10 \times 10^3 = 3KA$ Ou seja, se mantivermos a potência elétrica constante e aumentarmos a tensão, por meio de uma subestação de elevação, a corrente reduzirá proporcionalmente, demandando cabos com menor bitola para transmitir a mesma potência elétrica.

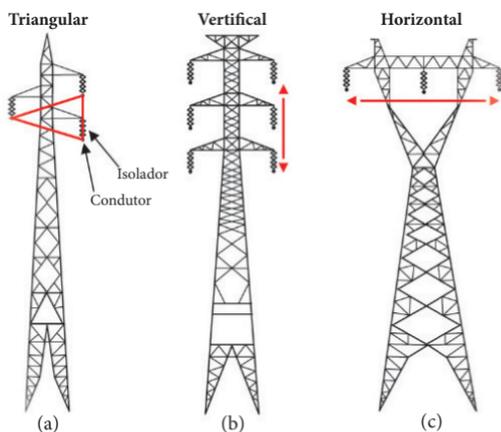
Alguns dos níveis de tensão normalmente utilizados nas linhas de transmissão são: 230 kV, 345 kV, 440 kV, 500 kV, 600 kV e 750 kV (BARROS; BORELLI; GEDRA, 2014). Para o Brasil, padronizou-se os seguintes níveis das tensões: transmissão: 750, 500, 230, 138 e 69 kV; e subtransmissão: 138, 69 e 34,5 kV. Sistemas de subtransmissão são usados para transmitir potência a grandes consumidores e, no Brasil, de modo geral, são as linhas de 69 kV (PINTO, 2014).

Na Resolução da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) nº 414/2010, são definidos seis subgrupos para transmissão: subgrupo A1 – tensão de fornecimento igual ou superior a 230 kV; subgrupo A2 – tensão de fornecimento de 88 kV a 138 kV; subgrupo A3 – tensão de fornecimento de 69 kV; subgrupo A3a – tensão de fornecimento de 30 kV a 44 kV; subgrupo A4 – tensão de fornecimento de 2,3 kV a 25 kV; subgrupo AS – tensão de fornecimento inferior a 2,3 kV, atendida a partir de um sistema subterrâneo de distribuição e faturada nesse grupo em caráter opcional.

Outra classificação possível é pela extensão da rede de transmissão, como: longas, com mais de 294 km; médias, entre 80 km e 249 km; e curtas, abaixo de 80 km (PINTO, 2014).

Conforme o nível de tensão a ser transmitido, a configuração dos componentes das torres é alterada, havendo diversos padrões utilizados. A configuração pode alterar conforme a posição dos condutores e isoladores entre triangular, vertical ou horizontal (Figura 1.10).

Figura 1.10 | Quantidade de circuitos e disposição dos condutores em uma torre de transmissão elétrica



Fonte: adaptada de Pinto (2014).

Os condutores (cabos) podem ser de cobre ou de alumínio, sendo que o alumínio é mais utilizado por seu menor preço. As características ideais dos condutores são listadas na Tabela 1.3.

Tabela 1.3 | Características / ideias dos condutores elétricos

| | |
|-------------------------------|---|
| Alta condutibilidade elétrica | As perdas por efeito térmico (joule) devem ser mantidas economicamente dentro de uma faixa tolerável. |
| Baixo custo | O custo dos cabos é parte considerável do investimento, devendo ser, obviamente, levado em conta. |
| Boa resistência mecânica | A integridade da linha deve ser observada, para que não ocorra descontinuidade do serviço, garantindo, ainda, a segurança das terras e das vidas nos arredores. |

| | |
|-----------------------------|---|
| Alta resistência à oxidação | A integridade do material deve ser observada, para que não ocorra desgaste ou redução na resistência, provocando, com isso, uma eventual ruptura do cabo. |
| Baixo peso específico | Quanto maior for o peso da estrutura, maior será o custo. Tais estruturas são projetadas para absorver os esforços mecânicos transmitidos pelos cabos. |

Fonte: adaptada de Pinto (2014).

No Brasil, os cabos ACSR ou CAA (alumínio com alma de aço) são os mais usados nas linhas de transmissão. Têm o núcleo de aço galvanizado e a camada externa em alumínio, e a resistência varia conforme a combinação desses materiais (PINTO, 2014).



Refleta

Considerando que as torres de transmissão podem ser muito altas e os cabos ficarem a mais de 30 metros de altura, como se faz para inspecionar os cabos e saber se precisam de reparos? E como é feita a manutenção dos cabos? A linha precisa estar sem energia elétrica para a manutenção? Qual é a importância da manutenção do sistema?

Os isoladores fornecem o necessário isolamento entre os condutores da linha de transmissão e as torres, evitando qualquer corrente de fuga para o solo. Além disso, eles também têm a função de sustentar mecanicamente os cabos. Segundo Pinto (2014), os isoladores precisam ter as seguintes características: alta rigidez mecânica, a fim de resistir à carga do condutor e ao vento; alta resistência elétrica, a fim de evitar correntes de fuga para o solo; alta permissividade relativa, para que a rigidez dielétrica também seja alta; e não podem ter porosidade e rachaduras.

Uma característica importante dos sistemas de transmissão de energia elétrica é o tipo de corrente utilizada, podendo ser alternada ou contínua. No início do uso comercial da energia elétrica, utilizava-se a corrente contínua, mas, devido às perdas de energia existentes, desenvolveu-se a corrente alternada que, atualmente, é a mais utilizada para transmissão. No entanto, o uso de corrente

contínua se mostra vantajoso em alguns casos de transmissão em longas distâncias. No Brasil, parte da energia produzida na Usina Hidrelétrica de Itaipu é transmitida em corrente contínua, da mesma forma que uma linha de transmissão do Complexo Hidrelétrico do Rio Madeira e da Usina Hidrelétrica de Belo Monte. Na Tabela 1.4 são listadas características desses dois tipos de corrente.

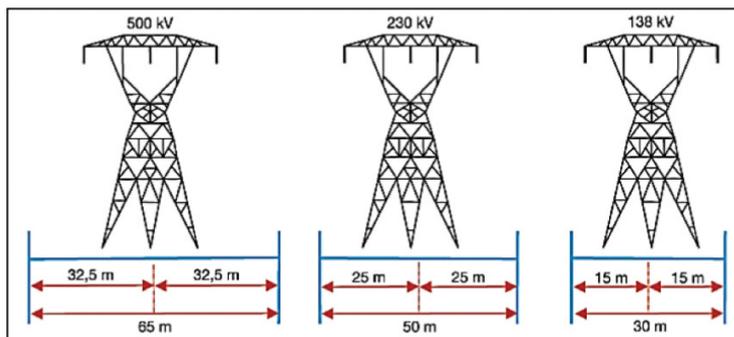
Tabela 1.4 | Vantagens e desvantagens da corrente contínua (CC) e alternada (CA) de energia elétrica

| | Vantagens | Desvantagens |
|-----------|--|--|
| CC | Não há indutância ou capacitância. Não há efeito pelicular (efeito de repulsão entre linhas de corrente eletromagnética), portanto, toda a área da seção circular do condutor é usada. | Os custos são muito elevados nos componentes de eletrônica de potência para elevar as tensões a níveis muito altos. |
| CA | A manutenção das subestações é mais fácil e mais barata. A tensão pode ser elevada ou reduzida por transformadores com alguma facilidade e eficiência, o que permite transportar energia em altas tensões e distribuí-la em níveis seguros. | Necessita uma quantidade maior de material do que a opção em CC. A construção da linha de transmissão é mais complexa do que a da linha em CC, por demandar que suporte maior peso dos condutores. O efeito pelicular torna a resistência efetiva da linha maior (tendência de a corrente fluir na superfície do condutor). A linha tem capacitância, havendo, portanto, perdas produzidas pelos efeitos capacitivos das linhas de transmissão. |

Fonte: adaptada de Pinto (2014).

Outro ponto importante sobre as linhas de transmissão é a existência de uma faixa de servidão ou segurança no seu entorno para garantir a segurança da operação e evitar perturbações em instalações próximas. As faixas de servidão e as distâncias mínimas entre a rede e os diversos tipos de instalações são definidas em normas técnicas e são calculadas conforme a tensão de operação, conforme mostra a Figura 1.11.

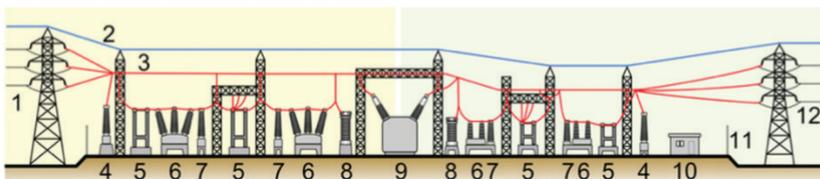
Figura 1.11 | Dimensões da faixa de servidão para torres de transmissão de energia elétrica no Brasil



Fonte: adaptada de Pinto (2014).

Além das linhas, um sistema de transmissão é composto também pelas subestações de transmissão que conectam a transmissão com os geradores, consumidores e empresas distribuidoras, como ilustra a Figura 1.12. Após a geração de energia elétrica nas usinas, uma subestação eleva a tensão para a transmissão e, na conexão com consumidores ou distribuidoras, a função é reduzir a tensão para níveis demandados para a rede de distribuição ou para o consumidor. A subestação de transmissão é composta pelos seguintes itens apresentados na Figura 1.12: (1) Rede primária; (2) Cabo de aterramento; (3) Linhas/Barramentos; (4) Para-raios; (5) Disjuntores; (6) Chaves seccionadoras; (7) Transformador de corrente (TC); (8) Transformador de potencial (TP); (9) Transformador de potência; (10) Sala de controle; (11) Grade de segurança; (12) Rede secundária.

Figura 1.12 | Representação de uma subestação de transmissão



Fonte: adaptada de ABRADDEE (2016).

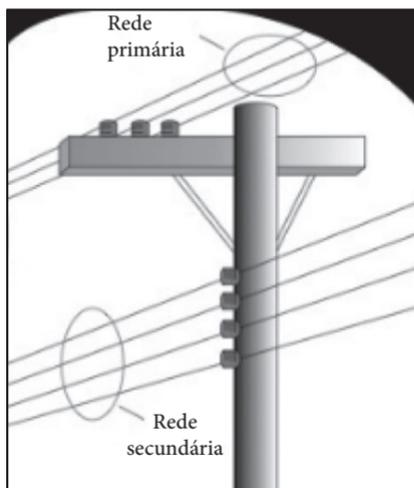
Distribuição de energia elétrica

Após ser transportada por longas distâncias pelas linhas de transmissão, a energia elétrica chega a uma estação de transformação de distribuição que reduz o nível de tensão. A rede de distribuição é

a rede que leva a energia dessas subestações para os consumidores finais e é composta por fios condutores, transformadores e equipamentos diversos de medição, controle e proteção das redes elétricas. É caracterizada por grande extensão e muitas ramificações, pois seu intuito é chegar a todos os estabelecimentos comerciais e domicílios. A subestação de distribuição é composta pelos mesmos equipamentos de uma estação de transmissão, exceto que no final a rede secundária é substituída pela rede de distribuição.

O sistema de distribuição é composto pela rede elétrica e pelo conjunto de instalações e equipamentos elétricos que operam em níveis de alta tensão (superior a 69 kV e inferior a 230 kV), média tensão (superior a 1 kV e inferior a 69 kV) e baixa tensão (igual ou inferior a 1 kV). No setor elétrico é comum definir a média tensão como rede primária de distribuição, e a baixa tensão, como rede secundária de distribuição. A Figura 1.13 ilustra as redes primária e secundária em um poste de energia.

Figura 1.13 | Representação da rede primária e secundária de distribuição de energia elétrica



Fonte: adaptada de Barros; Borelli e Gedra (2014).

Existem quatro tipos de redes de distribuição de energia elétrica, sendo: **Aérea Convencional**, que tem condutores sem isolamento, o que a torna mais susceptível a curto-circuito, devido ao contato com galhos de árvores; **Aérea Compacta**, que tem condutores com isolamento e são mais compactas, o que reduz a susceptibilidade

a curto-circuito; **Aérea Isolada**: tem condutores com isolamento mais eficiente, mas, por ser mais cara, é utilizada em casos bem específicos; **Subterrânea**: é a rede mais protegida e tem vantagens estéticas, mas, por ter custo elevado, é utilizada apenas em regiões populosas ou onde não é possível instalar uma rede aérea.

Apesar de o nível de tensão da rede de distribuição ser menor que da rede de transmissão, aquele ainda não é adequado para atender aos consumidores finais. Por isso, nos postes ao longo da rede, são instalados transformadores que reduzem a tensão elétrica de média para baixa, sendo que, em grande parte do país, essa redução é de 13,8 kV para 220 V ou 127 V (ABRADEE, 2016).



Pesquise mais

No Brasil, há regiões com diferentes padrões de tensão na rede de distribuição de energia elétrica e isso tem motivos históricos. Busque mais informações e entenda como o início da geração e uso de energia elétrica no Brasil interferem nos padrões até a atualidade. Sugerimos a seguinte leitura:

CUNHA, Livia. Padrões brasileiros. In: **Portal O setor elétrico**. Disponível em: <<https://www.osetoelettrico.com.br/padroes-brasileiros/>>. Acesso em: 15 nov. 2016.

Sem medo de errar

Retomando a situação-problema proposta no item Diálogo aberto desta seção, apresentaremos os requisitos a serem definidos por você, superintendente de recursos energéticos, para o projeto de uma rede de transmissão de energia elétrica com tensão de 500 kV e extensão de 2500 km, que transportará energia de uma grande usina hidrelétrica no Norte do Brasil até o estado de São Paulo.



Atenção

Aluno, é importante que você analise atentamente a tensão e a extensão planejada para a rede, pois esses são dois pontos que definem muitas das características de projeto de uma rede de transmissão.

A linha de transmissão será em corrente alternada, pois a potência pode ser gerada em altas tensões, a manutenção das subestações é mais fácil e mais barata; a tensão pode ser elevada ou abaixada por transformadores com facilidade e eficiência, o que permite transportar energia em altas tensões e distribuí-la em níveis seguros. No entanto, essa escolha tem algumas desvantagens com relação à corrente contínua, como necessitar de maior quantidade de material para os cabos condutores, maiores dificuldades na construção, maior resistência na linha causada pelo efeito pelicular e perda de potência pela linha ter capacitância.

Essa rede será enquadrada no subgrupo A1 – tensão de fornecimento igual ou superior a 230 kV, segundo a Resolução nº 456/2000 da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel). Além disso, é considerada uma rede longa, por ter mais de 294 km.

Na saída da usina hidrelétrica será construída uma subestação de elevação da tensão para 500 kV, para que a corrente elétrica seja reduzida proporcionalmente a essa elevação e, assim, sejam demandados condutores menores. Apesar do investimento necessário para a subestação, essa elevação de tensão vale a pena pela redução de custos ao longo de toda a extensão da rede.

Além disso, os cabos condutores de energia elétrica serão de alumínio, do tipo ACSR ou CAA (alumínio com alma de aço). Apesar de serem menos eficientes em relação à condução de energia elétrica dos que os cabos de cobre, essa escolha é feita pois cabos de alumínio têm custos mais baixos, sendo, portanto, os mais usados nas linhas de transmissão. Esse tipo de cabo tem o núcleo de aço galvanizado e a camada externa em alumínio.

A faixa de servidão no entorno da linha será de 32,5 m a partir da linha central para os dois lados, totalizando 65 m de faixa. Isso garantirá a segurança e que não haja perturbações na rede. É importante providenciar a desapropriação/compra dos terrenos dentro dessa faixa, pois praticamente nenhuma atividade produtiva pode ser praticada nessa faixa de moradia e outras instalações devem respeitar distâncias mínimas definidas na legislação específica.

Planejamento de uma rede de transmissão

Descrição da situação-problema

Imagine agora que você é o engenheiro da empresa que contratará a elaboração do projeto básico de uma rede de transmissão de energia elétrica com tensão de 230 kV e extensão de 200 km que transporta a energia gerada por uma usina hidrelétrica. Para essa contratação ocorrer, é necessário que você elabore um termo de referência do serviço em que são detalhados todos os aspectos que o projeto da rede deverá considerar.

Assim, para iniciar os trabalhos, elabore uma lista dos itens que a empresa deverá definir no projeto da linha de transmissão e descreva cada um desses itens, deixando clara sua importância. Aproveite para aplicar os conceitos de linha de transmissão e subestação apresentados na seção.

Resolução da situação-problema

A especificação técnica desse projeto deverá considerar os seguintes pontos:

- Classificação da rede: definir em qual subgrupo da Resolução ANEEL nº 414/2010 a rede se enquadra e, a partir disso, listar as regras para sua instalação e operação.
- Tipo de corrente: deverá ser definido o tipo de corrente mais viável a ser utilizado, considerando questões técnicas e econômicas. Os dois tipos de corrente possíveis são: contínua e alternada, e, como cada uma tem suas vantagens e desvantagens, essa análise é um ponto-chave no projeto.
- Subestação de saída da usina: realizar os cálculos e o dimensionamento da subestação para que eleve a tensão da energia elétrica gerada ao nível necessário (230 kV).
- Faixa de servidão: deverão ser feitos os cálculos para definir as medidas da faixa de segurança e, com isso, fazer o levantamento de imóveis que devem ser desapropriados.

- Tipo de condutores: deverá ser definido o tipo e o material dos cabos condutores a serem utilizados, fazendo-se uma análise dos custos e vantagens, ou seja, uma análise da viabilidade técnica e econômica.

- Tipo de isolador: também deverá ser definido o tipo e o material dos isoladores a serem utilizados, fazendo-se uma análise dos custos e vantagens, ou seja, uma análise da viabilidade técnica e econômica. Os isoladores devem ter: alta rigidez mecânica, a fim de resistir à carga do condutor e ao vento; alta resistência elétrica, a fim de evitar correntes de fuga para o solo; alta permissividade relativa, para que a rigidez dielétrica também seja alta; e não podem ter porosidade e rachaduras.

- Modelo das torres: o projeto deverá definir quais serão os modelos de torres a serem utilizadas na rede de transmissão, considerando a corrente, a tensão e outras definições que tenham sido feitas.



Faça você mesmo

Caro aluno, sugerimos que você aplique os conhecimentos desenvolvidos nesta seção por meio da seguinte atividade: faça o cadastro e acesse o Sistema de Informações Geográficas Cadastrais do SIN (SINDAT) do Operador Nacional do Sistema do Brasil (ONS). Nesse sistema, você poderia ver toda a rede de transmissão de energia elétrica do país de forma interativa e dinâmica. Acesse o manual do sistema no seguinte link: ONS. SINDAT. Disponível em: **<<http://www.ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/Sindat-ManualdoUsuario.pdf>>**. Acesso em: 4 dez. 2016. Aproveite essa oportunidade para conhecer mais o sistema de transmissão de energia elétrica!

Faça valer a pena

1. Na atualidade, os sistemas trifásicos de energia elétrica são os mais utilizados, mas, nos primórdios da utilização da eletricidade, o sistema mais utilizado era o monofásico.

Assinale a alternativa que possui a definição de sistema trifásico de energia elétrica:

- a) Sistema composto por 13 ondas senoidais defasadas em 120° entre si.
- b) Sistema composto por corrente contínua.
- c) Sistema composto por duas ondas senoidais defasadas em 90° entre si.
- d) Sistema composto por três ondas senoidais defasadas em 120° entre si.
- e) Sistema composto por três ondas senoidais defasadas em 90° entre si.

2. Um sistema monofásico de energia elétrica é formado por uma fase e um neutro, que pode ser contínua ou alternada. O sistema monofásico é comum em redes elétricas de curta distância, como de residências e de áreas rurais.

As afirmativas a seguir discorrem sobre os sistemas monofásicos de energia elétrica:

I. Um motor monofásico é menor que seu correspondente trifásico de mesma potência.

II. Para acionamento de um motor de corrente alternada, com uma fonte monofásica, é necessário ter um circuito adicional para o arranque.

III. O sistema monofásico é muito utilizado para iluminação, aquecimento e grandes motores elétricos.

Analisando essas afirmativas, escolha a alternativa correta:

- a) V; V; F.
- b) V; F; F.
- c) F; V; V.
- d) F; F; F.
- e) F; V; F.

3. Na China estão as mais altas torres de transmissão de eletricidade, com 370 m de altura, distantes cerca de 2,3 km uma da outra. Trata-se da linha de 230 kV de Zhoushan, inaugurada em 2009, em que cada torre de aço pesa 4300 toneladas (PINTO, 2014).

As afirmativas a seguir abordam os sistemas de transmissão de energia elétrica:

I – Para reduzir a bitola dos condutores de energia elétrica nas linhas de transmissão na saída das usinas, eleva-se a corrente elétrica para que a tensão diminua.

II – O tipo de corrente mais utilizado para transmissão de energia elétrica é a contínua.

III – Cabos de alumínio são muito utilizados como condutores por terem custo menor que cabos de cobre.

Analisando essas afirmativas, escolha a alternativa correta:

- a) F; F; V.
- b) F; V; V.
- c) V; F; V.
- d) F; F; F.
- e) V; V; V.

Referências

- ABEEÓLICA – Associação Brasileira de Energia Eólica. **Números do setor**. 2016. Disponível em: <<http://www.portalabeeolica.org.br/>>. Acesso em: 30 out. 2016.
- ABRADEE – Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica. **Visão geral do setor**. Disponível em: <<http://www.abradee.com.br/setor-eletrico/visao-geral-do-setor>>. Acesso em: 30 out. 2016.
- _____. **Redes de energia elétrica**. 2016. Disponível em: <<http://www.abradee.com.br/setor-eletrico/redes-de-energia-eletrica>>. Acesso em: 16 nov. 2016.
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 2. ed. Brasília: ANEEL, 2005.
- _____. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3. ed. Brasília: Aneel, 2008.
- _____. **Resolução da Aneel nº 414, de 9 de setembro de 2010**. Estabelece as condições gerais de fornecimento de energia elétrica de forma atualizada e consolidada. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/documents/656877/14486448/bren2010414.pdf/3bd33297-26f9-4ddf-94c3-f01d76d6f14a?version=1.0>>. Acesso em: 16 nov. 2016.
- _____. **Regulação de serviços de distribuição**. [s.d]. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/regulacao-da-distribuicao>>. Acesso em: 16 nov. 2016.
- BARROS, B. F.; BORELLI, R.; GEDRA, R. L. **Geração, transmissão e consumo de energia elétrica**. São Paulo: Érica, 2014.
- BIRD, J. **Circuitos elétricos: teoria e tecnologia**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009.
- BRASIL. Portal Brasil. **Brasil estará entre os 20 países com maior geração solar em 2018**. 2016. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/infraestrutura/2016/01/brasil-estara-entre-os-20-paises-com-maior-geracao-solar-em-2018>>. Acesso em: 30 out. 2016.
- _____. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2023**. Brasília: MM/EPE, 2014.
- CCEE – Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. **Onde atuamos**. 2016. Disponível em: <http://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/onde-atuamos>. Acesso em: 20 nov. 2016.
- COMO funciona uma hidrelétrica. Disponível em: <<https://goo.gl/KuGkDs>>. Acesso em: 23 dez. 2016.
- CUNHA, L. Padrões brasileiros. In: **Portal O setor elétrico**. Disponível em: <<http://www.osetoreletrico.com.br/2016/2010/03/25/padroes-brasileiros/>>. Acesso em: 15 nov. 2016.
- EDP - Energias de Portugal. **Fontes de energia**. 2016. Disponível em: <<https://>>

www.edp.pt/pt/sustentabilidade/ambiente/alteracoesclimaticas/saibamais/Pages/FontesdeEnergia.aspx>. Acesso em: 30 out. 2016.

ELETRONUCLEAR – ELETROBRAS. **Panorama da energia nuclear no mundo:** edição 2016. Disponível em: <http://www.eletronuclear.gov.br/LinkClick.aspx?fileticket=SG_9CnL80wM%3d&tabid=406>. Acesso em: 30 out. 2016.

ENERGIA heliotérmica no Brasil. Disponível em: <<https://goo.gl/1SWm7Y>>. Acesso em: 23 dez. 2016.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Anuário estatístico de energia elétrica:** ano-base 2014. Rio de Janeiro: EPE, 2015.

_____. **Balço energético nacional:** ano-base 2015. Relatório Síntese. Rio de Janeiro: EPE, 2016.

GIGANTES da engenharia: usinas. Disponível em: <<https://goo.gl/ybqLaH>>. Acesso em: 23 dez. 2016.

GUEDES, M. V. **Corrente alternada:** sistemas polifásicos. Núcleo de Estudos de Máquinas Eléctricas – Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto, 1993. Disponível em: <http://paginas.fe.up.pt/maquel/AD/CA_sispoli.pdf>. Acesso em: 16 nov. 2016.

HALLYDAY, D. **Fundamentos de física.** Rio de Janeiro: LTC, 2012. v. 1.

IEA – Agência Internacional de Energia. **Energy Atlas.** Crude Oil Production. Disponível em: <<http://energyatlas.iea.org/#!/tellmap/-1920537974>>. Acesso em: 20 nov. 2016.

LEITE, R. C. C.; LEAL, M. R. L. V. O biocombustível no Brasil. **Novos Estudos – CEBRAP,** São Paulo, n. 78, jul. 2007. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0101-33002007000200003>. Acesso em: 30 out. 2016.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Boletim mensal dos combustíveis Renováveis.** 2016. Brasília, SPG, n. 102, ago. 2016.

O PODER da energia geotérmica. Disponível em: <<https://goo.gl/wWLVnj>>. Acesso em: 23 dez. 2016.

ONS – Operador Nacional do Sistema. **SINDAT:** sistema de informações geográficas cadastrais do SIN. Disponível em: <http://www.ons.org.br/conheca_sistema/dados_tecnicos.aspx>. Acesso em: 4 dez. 2016.

PHDONLINE. **Diferença entre energia monofásica e trifásica.** 2016. Disponível em: <<http://www.phdonline.com.br/informacoes-importantes/diferenca-entre-energia-monofasica-e-trifasica/>>. Acesso em: 17 nov. 2016.

PINTO, M. O. **Energia elétrica:** geração, transmissão e sistemas interligados. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

REN21 - Renewable Energy Policy Network for the 21st Century. **Renewables 2016 - Global Status Report.** 2016. Disponível em: <http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/10/REN21_GSR2016_FullReport_en_11.pdf>. Acesso em: 30 out. 2016.

REPORTAGEM do Fantástico sobre a energia solar fotovoltaica no Brasil. Disponível em: <<https://goo.gl/cVrB0d>>. Acesso em: 23 dez. 2016.

USINA de Itaipu. Disponível em: <<https://goo.gl/3jHFpT>>. Acesso em: 23 dez. 2016.

USINA Hidroelétrica de Itaipu. Disponível em: <<https://goo.gl/Hp4dKH>>. Acesso em: 23 dez. 2016.

Análise de sistemas elétricos e conservação de energia

Convite ao estudo

Caro aluno, esta unidade é destinada à apresentação de conceitos referentes à análise de sistemas elétricos e conservação de energia.

Na primeira seção, estudaremos as características dos sistemas residenciais e industriais, os aspectos relevantes para instalações elétricas com base na ABNT NBR 5410, o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL) e as características dos equipamentos elétricos, considerando a potência ativa, a potência reativa e a sua eficiência. Na segunda seção, o tema em discussão será o fator de potência, cujos aspectos verificados serão: qualidade da energia, energia reativa indutiva e capacitiva. E, por fim, na última seção, serão analisados programas de conservação de energia, desperdício de energia e diagnóstico energético.

Portanto, esta unidade tem por objetivo que você, aluno, entenda aspectos essenciais para análise do sistema elétrico, para o seu melhor aproveitamento, considerando a eficiência dos equipamentos, o dimensionamento correto de instalações elétricas, a correção do fator de potência, entre outros.

Esta unidade vem de encontro à necessidade da utilização de programas de eficiência energética que incentivem a redução de perdas de energia elétrica por equipamentos ineficientes. Devemos não só ter uma matriz energética limpa, com fontes renováveis, mas também é essencial utilizarmos de forma eficaz a energia que nos é fornecida. Dentro deste contexto, você, aluno, que é o projetista de instalações elétricas, deve utilizar os conceitos e os aspectos normativos de forma a propiciar um melhor aproveitamento de todos os

recursos disponíveis, tornando o sistema eficiente e apto para um bom funcionamento. Nesse sentido, com o andamento das seções, você estará preparado para gerenciar estas ações e ter uma visão geral do contexto de sistemas elétricos.

Seção 2.1

Equipamentos elétricos e suas características reativas

Diálogo aberto

Utilizar os conceitos de eficiência energética e redução de perdas de energia inclui muitos aspectos que devem ser analisados para a otimização do sistema de energia elétrica.

Para que você, aluno, compreenda estes aspectos, terá que se colocar dentro de uma situação em que seja necessária a utilização destes. Imaginaremos que você é o projetista de uma instalação elétrica residencial e deve elaborar um projeto que seja o mais eficiente possível. Considerando isto, algumas questões podem ser levantadas para auxiliar na elaboração deste projeto, sendo:

- Em qual classe o sistema elétrico residencial está inserido? Pertence ao grupo B ou A? A tensão utilizada é de baixa tensão ou alta tensão?
- Quais normas devem ser seguidas para elaboração deste projeto? Que aspectos gerais devem ser levados em conta?
- Com relação aos equipamentos elétricos, quais características devem ser levadas em consideração para escolha?
- Existem programas de conservação de energia que categorizam os equipamentos elétricos por eficiência energética? Temos acesso a essa informação?

Utilize os conceitos apresentados na disciplina, tais como as características descritas para o sistema residencial e industrial, a ABNT NBR 5410, os aspectos considerados para melhorar a eficiência dos equipamentos elétricos e os dados do PROCEL, para auxiliar na elaboração deste projeto.

Caro aluno, você está preparado para ser um projetista de instalações elétricas e desempenhar seu papel da melhor maneira? Espero que você esteja animado para este desafio. Bons estudos e um ótimo trabalho!

Não pode faltar

O desenvolvimento de programas de eficiência energética e de redução de perdas de uso final de energia está sendo difundido cada vez mais. Existe a necessidade não só de se ter uma matriz energética limpa, utilizando fontes renováveis, mas também é necessário utilizar de forma eficaz a energia elétrica disponível. Neste sentido, alguns aspectos serão discutidos, englobando a análise de sistemas elétricos residenciais e industriais.

Análise dos sistemas elétricos residenciais e a norma NBR 5410

O setor residencial está incluído no sistema de distribuição de energia elétrica como classe de baixa tensão. Este segmento está inserido no grupo B (mais precisamente no grupo B1) do sistema de distribuição de energia elétrica, caracterizado por unidades consumidoras com fornecimento de tensão inferior a 2,3 kV, com tarifação monômnia (ANEEL, 2010). Esta tarifação está associada ao custo unicamente do consumo de energia elétrica ativa.

A ABNT NBR 5410 orienta a respeito das regras que se deve seguir em instalações elétricas para estas unidades.



Assimile

Projetar as instalações elétricas corretamente, dentro dos parâmetros estabelecidos na NBR 5410, torna o sistema seguro e eficiente. Quando as instalações são subdimensionadas, ou seja, existem mais cargas do que as projetadas, podemos ter aquecimento nas fiações, colocando o local em risco de incêndios e desperdiçando energia.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) elaborou a Norma Brasileira (NBR) 5410, ou ABNT NBR 5410, com o intuito de

estabelecer as condições que devem satisfazer as instalações elétricas de baixa tensão, a fim de garantir a segurança de pessoas e animais, o funcionamento adequado da instalação e a conservação dos bens (ABNT, 2004). Nesta, destacaremos quatro aspectos principais de análise, sendo:

- Levantamento da demanda de iluminação.
- Levantamento das demandas de tomadas de uso geral (TUG) e específico (TUE).
- Divisão das cargas em circuitos conforme funcionalidade.
- Dimensionamento de condutores elétricos e proteções.

A descrição de cada um destes aspectos será feita na sequência.

1. Levantamento da demanda de iluminação

Para locais de habitação, alguns aspectos devem ser levados em conta no momento da previsão de carga referente à iluminação. De acordo com a NBR 5410, em cada cômodo ou dependência deve ser instalado pelo menos um ponto de luz fixo no teto, comandado por interruptor, cômodo ou dependências com área superior a 6 m², deve ser prevista uma carga mínima de 100 VA para os primeiros 6 m², acrescida de 60 VA para cada aumento de 4 m² inteiros.



Pesquise mais

O valor mínimo previsto para carga de iluminação é estabelecido para dimensionamento de circuitos, porém não necessariamente precisa ser a potência nominal da lâmpada. Para saber quais tipos de lâmpada o mercado oferece e qual a eficiência de cada uma, acesse:

COPEL. **Tipos de Lâmpadas**. 2016. Disponível em: <http://www.copel.com/hpcopel/root/nivel2.jsp?endereco=%2Fhpcopel%2Froot%2Fpag_copel2.nsf%2F5d546c6fdeabc9a132571000064b22e%2F423c114f77e78e81032573f7004b2e92>. Acesso em: 14 nov. 2016.

2. Levantamento das demandas de tomadas e equipamentos

A previsão de carga destinada à TUG e TUE deve ser determinada de acordo com a necessidade de cada residência, porém, alguns critérios mínimos devem ser definidos.



Exemplificando

TUG são aquelas destinadas à ligação de mais de um aparelho, podendo ser, por exemplo, um liquidificador, uma televisão, um aparelho de som, em suma, aparelhos que possuem corrente menor que 10 A. Já as TUE são aquelas destinadas a um equipamento fixo, como chuveiros, máquina de lavar, ar-condicionado, torneira elétrica, enfim, aparelhos que possuam corrente superior a 10 A.

Com base na NBR 5410, podemos listar algumas características que se devem ter, tais como:

- Para banheiros, previsão de pelo menos um ponto de tomada, com potência mínima de 600 VA.
- Para cozinhas, copas, áreas de serviço, lavanderias e locais similares à previsão de uma tomada a cada 3,5 m, ou fração, de perímetro, sendo que, em áreas com bancada contendo pia, devem ser instaladas duas tomadas, podendo ser no mesmo ponto ou em pontos distintos, com potência mínima de 600 VA para os primeiros três pontos de tomada e para os demais, 100 VA, regra válida até seis pontos.
- Para varandas, deve-se prever pelo menos um ponto de tomada, com potência de no mínimo 100 VA por ponto.
- Para salas e dormitórios, deve-se prever pelo menos um ponto de tomada a cada 5 m, com potência mínima de 100 VA por ponto.

3. Divisão de cargas

Como para os demais itens, a divisão de cargas deve seguir algumas regras, sendo elas:

- Todo ponto previsto para um equipamento com corrente nominal superior a 10 A deve estar em um circuito independente.
- Pontos destinados à área de serviço, cozinha, copa, lavanderia e locais similares devem estar em circuitos destinados exclusivamente a estes locais.
- Para os demais pontos de tomada, alimentados por circuito comum, não se deve exceder corrente nominal de 16 A, e os circuitos de iluminação e tomada não devem ser alimentados por apenas um circuito.



Reflita

No trecho acima, a NBR 5410 nos dita a seguinte regra:

“Não alimentar circuitos de iluminação e tomada, em sua totalidade, por apenas um circuito”.

Já parou para pensar no porquê disso? E se a corrente nominal do meu circuito de iluminação ou tomadas não excedesse 16 A? Seria necessário ainda dividir os circuitos?

Reflita! Você gostaria que toda vez que fosse trocar um chuveiro elétrico, por exemplo, houvesse a necessidade de desligar o circuito elétrico como um todo?

4. Dimensionamento de condutores elétricos e proteções

Para dimensionar os condutores elétricos, vários aspectos inseridos na NBR 5410 devem ser levados em consideração, entre eles:

- Capacidade de condução de corrente.
- Queda de tensão.
- Seção mínima.
- Sobrecarga.
- Curto-circuito.
- Choques elétricos.

Um circuito é corretamente dimensionado, quando aplicados esses seis critérios e considerado como seção final o maior entre todos os valores obtidos.



Pesquise mais

Os critérios para capacidade de condução de corrente estão descritos no item 6.2.5 da NBR 5410. Os critérios para queda de tensão podem ser encontrados no item 6.2.7 da NBR 5410:

Critérios para seção mínima estão disponíveis no item 6.2.6.1.1 da NBR 5410.

Critérios para sobrecarga estão descritos no item 5.3.4 e 6.3.4.2 da NBR 5410.

Critérios de curto circuito podem ser encontrados no item 5.3.5 e 6.3.4.3 da NBR 5410.

E, por fim, os critérios estabelecidos para choques elétricos estão no item 5.1.2.2.4 da NBR 5410.

Para ter acesso à NBR 5410, acesse:

ABNT - Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR 5410**: Instalações elétricas de baixa tensão. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. Disponível em: <http://www.iar.unicamp.br/lab/luz/ld/normas%20e%20relat%F3rios/NRs/nbr_5410.pdf>. Acesso em: 9 jan. 2017.

Para determinação dos dispositivos de proteção, deve-se levar em conta o tipo de sobrecorrente que passa pelo condutor. Essas sobrecorrentes podem ser classificadas como: curto-circuito ou sobrecargas.

As sobrecorrentes de curto-circuito têm por característica serem elevadas e de curta duração. Já as de sobrecargas são caracterizadas por longa duração e com valores pouco acima do nominal.

Os dispositivos de proteção são classificados em três tipos, sendo: disjuntores, dispositivos diferenciais residuais (DR) e fusíveis.

Os disjuntores protegem contra sobrecargas, dependendo de

suas características contra curto-circuito. Disjuntores térmicos protegem apenas contra sobrecargas, e disjuntores magnéticos e termomagnéticos protegem tanto para curto-circuito quanto para sobrecargas.

Os fusíveis oferecem proteção apenas contra curto-circuito, e os dispositivos diferenciais residuais atuam oferecendo proteção contra choques elétricos.

Equipamentos elétricos residenciais

Dentro dos aspectos característicos de instalações elétricas, verificamos que, para se dimensionar e dividir os circuitos elétricos, é necessário seguir uma série de regras, levando em conta a corrente nominal de cada equipamento.

Na determinação dos equipamentos elétricos, verificamos o valor de corrente, pois cada equipamento fornece a potência nominal e, assim, podemos dimensionar e determinar os circuitos.

A escolha de equipamentos elétricos eficientes aumenta a capacidade dos circuitos em acomodar mais equipamentos e reduz o desperdício de energia, contribuindo para o bom funcionamento do sistema como um todo. Para isso, é necessário considerar as potências ativas e reativas de cada um dos equipamentos elétricos.

A potência ativa é aquela que efetivamente realiza o trabalho. Já a potência reativa é utilizada para criar e manter campos eletromagnéticos, ou seja, a potência reativa não produz trabalho e ocupa uma capacidade de condução de corrente que poderia ser utilizada para fornecer mais energia ativa (trabalho útil). A potência ativa e a potência reativa constituem a potência aparente, podendo ser descritas pela equação a seguir, em que S é a potência aparente (valor complexo); P é a potência ativa (valor real); e Q é a potência reativa (valor imaginário).

$$S = P + jQ$$



Assimile

É importante definir de forma clara as potências aparente, ativa e reativa.

Potência ativa é a potência que produz trabalho (medida em W – watts).

Potência reativa é a que produz campos eletromagnéticos (medida em VAR – vol-ampere reativo).

Potência aparente é a raiz da soma dos quadrados da potência ativa e reativa (medida em VA – volt-ampere).

A razão entre a potência ativa e a potência aparente é o fator de potência (fp), sendo,

$$fp = \frac{P}{S}$$

Portanto, levar em conta o fator de potência, é essencial, pois este valor representa o quanto de energia ativa (P) está sendo absorvida pela carga ou equipamento perante a energia total do sistema (S). Quanto maior o valor de fp , maior o rendimento do equipamento.



Exemplificando

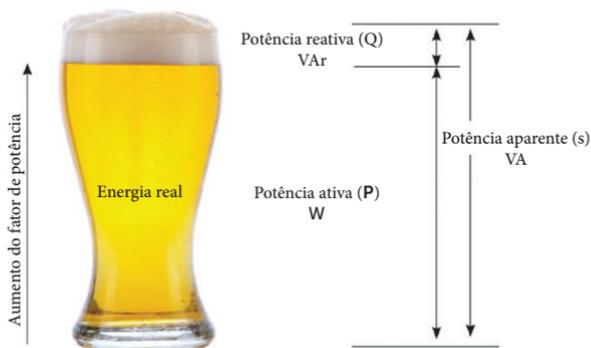
A relação entre a potência ativa, reativa e aparente pode ser exemplificada por um copo cheio de cerveja.

A espuma equivale à potência reativa (Q) e o líquido equivale à potência ativa (P). A soma vetorial entre P e Q equivale à potência aparente (S), que é o volume total do copo.

Quanto maior a quantidade de líquido (P) em relação ao volume total do copo, maior o fator de potência.

Podemos verificar estas informações pela figura a seguir:

Figura 2.1 | Relação entre potência ativa, reativa e aparente



Fonte: Pinto (2014).

Análise de sistemas elétricos industriais

O setor industrial pode ser incluído tanto no grupo B quanto no grupo A do sistema de distribuição de energia elétrica. Esta classe pode ser incluída no grupo B, se a tensão fornecida for inferior a 2,3 kV, participando do subgrupo B3 – demais classes (ANEEL, 2010).

Para o setor industrial ser classificado como grupo A, o fornecimento de tensão deve ser igual ou superior a 2,3 kV, ou o atendimento deve ser feito por um sistema subterrâneo de distribuição de tensão secundária, caracterizada por tarifa binômia (ANEEL, 2010). No grupo A existem 6 subgrupos, sendo:

- Subgrupo A1 – tensão igual ou superior a 230 kV.
- Subgrupo A2 – tensão de 88 kV a 138 kV.
- Subgrupo A3 – tensão de 69 kV.
- Subgrupo A3a – tensão de 30kV a 44kV.
- Subgrupo A4 – tensão de 2,3 kV a 25 kV.
- Subgrupo AS – tensão inferior a 2,3 kV, sistema subterrâneo.

Para projetar as instalações elétricas industriais, devemos analisar o nível de tensão em que o sistema está conectado. No Brasil existem

normas para instalações de baixa tensão e média tensão, sendo:

- ABNT NBR 5410 – Instalações elétricas de baixa tensão (estudada anteriormente).
- ABNT NBR 14039 – Instalações elétricas de média tensão de 1,0 kV a 36,2 kV.

Procel

O Ministério de Minas e Energia e o Ministério da Indústria e Comércio instituíram o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (Procel), em 30 de dezembro de 1985, com o objetivo de ser um programa abrangente na área do uso eficiente de energia elétrica no Brasil (VIANA et al., 2012).



Refleta

Programas de eficiência energética tiveram que ser instituídos em razão da crise energética ocasionada no fim dos anos 1970. Uma questão interessante que deve ser levantada: é necessária uma crise para elaboração de planos de conservação de energia e eficiência? Devemos deixar a situação chegar a um ponto crítico para solucioná-la?

Ao longo dos anos, subprogramas surgiram e puderam ser categorizados em três classes, sendo: informação/educação, tecnológicos e apoio direto a setores específicos. Alguns destes subprogramas podem ser citados, tais como:

- Centro Brasileiro de Informação de Eficiência Energética – **Procel Info**.
- Eficiência Energética em Edificações – **Procel Edifica**.
- Eficiência Energética em Equipamentos – **Procel Selo**.
- Eficiência Energética Industrial – **Procel Indústria**.
- Eficiência Energética no Saneamento Ambiental – **Procel Sanear**.
- Eficiência Energética nos Prédios Públicos – **Procel EPP**.

- Eficiência Energética Municipal – **Procel GEM.**
- Informação e Cidadania – **Procel Educação.**
- Eficiência Energética na Iluminação Pública e Sinalização Semafórica – **Procel Reluz.**

Os principais resultados alcançados pelo Procel, vieram a partir do Procel Selo (VIANA et al., 2012). Este subprograma apoia o Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE) e tem por objetivo auxiliar o consumidor provendo informações úteis quanto à eficiência dos aparelhos eletrônicos, fazendo com que o preço não seja o único requisito levado em consideração na hora da compra. Desta forma, o PBE impulsiona a inovação e a evolução tecnológica dos produtos, estimulando a competitividade da indústria, para melhoria contínua dos equipamentos.

Os equipamentos elétricos com Selo Procel são: congeladores; refrigeradores; lavadoras; televisores; ventiladores; condicionadores de ar; micro-ondas; lâmpadas fluorescentes; lâmpadas a vapor de sódio; lâmpadas led; reatores; bombas e motobombas; motores elétricos; sistema de aquecimento solar; sistema fotovoltaico.



Pesquise mais

Para saber mais dados sobre a eficiência elétrica de cada equipamento descrito nesta seção, acesse:

PROCEL – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica. **Equipamentos com Selo Procel.** Disponível em: <<http://www.procelinfo.com.br/main.asp?View={B70B5A3C-19EF-499D-B7BC-D6FF3BABA5FA}>>. Acesso em: 14 nov. 2016.

Sem medo de errar

Retomando a situação-problema descrita no item Diálogo aberto desta seção, verificamos que os conceitos de eficiência energética e redução de perdas de uso final incluem realmente muitos aspectos a serem analisados para um adequado uso do sistema de energia elétrica.

Para desempenhar um bom papel de projetista, analisamos que primeiramente é necessário estabelecer alguns conceitos. Como estamos projetando uma unidade consumidora do tipo residencial, esta é atendida por baixa tensão, incluída no grupo B do sistema de distribuição de energia elétrica, mais precisamente no subgrupo B1.

De posse dessa informação, é possível averiguar que a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) estabelece uma norma para a instalação elétrica deste setor. A ABNT NBR 5410 rege as normas gerais para os sistemas de baixa tensão.

Os principais aspectos definidos pelo NBR 5410 são divididos em quatro, sendo:

- Levantamento da demanda de iluminação.
- Levantamento das demandas de tomadas de uso geral (TUG) e específico (TUE).
- Divisão das cargas em circuitos conforme funcionalidade.
- Dimensionamento de condutores elétricos e proteções.

Para cada um destes itens, é descrito como é necessário dimensionar e especificar as características em questão. Resumidamente, podemos citar alguns parâmetros, sendo:

- Para iluminação, deve-se prever para dependências ou cômodos com área superior a 6 m^2 uma carga mínima de 100 VA para os primeiros 6 m^2 , acrescida de 60 VA para cada aumento de 4 m^2 inteiros.
- As tomadas são definidas por uso geral e específico, tendo cada área uma potência mínima definida. Por exemplo: nos banheiros, deve-se prever potência de 600 VA mínima. Para cozinhas, copas e áreas de serviços, deve-se prever a potência de 600 VA para os três primeiros pontos de tomada e para os demais 100 VA.
- Para divisão de carga, equipamentos com corrente nominal maior do que 10 A devem estar em um circuito independente. Para equipamentos com corrente nominal menor que 10 A,

pode-se associar mais cargas no circuito, porém, não se deve exceder 16 A de corrente nominal.

- Com relação ao dimensionamento de condutores elétricos, seis aspectos são levados em consideração, sendo eles: capacidade de condução de corrente, queda de tensão, seção mínima, sobrecarga, curto-circuito e choques elétricos.
- Os dispositivos de proteção são classificados por tipo de sobrecorrente, sendo corrente de curto-circuito e sobrecorrente. Os três dispositivos mais utilizados são: fusíveis, dispositivos diferenciais residuais (DR) e disjuntores.

Após conhecermos estes conceitos de dimensionamento de sistemas elétricos, para melhor aproveitamento, precisamos escolher bem os equipamentos a serem utilizados. Vimos que os equipamentos são classificados em razão de sua potência fornecida, podendo ser a potência ativa e/ou reativa. Alguns equipamentos demandam potência reativa, pois esta fornece o campo eletromagnético necessário para seu bom funcionamento. Portanto, analisar o fator de potência (razão entre potência ativa e aparente) é essencial.

O Procel disponibiliza em seu site uma lista dos equipamentos, classificados por eficiência. Alguns equipamentos podem ser citados, como: condicionadores de ar, equipamentos de iluminação, sistema de aquecimento, refrigeradores, entre outros.

Avançando na prática

Colocando em prática os conceitos

Descrição da situação-problema

Para avançarmos na aprendizagem, vamos imaginar que você é o projetista de uma residência que possui os seguintes cômodos e equipamentos:

1. Quarto: 1 TV (300 W) e 1 ar-condicionado (1500 W).
2. Sala de estar: 1 TV (300W), 1 aparelho de telefone (50W) e 1 ar-condicionado (1500 W).
3. Cozinha: 1 forno elétrico (1500 W), 1 geladeira (500W); 1 liquidificador (200 W), 1 micro-ondas (2000 W) e 1 torneira

elétrica (2500 W).

4. Banheiro: 1 chuveiro elétrico (5500 W).

A residência possui 48 m², sendo que o quarto possui 12 m², a cozinha, 18 m², a sala, 12 m², e o banheiro, 6 m². Como você determinaria a potência instalada de iluminação, TUG e TUE desta residência?

Resolução da situação-problema

Para dimensionarmos o sistema de iluminação, devemos levar em consideração algumas regras, vistas anteriormente. Portanto:

- Quarto e sala de estar: 12 m², em que, para os primeiros 6 m², tem-se 100 VA, e, para os 6 m² restantes, 60 VA (acréscimo de 60 VA a cada 4 m² inteiros), totalizando 160 VA de potência.
- Cozinha: 18 m², em que, para os primeiros 6 m², tem-se 100 VA, e, para os 12 m² restantes, 3 x 60 VA (acréscimo de 60 VA a cada 4 m² inteiros), totalizando 280 VA de potência.
- Banheiro: 6 m², com 100 VA.

Para o dimensionamento de TUG e TUE, de acordo com a NBR 5410, deve-se inserir uma tomada a cada 3,5 m na cozinha e uma a cada 5 m na sala de estar e nos quartos, todavia, o enunciado não fornece o perímetro dos cômodos. Portanto, utilizaremos os seguintes critérios:

- Quarto e sala de estar: dois pontos de tomada de 100 VA são previstos, porém como os quartos possuem uma TV de 300 W e um ar-condicionado de 1500 W, serão especificados mais dois pontos de tomada, um de 300 W e outro de 1500 W, totalizando então 2000 VA de potência instalada.
- Cozinha: devem-se prever no mínimo cinco pontos de tomada para este local, porém utilizaremos seis pontos. Primeiramente, assumindo que nesta cozinha exista uma bancada, a NBR 5410 exige que devam ser adicionados dois pontos de 600 VA para equipamentos de uso geral, um ponto de 1500 W para o forno elétrico, um ponto de 600 W para a geladeira, um ponto de 2000 W para o micro-ondas e um ponto para torneira elétrica

de 2500 W, totalizando 7800 VA de potência instalada.

- Banheiro: é necessário prever um ponto de 600 VA e outro ponto de 5500 W para o uso do chuveiro, totalizando 6100 VA de potência instalada.

Faça valer a pena

1. O Procel foi instituído pelo Ministério de Minas e Energia e o Ministério da Indústria e Comércio, em 30 de dezembro de 1985. Este programa tinha um objetivo específico a ser realizado.

Qual é o objetivo geral do Procel?

- a) Buscar a eficiência energética no setor elétrico diminuindo o desperdício de energia elétrica.
- b) Diminuir o custo dos equipamentos elétricos no Brasil.
- c) Estimular a postergação de investimentos e tecnologias em equipamentos elétricos.
- d) Estimular o uso de fontes renováveis na matriz energética brasileira.
- e) Ser um programa abrangente na área de consumo ineficiente de equipamentos.

2. Os dispositivos de proteção têm por objetivo monitorar as correntes que circulam pelos circuitos elétricos, evitando sobrecorrentes. Existem dois tipos de sobrecorrente, a de curto-circuito e a de sobrecargas.

Com relação aos dispositivos de proteção, é incorreto afirmar que:

- a) Fusível é um dispositivo de proteção utilizado para evitar curto-circuito.
- b) Os dispositivos de proteção são classificados em três tipos, sendo: disjuntores, dispositivos diferenciais residuais (DR) e fusíveis.
- c) Disjuntores são dispositivos de proteção utilizados para evitar sobrecargas e curtos-circuitos.
- d) Dispositivos diferenciais residuais (DR) atuam oferecendo proteção contra choques elétricos.
- e) Disjuntores são dispositivos de proteção utilizados apenas para evitar sobrecargas.

3. Para o dimensionamento da iluminação, tomadas de uso geral e específico, várias regras devem ser seguidas, tais como prever um ponto de luz fixo para áreas com tamanho igual ou inferior a 6 m², prever potência de 600 VA mínima para os banheiros, entre outras. Para divisão de cargas, devem-se seguir algumas regras que também foram elaboradas pela ABNT NBR 5410.

Com relação à divisão de cargas, é incorreto afirmar que:

- a) Equipamentos com corrente nominal superior a 10 A devem estar em um circuito independente.
- b) Equipamentos com corrente nominal superior a 6 A devem estar em um circuito independente.
- c) Equipamentos com corrente nominal inferior a 10 A podem estar em circuitos associados.
- d) Pontos de tomada e iluminação não devem ser ligados em um mesmo circuito.
- e) Circuitos associados não devem ultrapassar corrente nominal de 16 A.

Seção 2.2

Fator de potência

Diálogo aberto

Caro aluno, os conceitos referentes à qualidade da energia elétrica auxiliam para o bom desempenho do sistema de energia elétrica, influenciando na vida útil dos equipamentos, na eficiência das cargas instaladas, entre outros.

Para que você compreenda e assimile este conteúdo, é necessário se colocar em uma situação na qual seja necessária a utilização dos conceitos apresentados nesta disciplina. Imaginaremos que você é o engenheiro chefe de uma distribuidora de energia elétrica e precisa elaborar um relatório avaliando o nível de qualidade da energia fornecida. Considerando isso, algumas questões podem ser levantadas para auxiliar na identificação e na avaliação, sendo:

- Quais aspectos devem ser levados em consideração para avaliação da qualidade da energia?
- Como avaliar estes aspectos? Devemos comparar com um caso ideal de operação do sistema de energia elétrica?
- Quais cargas instaladas no sistema de energia influenciam para a diminuição da qualidade da energia?
- Como se comportam estas cargas no sistema? São cargas lineares ou não lineares?
- O fator de potência é considerado na análise da qualidade energética?

Utilize os conceitos apresentados na disciplina, tais como características das cargas sensíveis à variação da qualidade da energia, fator de potência e energia reativa indutiva e capacitiva para auxiliar na elaboração deste relatório.

Caro aluno, você está preparado para avaliar a qualidade da energia entregue pela concessionária em que trabalha? Espero que você esteja animado para este desafio. Bons estudos e um ótimo trabalho!

Não pode faltar

Cargas sensíveis à variação da qualidade da energia

As cargas elétricas atendidas pelo sistema de distribuição mudaram suas características elétricas ao longo dos anos por conta do desenvolvimento das tecnologias dos dispositivos utilizados, da eletrônica de potência, entre outros fatores. Todos estes aspectos contribuíram para eficiência dos dispositivos, melhora no rendimento, custo e para o desenvolvimento de novas funções para estes equipamentos, antes restritas por conta das tecnologias disponíveis.

Muitas vantagens são vinculadas à utilização destas cargas mais eficientes, porém, também existem desvantagens em relação a estes equipamentos, como a sua não linearidade. Desta forma, não é possível ter uma relação de corrente e tensão determinadas por uma equação linear.

Por conta da utilização cada vez maior de cargas não lineares, tais como computadores, televisores, refrigeradores, condicionadores de ar, fornos elétricos, entre outros, a preocupação com a qualidade da energia elétrica (QEE) fornecida aos consumidores tornou-se maior e o foco da preocupação mudou. Antes da inserção dessas cargas não lineares, a preocupação com a QEE estava voltada a não interrupção de energia e à limitação dos níveis de tensões e frequência dentro do padrão considerado aceitável.

Diante desse contexto, a continuidade no fornecimento da energia elétrica, é apenas um aspecto em análise para a qualidade da energia, sendo que outros parâmetros para avaliação da conformidade na operação do sistema elétrico são levados em consideração.



Pesquise mais

Existem dois parâmetros para fiscalização das interrupções no fornecimento da energia elétrica utilizados pela ANEEL (Agência Nacional

de Energia Elétrica), a DEC (duração equivalente de interrupção por unidade consumidora) e a FEC (frequência equivalente de interrupção por unidade consumidora).

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Indicadores coletivos de continuidade:** DEC e FEC. 2016. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/indicadores-coletivos-de-continuidade>>. Acesso em: 23 nov. 2016.

Para definir estes aspectos, as condições reais de um sistema elétrico são comparadas com as condições ideais, mensurando os desvios obtidos. Considerando um sistema operando de forma ideal, os seguintes parâmetros são identificados (POMILIO; DECKMANN, 2009):

- Tensões nominais constantes.
- Tensões trifásicas equilibradas.
- Fator de potência unitário.
- Frequência síncrona constante.
- Perdas de transmissão e distribuição nulas.

Desta forma, a análise da QEE é realizada observando sete aspectos gerais, que levam em consideração este sistema ideal de operação, porém inacessível. Os aspectos podem ser listados, sendo (ANEEL, 2016a):

- Tensão em regime permanente.
- Fator de potência.
- Harmônicos.
- Desequilíbrio de tensão.
- Flutuação de tensão.
- Variações de tensão de curta duração (VTCD).
- Variação de frequência.

Estes aspectos serão detalhados e definidos ao longo da Unidade 3 - Falhas e distúrbios do sistema elétrico e sua identificação.

Estes parâmetros causam perturbações no sistema e analisá-los de forma criteriosa é de suma importância. Os níveis de tensão influenciam diretamente no bom funcionamento e vida útil dos equipamentos elétricos. Já o fator de potência (fp) deve ser corrigido para o aumento da eficiência do sistema elétrico, e níveis muito baixos de fp são penalizados pelas concessionárias, devendo pagar multa por excesso de reativos.

Fator de potência

As cargas ou o conjunto de equipamentos que compõem a rede elétrica possuem basicamente três características: resistivas, indutivas e capacitivas. As cargas puramente resistivas necessitam apenas da potência ativa para o funcionamento. Já as cargas indutivas e capacitivas precisam de dois tipos de potência para operar, da potência ativa (P) e da potência reativa (Q).

A potência ativa é a componente responsável por efetivamente realizar o trabalho. Já a potência reativa é utilizada para criar e manter campos eletromagnéticos.

Para analisar o fator de potência (fp) das cargas, é necessário considerar essas duas componentes, as potências ativa e reativa, e também a potência aparente. A potência aparente (S), como visto na Seção 2.1, pode ser definida pela soma vetorial da potência ativa e reativa.

$$S = P + jQ$$

Onde:

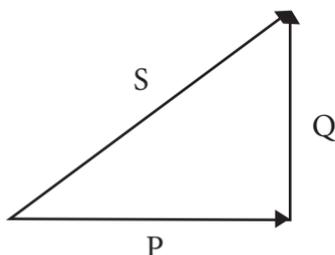
P – potência ativa, sendo um valor real, medida em watts (W).

Q – potência reativa, sendo um valor imaginário, medida em volt-ampère reativo (VAr).

S – potência aparente, sendo um valor complexo, medida em volt-ampère (VA).

Esses componentes ativam, reativam e aparentemente compõem o triângulo de potências, conforme ilustrado na Figura 2.2.

Figura 2.2 | Triângulo de potências



Fonte: adaptada de ANEEL (2008).

A magnitude da potência aparente pode ser definida pela raiz da soma dos quadrados da potência ativa e reativa.

$$|S| = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

Portanto, a relação do fator de potência (fp) pode ser definida como (ANEEL, 2008):

$$fp = \frac{P}{S}$$

Mediante essas considerações, nota-se que o fator de potência representa a quantidade de energia ativa (P) perante a energia total do sistema (S) absorvida pela carga ou equipamento. Sendo assim, cargas que possuem alto valor de fp apresentam alta eficiência no uso da energia elétrica, e as cargas que possuem baixo valor de fp, além de apresentarem baixa eficiência, representam uma sobrecarga para o sistema elétrico.

Uma elevada quantidade de reativos influencia nesse baixo valor do fator de potência e gera várias consequências ao sistema, tais como (GREDA et al., 2014):

- Consumidores atendidos por alta tensão (grupo A) terão acréscimo na conta de energia elétrica em função do pagamento de multas por baixo fator de potência.
- Surgimento de queda de tensão acentuada na instalação, em razão do aumento da corrente.

- Maiores investimentos na instalação elétrica.
- Maiores investimentos em transformadores e dispositivos de proteção, em função de maiores correntes presentes na instalação.

Antes de se identificar prováveis soluções para a melhora desse rendimento, em função do fator de potência, é necessário definir quais são as principais cargas ou equipamentos que compõem este problema em questão. Podemos apontar alguns equipamentos que contribuem para o baixo valor do fp, sendo (GEDRA et al., 2014):

- Motores de indução trabalhando a vazio, com pequenas cargas ou superdimensionados: estes motores têm características de absorver a mesma potência reativa quando operando a vazio ou a plena carga, e a relação de fp leva em consideração que a potência ativa varia proporcionalmente a potência aparente. Portanto, quando o motor está a vazio ou superdimensionamento, o valor da potência ativa é muito menor que a potência aparente, conseqüentemente, o valor de fp será baixo.
- Transformadores operando a vazio ou com pequenas cargas: funcionam analogamente aos motores.
- Lâmpadas de descarga: estas lâmpadas precisam de um reator, e este equipamento necessita das duas potências para funcionar. Portanto, verificar o fp empregado em cada reator é essencial para a eficiência do sistema.
- Motores de pequena potência: motores de grande porte são mais eficientes que vários motores de pequeno porte atuando em série. Sendo assim, utilizar motores de pequena potência gera um fp baixo, se comparado a motores de elevada potência.
- Cargas específicas com elevado consumo de potência reativa: essas cargas necessitam tanto da potência ativa, quanto da potência reativa para funcionar, possuindo elevado consumo de reativos e baixo fator de potência.

Encontrar soluções que corrijam o fator de potência, para um melhor funcionamento do sistema e também para que não se extrapole as restrições dos níveis de fp.

Para as redes de distribuição de até 230 kV, os Procedimentos de Distribuição (PRODIST determina que o valor de referência do fator de potência seja 0,92 indutivo a 0,92 capacitivo. Para consumidores conectados em redes transmissoras em tensão entre 69 e 345 kV, os Procedimentos de Rede determinam que os consumidores conectados em redes de transmissão em tensão entre 69 e 345 kV têm como limite para o fator de potência o valor de 0,95 indutivo a 1,00, e acima de 345 kV o fator de potência é de 0,98 indutivo a 1,00 (ANEEL, 2012).

Os métodos utilizados para correção do fp podem ser listados em:

- Correção pelo aumento do consumo da energia ativa: este método utiliza a adoção de novas cargas com alto fator de potência ao sistema elétrico, sendo recomendado o uso para períodos de utilização da energia fora do horário de ponta.



Exemplificando

Um exemplo de utilização de novas cargas, para o aumento do fator de potência, é o metrô de São Paulo.

Neste metrô, foram instaladas lâmpadas incandescentes, para a correção do fator de potência.

- Correção através de motores síncronos superexcitados: a utilização deste método é feita para corrigir o fator de potência e também fornecer potência mecânica útil, porém, existe uma restrição devido aos elevados custos do motor.
- Compensação por capacitores: enquanto cargas são elementos que tipicamente consomem potência reativa e diminuem o fp, capacitores são elementos capazes de injetar potência reativa e aumentar o fp. Este método necessita de alguns conhecimentos prévios para melhor entendimento, portanto, os conceitos serão explicados a seguir.

Energia reativa indutiva

A energia reativa é a medida da energia armazenada que é devolvida à fonte durante cada ciclo de corrente alternada. Sendo assim, tecnicamente não se pode afirmar que energia reativa pode ser consumida. Em termos práticos, todavia, é muito comum se afirmar isto. Esta energia reativa (medida em VAR – volt-ampère reativo) pode ser dividida em duas classificações, energia reativa indutiva e energia reativa capacitiva.



Assimile

Cargas indutivas consomem reativos, tais como motores, transformadores (equipamentos em geral com bobinas), enquanto que cargas capacitivas injetam reativos, tais como bancos capacitores, produzindo energia reativa para a rede.

Energia reativa capacitiva

Em contrapartida, existem cargas que possuem características capacitivas e injetam na rede energia reativa capacitiva. Este tipo de energia (expressa inclusive com a mesma unidade da energia reativa indutiva, mas com sinal contrário) é injetada na rede.



Refleta

Analisando as cargas com características capacitivas, verifica-se que são fontes de energia reativa. Capacitores, por exemplo, quando utilizados em sistema de potência, compensam a absorção de reativos por parte dos componentes indutivos. Portanto, sendo utilizados elementos para compensação do fator de potência, podem melhorar o perfil de tensão e a eficiência dos equipamentos e aliviar a sobrecarga do sistema.

Fica-se, então, o questionamento: por que estes dispositivos não são utilizados para solucionar todos os distúrbios do sistema de distribuição de energia?

Como atuam os capacitores? De modo remoto, junto às cargas?

O custo para implantação desta solução é elevado, é complexo?

De posse dos conceitos da energia reativa indutiva e capacitiva, pode-se analisar que aumentar o valor do fator de potência, por meio de capacitores, melhora a eficiência da rede. E o controle dos reativos pode ser feito de três modos, sendo eles (PINTO, 2014):

- Com um banco fixo de capacitores ligados diretamente ao barramento: esta opção é a mais barata, porém, alguns problemas podem existir quando houver cargas variantes no tempo em que, ao longo do dia, haja momentos de determinado excesso de compensação reativa.
- Com um banco semiautomático de capacitores ligados ou retificados próximos às cargas: este controle é seletivo e mais robusto, estando mais próximo a carga, implicando em um maior custo.
- Por meio do acionamento automático e independente de um banco de capacitores: este modo de funcionamento é otimizado e opera de acordo com as leituras da carga, melhorando o fator de potência do circuito. É o mais indicado em todos os casos de compensação de reativos, porém seu custo é o mais elevado entre os três modos citados.

A instalação de bancos de capacitores em redes de distribuição é uma solução para correção do fator de potência. Embora seja uma técnica empregada desde meados do século passado, até hoje ainda carece de metodologias eficientes para determinação de onde alocar tais bancos e, em caso de bancos chaveados, de como operá-los eficientemente. Medidas para manter a segurança e eficiência dos bancos capacitores devem ser tomadas, tais como:

- O local de instalação dos capacitores deve ser bem ventilado e com espaçamento adequado entre as unidades.
- Capacitores não podem ser desligados e religados imediatamente, pois o capacitor armazena sua carga durante alguns minutos, devendo esperar que a resistência amortecedora contida nele dissipe a carga armazenada.
- Não se deve energizar dois ou mais bancos de capacitores simultaneamente, a fim de evitar sobretensões.

Por fim, um outro desafio é considerar que tais elementos devem ser muito bem dimensionados para evitar risco de explosão causada por ressonância entre estes elementos e a própria rede. Esta análise exige de você, aluno, a compreensão do o que são os harmônicos e os seus efeitos, tópico este que será abordado futuramente. Logo esta temática deverá ser revisada.

Sem medo de errar

Retomando a situação-problema descrita no item *Diálogo aberto* desta seção, verificamos que os conceitos referentes à qualidade da energia incluem muitos aspectos a serem analisados, para melhor eficiência do sistema de energia elétrica.

Para desempenhar seu papel de engenheiro chefe e conseguir elaborar seu relatório de avaliação da qualidade de energia (QEE), é necessário primeiramente conhecer como o sistema se comporta e que tipo de cargas são utilizadas.

Atualmente, a maioria das cargas instaladas possuem características não lineares, causando transtornos com relação à QEE. Devido a isto, foram incluídos novos aspectos de análise no sistema elétrico, como nível de tensão, fator de potência, harmônicos, desequilíbrio de tensão, flutuações de tensão, variações de tensão de curta duração e variações de frequência. Estes aspectos devem ser comparados com um modelo ideal de operação do sistema, a fim de verificar quais níveis são aceitáveis para o bom funcionamento do sistema de operação de energia elétrica.

Em um sistema ideal, as tensões nominais são constantes, as tensões trifásicas equilibradas, o fator de potência é unitário, a frequência síncrona é constante e não existem perdas de transmissão e distribuição. Estas condições são impossíveis de serem implementadas em um sistema real, porém tentar mitigar perturbações no sistema é seu papel, a fim de melhorar a QEE da rede elétrica. Corrigir o fator de potência para elevação da QEE é um dos aspectos a ser analisado, pois este parâmetro pode influenciar de forma direta no sistema em operação. Um baixo fator de potência pode levar à queda de tensão acentuada, gerando consequências financeiras, devido a investimentos na instalação elétrica e em transformadores e dispositivos de proteção.

Identificar soluções para correção do fp é essencial, e algumas alternativas podem ser listadas:

- Inserção de cargas específicas com elevado consumo de potência ativa.
- Correção do fator de potência através de motores síncronos superexcitados.
- Compensação do sistema com a inserção de capacitores.

No entanto, verificamos que, antes de implementarmos qualquer alternativa para correção do fp, devemos verificar quais são as causas desse baixo fator de potência, podendo ser:

- Motores com pequenas cargas ou superdimensionados.
- Utilização de lâmpadas de baixo rendimento.
- Cargas que possuem alto consumo de reativos.

Avançando na prática

Correção do fator de potência

Descrição da situação-problema

Agora, vamos imaginar que você já detectou quais são os problemas do seu sistema elétrico com relação à qualidade de energia. Foi verificado que é preciso corrigir o fator de potência, porém não se sabe qual será a melhor alternativa a seguir. Existem algumas restrições que devem ser consideradas, sendo:

- Custo baixo de implantação.
- Restrição no aumento do consumo da energia ativa no horário de ponta.
- Cargas que variam bastante ao longo do tempo instaladas no sistema.

Quais são as alternativas existentes para correção do fator de potência?

Como elas atuam no sistema?

Resolução da situação-problema

Existem várias alternativas para a correção do fator de potência, podendo ser listadas a seguir:

- Inserção de cargas com alto fator de potência.
- Inserção de motores síncronos superexcitados no sistema.
- Compensação do sistema com banco de capacitores fixos ligados diretamente ao barramento.
- Compensação do sistema com banco semiautomático de capacitores ligados ou retificados próximos às cargas.
- Compensação do sistema com acionamento automático e independente de um banco de capacitores.

Entre todas as alternativas listadas, algumas não são viáveis devido ao alto custo, como a inserção de motores síncronos e a compensação por acionamento automático e independente de um banco de capacitores. Este acionamento é um dos melhores métodos existentes, pois opera de acordo com as leituras da carga, porém seu custo é o mais elevado.

Outra opção, porém, restrita, devido às cargas variantes no tempo instaladas no sistema, é a inserção de bancos de capacitores fixados diretamente ao barramento.

Entre as alternativas possíveis, podemos utilizar a inserção de cargas específicas para aumento do consumo de potência ativa nos horários fora de ponta do sistema.

Outra opção seria utilizar um sistema com banco semiautomático de capacitores ligados ou retificados próximos às cargas, que atuaria de forma seletiva e robusta, estando próximo à carga.

Faça valer a pena

1. A compensação de reativos por banco de capacitores é realizada para injetar reativos no sistema, melhorando o perfil de tensão, eficiência dos equipamentos e aliviando as cargas instaladas.

O controle de reativos por meio de capacitores pode ser feito de diversas

maneiras. Sobre as maneiras de realizar o controle de reativos por meio de capacitores, analise as afirmativas a seguir:

- I. Inserção de banco fixo de capacitores ligados diretamente ao barramento.
 - II. Inserção de banco semiautomático de capacitores ligados ou retificados próximos às cargas.
 - III. Inserção de cargas específicas com elevado consumo de potência ativa.
 - IV. Acionamento automático e independente de um banco de capacitores.
- Analizando as afirmativas apresentadas, assinale a alternativa correta:

- a) As afirmativas I e III estão corretas.
- b) As afirmativas I, II e IV estão corretas.
- c) As afirmativas III e IV estão corretas.
- d) Apenas a afirmativa IV está correta.
- e) As afirmativas II, III e IV estão corretas.

2. O sistema elétrico operando em condições ideais possui parâmetros preestabelecidos para seu funcionamento. Em um sistema real, é impossível satisfazer estes parâmetros, porém, deve-se atingir em maior ou menor grau de aproximação as condições para se ter um bom funcionamento, dependendo dos controles disponíveis no sistema.

Admitindo-se que o sistema opera em condições ideais, qual parâmetro não se enquadra neste conjunto?

- a) Tensão nominal constante.
- b) Frequência constante.
- c) Harmônicos.
- d) Fator de potência unitário.
- e) Perdas de transmissão e distribuição nulas.

3. O fator de potência (fp) representa quanto o equipamento absorve de potência ativa (P) perante a potência total do sistema (S). Quanto menor o valor de fp , mais baixa é a eficiência dos equipamentos e maior a sobrecarga do sistema elétrico.

O baixo fator de potência causa sérias consequências tanto ao sistema elétrico, quanto ao consumidor. Entre as opções a seguir, qual alternativa não se enquadra em uma consequência do baixo fp :

- a) Acréscimo na conta de energia elétrica, em razão de multa, aos consumidores de alta tensão.
- b) Queda de tensão acentuada.
- c) Maiores investimentos na instalação elétrica.
- d) Adiamento de investimentos na rede elétrica.
- e) Maiores investimentos em transformadores.

Seção 2.3

Programas de conservação de energia

Diálogo aberto

Caro aluno, a utilização de programas de conservação energética influencia no bom funcionamento do sistema de energia elétrica, podendo evitar investimentos na geração, transmissão e distribuição de energia.

Para que você compreenda e assimile este conteúdo, é necessário se colocar em uma situação na qual seja necessária a utilização dos conceitos apresentados nesta disciplina. Imaginaremos que você é o engenheiro chefe que realiza o planejamento energético da sua cidade e deve elaborar um relatório, propondo ações ou medidas para evitar custos adicionais no sistema elétrico de potência e promover a eficiência energética. Considerando isso, algumas questões podem ser levantadas para auxiliar na identificação de medidas, sendo:

- Quais vantagens a redução ou a eliminação do desperdício de energia podem trazer ao sistema de energia elétrica?
- É necessário realizar um diagnóstico energético da sua cidade? Quais etapas devem ser avaliadas neste diagnóstico?
- Existem programas que incentivam a conservação de energia elétrica no país?

Utilize os conceitos apresentados na disciplina, tais como aspectos relacionados ao desperdício de energia, diagnóstico energético e programas de eficiência energética e conservação de energia para auxiliar na elaboração deste relatório.

Caro aluno, você está preparado para elaborar um relatório com medidas e ações de eficiência energética? Espero que você esteja animado para este desafio. Bons estudos e um ótimo trabalho!

Desperdício de energia

O crescimento elevado do consumo de energia gera a necessidade do aumento na sua produção, por meio de processos mais eficientes e da diversificação da matriz energética existente. Uma alternativa para aliviar a demanda de energia elétrica, é através do combate ao desperdício.

Reduzir ou eliminar o desperdício proporciona vários benefícios tanto ao consumidor, quanto às concessionárias de energia. Podem-se enumerar algumas das vantagens que esta alternativa fornece (JÚNIOR, 2005):

- Criar uma cultura de uso racional de energia.
- Reduzir a demanda no horário de ponta.
- Postergar ou reduzir os investimentos na expansão do sistema elétrico.
- Minimizar o impacto ambiental causado pelas instalações de geração, transmissão e distribuição de energia.
- Melhorar as instalações elétricas.



Refleta

A energia desperdiçada no Brasil equivale à produção gerada pela usina hidrelétrica de Itaipu, em capacidade plena. São cerca de R\$ 12,6 bilhões que poderiam ser economizados, aproximadamente 50 mil gigawatts/hora por ano que deixam de ser consumidos (ABESCO, 2015).

Você, aluno, consegue imaginar quantas unidades consumidoras poderiam ser atendidas, eliminando apenas este desperdício energético?

Pode mensurar as vantagens que esta economia traria?

Seria necessário o uso de termelétricas no Brasil, se o uso da energia elétrica fosse otimizado?

Existem duas classes de programas de combate ao desperdício de energia:

- Classe 1: Humana.
- Classe 2: Tecnológica.

Mudança de hábitos de consumo, formação de opinião e qualificação profissional são aspectos considerados da vertente humana. Já a aplicação de novas tecnologias na produção e manutenção de equipamentos são características da vertente tecnológica (SILVA JÚNIOR, 2015).

Entre estas classificações, algumas medidas podem ser adotadas, tais como diagnóstico energético, programas de eficiência energética e conservação de energia e correção do fator de potência.

Diagnóstico energético

O diagnóstico energético permite a implementação das ideias de combate ao desperdício por meio da identificação de oportunidades de redução de perdas, avaliação das alternativas e execução de soluções para redução do consumo de energia ou utilização desta fora dos horários de ponta.

Realizar este diagnóstico envolve uma análise energética de cada local em estudo, conforme a finalidade e a ocupação da instalação, considerando-se as peculiaridades. Pode-se dividir em seis etapas gerais, que compreendem as atividades em análise (PROCEN, 2009):

- Classificação do consumidor e do tipo de tarifação.
- Levantamento do perfil inicial do cliente, por meio de um estudo do consumo.
- Levantamento do horário de maior carga do local.
- Identificação de toda carga instalada, verificando os equipamentos que mais consomem.
- Adequação do consumo.

- Verificação de quais equipamentos apresentam melhor rendimento e a possível substituição.

Com relação à classificação do consumidor e tipo de tarifa utilizada, as unidades consumidoras podem ser classificadas de acordo com o nível de tensão fornecida, podendo ser de baixa tensão ou de alta tensão. Como visto na Seção 2.1, os consumidores de baixa tensão pagam apenas pela energia consumida, ou seja, tarifa monômnia. Já os consumidores de alta tensão se enquadram na tarifa binômnia, ou seja, é cobrado pelo consumo de energia e pela demanda contratada. Esta demanda contratada é a demanda de potência ativa, que deve ser obrigatória e continuamente disponibilizada ao consumidor, conforme contrato firmado (ANEEL, 2010). Três modalidades podem ser escolhidas por este consumidor:

- Tarifação convencional.
- Tarifação horossazonal verde.
- Tarifação horossazonal azul.

Para a modalidade convencional, é cobrada uma única tarifa durante todo dia. Já para a modalidade horossazonal, cobra-se uma tarifa para os horários de ponta e uma tarifa para horários fora de ponta.



Assimile

O horário de ponta é definido e composto por três horas consecutivas, podendo variar de acordo com a concessionária de energia. No caso da AES Eletropaulo é adotado o horário das 17h30 às 20h30.

A tarifa horossazonal azul é destinada aos consumidores que têm alto consumo de energia no horário de ponta, sendo cobrada uma tarifa diferenciada para demanda na ponta e fora de ponta e para o consumo na ponta e fora de ponta (ANEEL, 2010).

A tarifa horossazonal verde é destinada aos consumidores com baixo consumo de energia no horário de ponta, sendo cobrada uma tarifa única para demanda e uma tarifa diferenciada para o consumo na ponta e fora de ponta (ANEEL, 2010).

Após definir em qual modalidade tarifária o consumidor está, é essencial conhecer como e quando o cliente utiliza a energia elétrica, construindo e analisando as curvas de carga por faixa de consumo, para avaliação de medidas ou ações que contribuam para diminuição do consumo e da demanda.

Conservação de energia

No Brasil, vários mecanismos para promoção da conservação de energia foram implementados ao longo dos anos. Em 1984, o **Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE)** foi instituído com o objetivo de racionalizar o uso da energia, informando ao consumidor a respeito da eficiência dos equipamentos elétricos. Os equipamentos aprovados pelo PBE, em níveis de eficiência, utilizam a Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE).



Pesquise mais

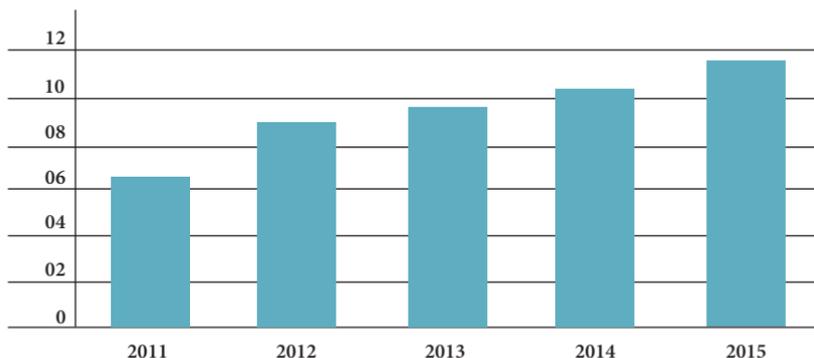
Para saber os aspectos técnicos dos produtos aprovados no PBE, que utilizam a Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE), acesse:

INMETRO. Tabelas de consumo. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/consumidor/tabelas.asp>>. Acesso em: 4 dez. 2016.

Logo em seguida, em 1985, o **Programa de Conservação de Energia Elétrica (Procel)** foi criado, buscando a eficiência energética e incentivando a redução do desperdício de energia elétrica.

No período de 1986 a 2015, o Procel gerou uma economia de energia de cerca de 92,2 bilhões de kWh (PROCEL, 2016), decorrente principalmente das ações do Selo Procel, que estimula à compra de equipamentos mais eficientes. A economia de energia no decorrer de 2011 a 2015 pode ser verificada na Figura 2.3.

Figura 2.3 | Economia de energia decorrente das ações do Procel (bilhões de kWh)



Fonte: adaptada de Procel (2016).

No ano de 2015, os efeitos destas ações resultaram em uma economia de cerca de R\$ 1,6 bilhão que seria necessária à expansão da geração. Esse resultado é bastante expressivo e equivale a aproximadamente 2,5% do consumo total de energia elétrica do país (cerca de 6 milhões de residências) (PROCEL, 2016).

Outros subprogramas são desenvolvidos pelo Procel, além do Selo Procel, tendo enfoque em outras áreas. Para a eficiência energética do saneamento ambiental, existe o Procel Sanear, para gestão energética, o Procel GEM, para informação e cidadania, o Procel Educação, para indústria, o Procel Indústria, para eficiência de edificações, o Procel Edifica, para iluminação pública, o Procel Reluz, para prédios públicos, o Procel ERP, e para informações em geral sobre eficiência energética, o Procel Info (PROCEL, 2016a).

Em 1991, implementou-se o **Programa Nacional para Uso Racional de Derivados de Petróleo e Gás Natural (CONPET)**, com o intuito de promover o uso racional dos recursos naturais não renováveis. Devido às ações deste programa foram economizados mais de 1 bilhão de litros de óleo diesel, equivalente a não emissão de 2,7 milhões de toneladas de CO₂, e cerca de 6 milhões de metros cúbicos de gás natural (NASCIMENTO, 2015).

Outras ações foram enfatizadas a partir de 2000, estabelecendo-se leis de eficiência energética, sendo:

- **Lei nº 9.991/2000**, que estabelece investimentos para pesquisa e desenvolvimento visando à eficiência energética.
- **Lei nº 10.295/2001**, que dispõe sobre a conservação e uso racional de energia.
- **Portaria Interministerial nº 1.007/2010**, que estabelece níveis máximos de consumo de energia ou mínimos de eficiência energética.

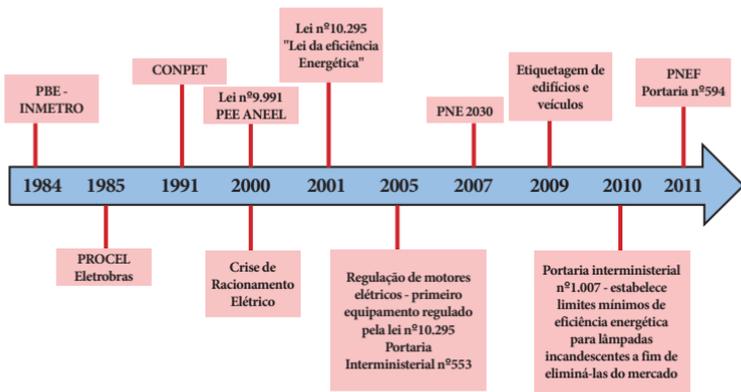
Outras medidas foram implementadas ainda em 2007. O primeiro documento oficial de planejamento energético integrado foi criado, nomeado de **Plano Nacional de Energia 2030 (PNE 2030)**.

O PNE 2030 analisa as perspectivas da economia mundial e brasileira no longo prazo, verificando a disponibilidade dos recursos energéticos, a segurança do suprimento da energia, os aspectos socioambientais com relação à expansão da oferta, do desenvolvimento tecnológico e da eficiência energética (EPE, 2008).

Outra ação governamental utilizada foi o **Plano Nacional de Eficiência Energética (PNEF)**, criado em 2011, com o objetivo de promover ações estruturadas para atingir metas de eficiência energética a longo prazo.

O resumo dos principais marcos citados podem ser vistos na Figura 2.4.

Figura 2.4 | Principais políticas de eficiência energética no Brasil (1984 a 2011)



Fonte: EPE (2014).

Correção do fator de potência

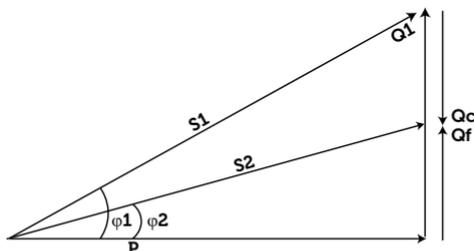
Na Seção 2.2, vimos como é importante a correção do fator de potência (fp), pois o baixo valor do fp representa uma baixa eficiência das cargas instaladas e uma sobrecarga para o sistema elétrico.

Existem várias formas para corrigir o fp, porém será verificado nesta seção como a utilização de capacitores auxilia neste caso. Pode-se citar quatro formas de correção do fator de potência através de capacitores, sendo (GEDRA et al., 2014):

- **Correção na entrada de energia em alta tensão:** este tipo de correção só corrige o fp visto pela distribuidora de energia.
- **Correção na entrada de energia em baixa tensão:** é utilizada esta correção em instalações elétricas com elevado número de cargas com potências nominais diferentes e regimes de utilização pouco uniformes.
- **Correção por grupo de cargas:** é utilizado para corrigir o fp de um pequeno conjunto de cargas.
- **Correção localizada:** é instalado junto à carga que se deseja corrigir o fp.

Para dimensionar os capacitores que serão utilizados, a análise do triângulo de potências é essencial. A Figura 2.5 mostra o triângulo de potência com compensação por banco de capacitores. Neste caso, o capacitor fornece a potência reativa Q_c , a potência ativa P é mantida constante, a potência reativa resultante é a Q_f , correspondente à potência compensada e a potência aparente final é representada por S_2 .

Figura 2.5 | Triângulo de potência



Fonte: Gedra et al. (2014).

É importante enfatizar que, quanto menor o ângulo entre a potência ativa e a potência reativa, menores são as perdas de energia e maior a eficiência do sistema.

Sendo assim, podem-se extrair as seguintes equações com base na Figura 2.5:

$$\begin{aligned}Q1 &= P * tg\varphi_1 \\Qf &= P * tg\varphi_2 \\Qc &= Q1 - Qf \\fp &= \cos \varphi\end{aligned}$$

Onde:

Q1 – potência reativa da rede antes da instalação dos capacitores.

Qf – potência reativa da rede depois da instalação dos capacitores.

Qc – potência do capacitor a ser instalado.

φ_1 – ângulo do fp original.

φ_2 – ângulo do fp pretendido.

P – potência ativa.



Exemplificando

Para entendermos como funciona o cálculo de dimensionamento de capacitores, imagine que em uma indústria exista uma carga instalada de 2.000 kW e que o fator de potência é igual a 0,8 (indutivo). Deseja-se que o fator de potência atinja o valor 0,92.

Para isto, é necessário calcular o valor do ângulo de fp,

$$\begin{aligned}fp &= \cos \varphi \\ \varphi &= \arccos(fp) \\ \varphi_1 &= 36,87^\circ \\ \varphi_2 &= 23,07^\circ\end{aligned}$$

Logo após, pode-se calcular a potência reativa:

$$Q_c = 2000 * (tg(36,87^\circ) - tg(23,07^\circ)) = 648,2kVAr$$

Considerando bancos de capacitores de 50kVAr, temos:

$$C = \frac{648,2}{50} = 12,96 = 13$$

$$Q_c = 13 * 50 = 650kVAr$$

Sem medo de errar

Retomando à situação-problema descrita no item *Diálogo aberto* desta seção, verificamos que os conceitos referentes à conservação de energia envolvem aspectos tanto do comportamento humano como da inserção de novas tecnologias.

Para desempenhar seu papel de engenheiro chefe e conseguir elaborar seu relatório visando uma eficiência energética e uso racional, é necessário primeiramente conhecer o seu sistema de energia elétrica, elaborando um diagnóstico energético.

Para elaboração deste diagnóstico energético, é necessário analisar as peculiaridades do local em estudo e, para isto, você poderá seguir etapas gerais, sendo, a classificação do consumidor e do tipo de tarifação, levantamento do perfil inicial do cliente, identificação de toda carga instalada, adequação do consumo, verificação dos equipamentos que apresentam melhor rendimento e identificação de possíveis substituições de cargas instaladas.

Com base nos dados obtidos do diagnóstico, você, aluno, poderá avaliar qual é a melhor medida ou ação que contribuirá para a diminuição do consumo e da demanda, evitando o desperdício energético.

Estas medidas ou ações implementadas poderão trazer várias vantagens, tais como redução na demanda no horário de ponta, desenvolvimento de uma cultura de uso racional de energia e minimização do impacto ambiental causado pelas instalações de

geração, transmissão e distribuição de energia.

Para auxiliar na decisão de qual medida tomar, políticas públicas foram promovidas visando incentivar ações de conservação de energia. Desde 1984, programas foram desenvolvidos, sendo eles:

- Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE).
- Programa de Conservação de Energia Elétrica (Procel).
- Programa Nacional de Uso Racional de Derivados de Petróleo e Gás Natural (CONPET).
- Lei nº 9.991/2000.
- Lei nº 10.295/2001.
- Portaria Interministerial nº 1.007/2010.
- Plano Nacional de Energia 2030 (PNE 2030).
- Plano Nacional de Eficiência Energética (PNEF).

Analisar cada peculiaridade dos programas e verificar qual se enquadra no seu planejamento é vital para resultados positivos na eficiência e racionalização da energia em sua região.

Avançando na prática

Dimensionamento de banco de capacitores

Descrição da situação-problema

Após prever quais medidas devem ser tomadas para eficiência energética e uso racional em seu planejamento energético regional, conclui-se que ações corretivas que promovam a correção do fator de potência (fp) devem ser estabelecidas, a fim de melhorar os níveis do fator de potência.

Definindo que utilizaremos banco de capacitores para melhorar o fp e sabendo que em uma indústria da região o fp está muito abaixo do permitido, 0,85 (indutivo), devemos obter um valor de fp que esteja fixo em 0,92 (valor permitido), sendo o valor da carga instalada de 2.500 kW. Como devemos estabelecer os critérios para dimensionamento

dos bancos de capacitores?

Resolução da situação-problema

Primeiramente, devemos estabelecer as equações a serem utilizadas.

$$Ql = P * tg\varphi_1$$

$$Qf = P * tg\varphi_2$$

$$Qc = Ql - Qf$$

$$fp = \cos \varphi$$

Obtemos todos os dados necessários para os cálculos no enunciado, sendo:

$$fp1 = 0,85$$

$$fp2 = 0,92$$

$$P = 2500$$

Portanto:

$$\cos \varphi_1 = 31,79^\circ$$

$$\cos \varphi_2 = 23,07^\circ$$

$$Qc = 2500 * (tg(31,79^\circ) - tg(23,07^\circ))$$

$$Qc = 484,67kVAr$$

Considerando bancos de capacitores de 50kVAr, têm-se

$$C = \frac{484,67}{50} = 9,69 = 10$$

$$Qc = 10 * 50 = 500kVAr$$

Por fim, um banco de capacitor com 10 unidades de 50kVAr cada serão instalados para correção do fp, para aumento do consumo de potência ativa nos horários fora de ponta do sistema.

Outra opção seria utilizar um sistema com banco semiautomático de capacitores ligados ou retificados próximos às cargas, que atuaria de forma seletiva e robusta, estando próximo à carga.

Faça valer a pena

1. Em razão do crescimento acentuado no consumo de energia elétrica, aumentou-se a necessidade de promover processos mais eficientes e diversificar a matriz energética para suprimento seguro da energia. Medidas voltadas à redução ou à eliminação do desperdício são alternativas para aliviar a demanda.

Tais medidas fornecem vantagens tanto ao consumidor quanto às concessionárias de energia. Qual das alternativas a seguir não se enquadra nas vantagens fornecidas?

- a) Redução dos investimentos na expansão do sistema elétrico.
- b) Incentivo a investimentos no sistema de geração, transmissão e distribuição de energia.
- c) Redução da demanda no horário de ponta.
- d) Aumento da capacidade das instalações elétricas.
- e) Diminuição do impacto ambiental causado pelos sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia.

2. A implementação de medidas de combate ao desperdício de energia é realizada a partir da elaboração de um diagnóstico energético, por meio da avaliação das alternativas que melhor se adequam ao sistema e execução de soluções para redução do consumo de energia ou utilização desta fora dos horários de ponta.

O diagnóstico energético pode ser dividido em etapas gerais, compreendem estas etapas as seguintes afirmativas:

- I. Classificação do consumidor.
- II. Definição do perfil inicial do cliente.
- III. Identificação de toda carga instalada.
- IV. Adequação do consumo energético.
- V. Verificação de quais equipamentos possuem melhor rendimento.

Analisando as afirmativas, escolha a alternativa correta:

- a) Apenas a afirmativa I está correta.
- b) Apenas as afirmativas I, II e III estão corretas.
- c) Apenas a afirmativa III está correta.
- d) Apenas as afirmativas II, III e IV estão corretas.
- e) As afirmativas I, II, III, IV e V estão corretas.

3. Políticas públicas, mecanismos de incentivos e ações voltadas à eficiência energética são essenciais para melhoria do sistema elétrico como um todo. No Brasil, desde 1984, programas promovendo o uso racional e eficiente são implementados e têm fornecido resultados positivos ao país. Um dos programas mais conhecidos no país é o Procel, criado em 1986. Existem vários subprogramas desenvolvidos pelo Procel. Qual alternativa não faz parte do Procel?

- a) Procel ERP.
- b) Procel Reluz.
- c) Procel Edifica.
- d) Procel GEM.
- e) Procel CONPET.

Referências

ABESCO – Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Conservação de Energia. **Desperdício de energia gera perdas de R\$12,6 bilhões**. Disponível em: <<http://www.abesco.com.br/pt/novidade/desperdicio-de-energia-gera-perdas-de-r-126-bilhoes/>>. Acesso em: 30 nov. 2016.

ABNT - Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR 5410**: Instalações elétricas de baixa tensão. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. Disponível em: <http://www.iar.unicamp.br/lab/luz/ld/normas%20e%20relat%F3rios/NRs/nbr_5410.pdf>. Acesso em: 9 jan. 2017.

_____. **NBR 14039**: Instalações elétricas de média tensão de 1 kV a 36,2 kV. Rio de Janeiro: ABNT, 2003. Disponível em: <https://www.inesul.edu.br/site/documentos/instalacoes_eletricas_residenciais/normas/nbr_14039_instalacoes_eletricas_media_tensao.pdf>. Acesso em: 9 jan. 2017.

AFONSO, J. L.; MARTINS, J. Qualidade da energia elétrica. **Revista o Eletricista**, n. 9, p. 66-71, 2014.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Módulo 8 – Qualidade da energia elétrica**. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST). Brasília, 2016. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/modulo8_revisao_1_retificacao_1.pdf>. Acesso em: 9 jan. 2017.

_____. **Nota Técnica nº 0083/2012**. Brasília, 2012. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2012/065/documento/nota_tecnica_0083_daniel_dir.pdf>. Acesso em: 9 jan. 2017.

_____. **Resolução Normativa no 414**, de 9 de setembro de 2010, Brasília, DF, 2010. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/documents/656877/14486448/bren2010414.pdf/3bd33297-26f9-4ddf-94c3-f01d76d6f14a?version=1.0>>. Acesso em: 9 jan. 2017.

_____. **Indicadores coletivos de continuidade**: DEC e FEC. 2016. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/indicadores-coletivos-de-continuidade>>. Acesso em: 23 nov. 2016.

ANICETO, D. M. Importância da correção do fator de potência nas instalações elétricas industriais. **Revista on-line IPOG**, 11. ed. v. 1. 2016.

BRASIL. **Portaria Interministerial nº 1.007**, de 31 de dezembro de 2010. Ministério de Minas e Energia, 2010. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/10584/904396/Portaria_interministerial+1007+de+31-12-2010+Publicado+no+DOU+de+06-01-2011/d94edaad-5e85-45de-b002-f3ebe91d51d1?version=1.1>. Acesso em: 9 jan. 2017.

_____. **Lei nº 10.295**, de 17 de outubro de 2001. Dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia e dá outras providências. 2001. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/LEIS_2001/L10295.htm>. Acesso em: 9 jan. 2017.

_____. **Lei nº 9.991**, de 24 de julho de 2000. Dispõe sobre a realização de investimentos em pesquisa e desenvolvimento e em eficiência energética por parte das empresas

concessionárias, permissionárias e autorizadas do setor de energia elétrica, e dá outras providências. 2000. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9991.htm>. Acesso em: 9 jan. 2017.

CAIRES, L. E. **Aplicação de redes inteligentes nas instalações elétricas residenciais**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2012.

CONPET – Programa Nacional de racionalização do uso de derivados de petróleo e do gás natural. Disponível em: <<http://www.conpet.gov.br/>>. Acesso em: 1 dez. 2016.

COPEL. **Guia de segurança nas instalações elétricas**. [S.l: s.n, s.d.]. Disponível em: <[http://www.copel.com/hpcopel/root/sitearquivos2.nsf/arquivos/dicas_de_seguranca_nas_instalacoes_eletricas/\\$FILE/pdf_seguranca.pdf](http://www.copel.com/hpcopel/root/sitearquivos2.nsf/arquivos/dicas_de_seguranca_nas_instalacoes_eletricas/$FILE/pdf_seguranca.pdf)>. Acesso em: 14 nov. 2016.

_____. **Tipos de lâmpadas**. Disponível em: <<http://www.copel.com/hpcopel/root/nivel2.jsp?endereco=%2Fhpcopel%2Froot%2Fpagcopel2.nsf%2F5d546c6fdeabc9a132571000064b22e%2F423c114f77e78e81032573f7004b2e92>>. Acesso em: 27 fev. 2017.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Consumo de Energia no Brasil**. Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/S%C3%A9rie%20Estudos%20de%20Energia/DEA%2010-14%20Consumo%20de%20Energia%20no%20Brasil.pdf>>. Acesso em: 9 jan. 2017.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Nacional de Energia – 2030**. Rio de Janeiro, 2008. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/PNE/20080111_1.pdf>. Acesso em: 9 jan. 2017.

GEDRA, R. L. et al. **Geração, transmissão, distribuição e consumo de energia elétrica**. São Paulo: Érica, 2014.

INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. Programa **Etiqueta de eficiência energética**. Disponível em: <http://www2.inmetro.gov.br/pbe/a_etiqueta.php>. Acesso em: 3 dez. 2016.

NASCIMENTO, R. L. **Política de eficiência energética no Brasil**. Brasília: Consultoria Legislativa, 2015. Disponível em: <http://www2.camara.leg.br/documentos-e-pesquisa/publicacoes/estnottec/areas-da-conle/tema16/2015_21113_politica-de-eficiencia-energetica-no-brasil_rodrigo-limp>. Acesso em: 9 jan. 2017.

PINTO, M. **Energia elétrica: geração, transmissão e sistemas interligados**. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

POMILIO, J. A.; DECKAMNN, S. M. **Condicionamento da energia elétrica e dispositivos FACTS**. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2009.

PROCEL – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica. **O Programa**. Disponível em: <<http://www.procelinfo.com.br/main.asp?TeamID=%7B921E566A-536B-4582-AEAF-7D6CD1DF1AFD%7D>>. Acesso em: 10 nov. 2016.

_____. **Relatório de Resultados do Procel 2016 – ano base 2015**. Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: <<http://www.procelinfo.com.br/main.asp?View=%7B5A08CAF0-06D1-4FFE-B335-95D83F8DFB98%7D&Team=%7B5D1DDC41-4210-40A5-B2FC>>

F4DDFB05A7B2%7D;&UIPartUID=%7B05734935-6950-4E3F-A182-629352E9EB18%7D>. Acesso em: 9 jan. 2017.

PROCEN. **Metodologia de realização de diagnóstico energético**. Rio de Janeiro, 2009. Disponível em: <<http://www.procen.ufc.br/wp-content/uploads/Metodologia-de-Diagn%C3%B3stico-Energ%C3%A9tico-vers%C3%A3o-2.pdf>>. Acesso em: 9 jan. 2017.

RODRIGUES, R. P. **Reconhecimento de cargas elétricas monofásicas não lineares através da decomposição wavelet e de redes neurais artificiais**. Itajubá: Universidade Federal de Itajubá, 2009.

SILVA JÚNIOR, J. P. **Combate ao desperdício de energia**. Juiz de Fora: Universidade Federal de Juiz de Fora, 2005.

VIANA, A. N. C. et al. **Eficiência energética**: fundamentos e aplicações. Itajubá: Elektro, 2012.

Falhas e distúrbios do sistema elétrico e sua identificação

Convite ao estudo

Caro aluno, nesta unidade daremos continuidade à Unidade 2, em que estudamos a análise dos sistemas elétricos e a conservação de energia. Nos aprofundaremos no estudo das falhas e distúrbios no sistema elétrico.

Na primeira seção, estudaremos os aspectos gerais relacionados à Qualidade da Energia Elétrica (QEE), verificando como as características das cargas instaladas no sistema afetam a QEE, e analisaremos os principais distúrbios e falhas de tensão, entre eles, a cintilação (*flicker*) e a cunha de tensão (*voltage notch*). Na segunda seção, continuaremos estudando sobre os distúrbios no sistema, analisando o desequilíbrio de tensão (*imbalance*), elevação de tensão (*voltage swell*) e sobretensão (*overvoltage*), afundamentos de tensão (*voltage sag*) e subtensão (*undervoltage*), picos de tensão (*spikes*), ruído (*noise*) e como estes efeitos atuam no sistema elétrico. Por fim, na última seção, serão estudados os índices e os indicadores de qualidade da energia elétrica e os aspectos relevantes sobre harmônicos, interferência eletromagnética e o ruído de modo comum.

Retomando o contexto de aprendizagem, você, aluno, é o engenheiro chefe de uma concessionária de energia elétrica, responsável pela qualidade da energia fornecida, e vai se envolver em várias tarefas que vão demandar uma visão dos conceitos relacionados à QEE.

Portanto, temos como objetivo dessa unidade, que você possa identificar as falhas e os distúrbios no sistema elétrico e averiguar como eles afetam a qualidade do fornecimento da energia elétrica.

Dentro deste contexto, você poderá utilizar os conceitos e os aspectos estudados para tomadas de decisão relacionados à qualidade da energia, levando em consideração as interrupções de energia e os fatores que afetam a degradação da qualidade do fornecimento da energia elétrica. Nesse sentido, com o andamento das seções, você estará preparado para gerenciar ações e identificar quais são os principais fatores que afetam a QEE.

Seção 3.1

Qualidade da energia

Diálogo aberto

Caro aluno, a identificação de falhas e distúrbios do sistema elétrico auxiliam para o bom desempenho do sistema de energia, influenciando na continuidade do fornecimento da energia, na vida útil dos equipamentos, no nível de tensão, na frequência, entre outros aspectos.

Sendo assim, é necessário que você assimile e compreenda este conteúdo, e a melhor forma para que isso ocorra é se colocando em uma situação em que seja necessária a utilização dos conceitos aprendidos. Então, imaginaremos que você é o engenheiro responsável pelos relatórios, abordando a qualidade do fornecimento da energia da concessionária em que trabalha, identificando as falhas do sistema e os distúrbios que podem ocorrer e como as cargas instaladas influenciam.

Assim, elabore um relatório que aborde o modo como as cargas utilizadas atualmente no sistema elétrico influenciam na qualidade da energia elétrica. Quais as falhas que podem ocorrer no sistema e como elas podem ser classificadas? Indique se a localização das faltas interfere no número de consumidores afetados e quais os tipos de distúrbios que afetam o sistema.

Utilize os conceitos apresentados na disciplina, como a evolução das cargas elétricas, as falhas de tensão no sistema elétrico e os distúrbios de tensão no sistema elétrico para auxiliar na elaboração deste relatório.

Caro aluno, você está preparado para identificar quais fatores afetam a qualidade da energia elétrica da concessionária em que trabalha? Espero que você esteja animado para este desafio. Bons estudos e um ótimo trabalho!

Evolução das cargas elétricas

Com a evolução das cargas elétricas, devido ao desenvolvimento das tecnologias utilizadas, da eletrônica de potência, entre outros fatores, as suas características mudaram, como estudado na Unidade 2 sobre análise de sistemas elétricos e conservação de energia, tornando os equipamentos mais eficientes, melhorando o rendimento, o custo e agregando novas funções, antes restritas por conta da tecnologia disponível.

Muitas foram as vantagens obtidas com a inserção destas cargas, porém, por conta da característica não linear destes dispositivos, novas preocupações surgiram com relação à qualidade do fornecimento da energia elétrica. As principais preocupações foram ocasionadas pelos seguintes motivos (MAIA, 2011):

- Os componentes dos equipamentos atuais os tornaram mais sensíveis à qualidade do fornecimento da energia elétrica.
- Aumento da utilização de cargas de natureza intrinsecamente perturbadora e o crescimento no uso de equipamentos que proporcionam maior eficiência energética, porém, que causam degradação à qualidade da energia.
- Crescente instalação de cargas com relação tensão-corrente não linear nos setores comercial, residencial e industrial, que provocam aumento significativo da ocorrência de distúrbios nas formas de onda da tensão e corrente nos sistemas de distribuição.
- Aspectos econômicos relacionados ao suporte da qualidade da energia e grau de imunidade de dispositivos. Este fator está relacionado com o custo extra devido à necessidade de manutenção, substituição precoce dos equipamentos e prejuízos relacionados à parada de funcionamento dos dispositivos em processos produtivos, devido à energia degradada ou de má qualidade.

Diante deste contexto, o foco da QEE mudou e passou a não se limitar apenas à continuidade no fornecimento da energia elétrica, mas também a verificar sete aspectos gerais, a saber (ANEEL, 2016):

- Tensão em regime permanente.
- Fator de potência.
- Harmônicos.
- Desequilíbrio de tensão.
- Flutuação de tensão.
- Variações de tensão de curta duração (VTCD).
- Variação de frequência.

A análise e o detalhamento destes aspectos serão realizados no decorrer desta unidade.



Refleta

Os equipamentos que utilizam eletrônica de potência, caracterizados por sua não linearidade, trouxeram diversas vantagens ao sistema elétrico e também ao consumidor final, por serem cargas mais eficientes e disporem de uma série de funções, antes restritas, para auxiliar tanto no setor residencial e comercial quanto no industrial. No entanto, desvantagens também são ocasionadas no sistema por conta de utilização destes dispositivos, causando sérios problemas à qualidade da energia.

Você, aluno, consegue imaginar sua vida sem a utilização de cargas não lineares, como computadores, televisores ou mesmo condicionadores de ar? Ou ainda, consegue imaginar que perturbações no sistema, devido a estas cargas, podem ocasionar a perda de dados do seu computador ou a substituição de algum destes equipamentos por conta da degradação da energia fornecida?

Refleta sobre isso. Em razão destes fatores, devemos analisar não só a continuidade do fornecimento da tensão, a análise de todos os outros aspectos do fornecimento da tensão que são ocasionados por estas cargas sensíveis é necessária.

Falhas de tensão no sistema elétrico

O sistema elétrico está suscetível a falhas, que podem comprometer a qualidade da energia ou mesmo causar a interrupção do fornecimento. Estas falhas ou faltas podem ser temporárias ou permanentes. Faltas temporárias são caracterizadas pela duração limitada ao período de religamento do serviço por operação automática do equipamento de proteção que desligou o circuito ou parte dele (SOUZA, 2008). Faltas permanentes são todas as interrupções que não podem ser restabelecidas automaticamente, necessitando de intervenção humana para voltar à condição normal de operação (ARGENTA, 2013).

Estas faltas são causadas pelos principais fatores (SOUZA, 2008):

- Ação de descargas atmosféricas.
- Contatos de árvores e animais ao sistema elétrico.
- Falhas de equipamento.
- Erro humano.

Podemos ainda classificar as faltas de acordo com o tipo, podendo ser: trifásicas (FFF), trifásicas à terra (FFFT), bifásicas (FF), bifásicas à terra (FFT) ou monofásicas (FT). As faltas trifásicas, ou ditas simétricas, são as mais severas com relação à tensão no sistema, porém, ocorrem em menor frequência. Já, as faltas bifásicas e monofásicas, ou ditas assimétricas, são as mais frequentes. A seguir, é possível verificar a incidência de cada um dos tipos de falta.

Tabela 3.1 | Probabilidade de tipos de falta

| Faltas | % | Permanentes (%) | Temporárias (%) |
|--------------------|----|-----------------|-----------------|
| <i>Trifásicas</i> | 2 | 95 | 5 |
| <i>Bifásicas</i> | 11 | 70 | 30 |
| <i>Monofásicas</i> | 79 | 20 | 80 |

Fonte: adaptado de Guiguer (1988).

Outra questão importante para análise das faltas no sistema elétrico é a localização. Faltas localizadas no sistema de transmissão afetam um maior número de consumidores, quando comparadas às faltas ocorridas no sistema de distribuição (ARGENTA, 2013). Isso

ocorre devido à característica do sistema: sistemas distribuídos são radiais, já sistemas de transmissão são malhados.



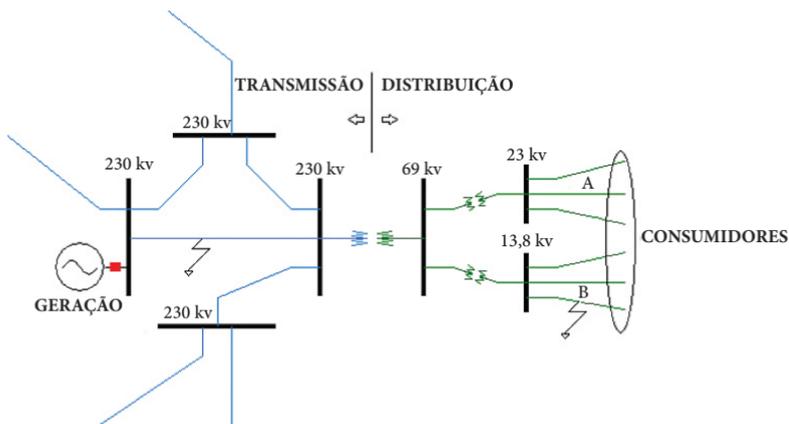
Exemplificando

Para averiguar como a falta afeta o sistema de distribuição e transmissão, analisaremos a Figura 3.1. Neste exemplo ilustrando o sistema elétrico, ocorre uma falta no ponto A e outra no ponto B.

Observando a figura, percebemos que, no ponto de falta A, um número maior de consumidores é afetado, devido à configuração malhada do sistema de transmissão e por este sistema atingir uma maior área geográfica.

Já no ponto B de falta, um número menor de consumidores é afetado, devido às características radiais do sistema de distribuição e por ele atingir uma menor área geográfica.

Figura 3.1 | Falhas no sistema de transmissão e distribuição



Fonte: adaptada de Argenta (2013).

Distúrbios de tensão no sistema elétrico

Como analisado anteriormente, o sistema elétrico está passível às faltas ou às falhas, que podem causar interrupções no fornecimento de energia e afetar a qualidade da energia (QEE). Com relação à QEE, os distúrbios ocorridos, devido à variação da tensão, correspondem ao conjunto de distúrbios mais graves, afetando os equipamentos ligados à rede (LIMA; MINUSSI, 2012).

Os distúrbios causados no sistema podem ser classificados como:

- Transitórios, podendo ser impulsivos ou oscilatórios.
- Variação de curta duração, podendo ser interrupções, afundamentos de tensão ou elevação de tensão.
- Variação de longa duração, podendo ser interrupções sustentadas, afundamentos sustentados (subtensão) ou elevações sustentadas (sobretensão).
- Desequilíbrio de tensão.
- Distorções na forma de onda, podendo ser de nível CC, harmônicos, inter-harmônicos, cunha de tensão ou ruídos.
- Flutuação de tensão.
- Variações de frequência no sistema.



Pesquise mais

Para obter mais informações sobre as características dos distúrbios no sistema elétrico, acesse os links:

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Módulo 8:** Qualidade da energia. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/modulo8_revisao_1_retificacao_1.pdf>. Acesso em: 23 dez. 2016.

ROSS, R. P. et al. **Definição das metodologias e procedimentos necessários às campanhas de medição dos indicadores de desempenho.** Disponível em: <http://www.ons.org.br/download/administracao_transmissao/engenharia_transmissao/ONSRE028-2005-RelatorioCampanhas_Rev4.pdf>. Acesso em: 23 dez. 2016.

Entre estes distúrbios apresentados, que serão analisados no decorrer das seções desta unidade, o distúrbio de tensão atua principalmente nas variações de curta duração na magnitude de tensão.

Verificaremos a seguir como a cintilação ou *flicker* (efeito da flutuação da tensão) e a cunha de tensão ou *voltage notch* atuam no sistema.

Cintilação (*flicker*)

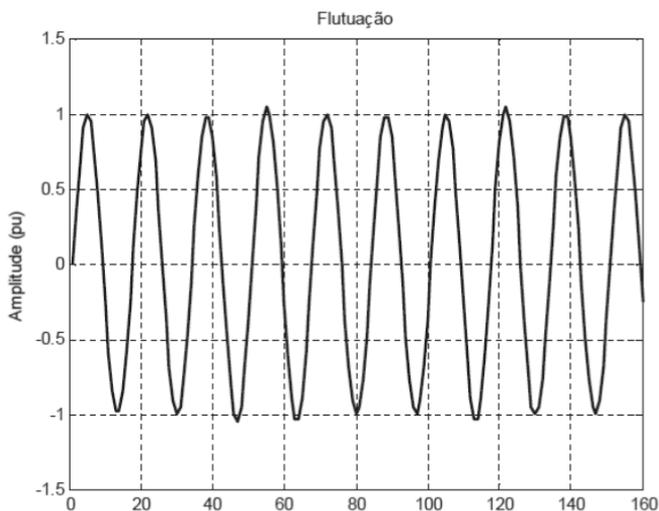
A cintilação ou efeito *flicker* é a resposta do sistema às flutuações de tensão. Estas oscilações de tensão ocorrem não por variações instantâneas, mas devido a uma variação sistemática (periódica) ou a uma série de mudanças no perfil de tensão. Tal oscilação não excede o limite permitido da magnitude da tensão, entre 0,95 e 1,05, e pode ocorrer como flutuações aleatórias, repetitivas ou esporádicas (CARVALHO, 1997).

As principais causas da alteração no perfil de tensão são (KERN, 2008):

- Fornos a arco, causando flutuações aleatórias.
- Máquinas de solda, causando flutuações repetitivas.
- Partida de grandes motores, causando flutuações esporádicas.

A partir da Figura 3.2, é possível verificar como a flutuação do valor eficaz da tensão ocorre no sistema por meio da alteração da amplitude da onda em função do tempo.

Figura 3.2 | Flutuação de tensão



Fonte: adaptada de Kern (2008).

O efeito *flicker* pode ser definido, então, por meio das variações no fluxo luminoso, devido ao impacto da oscilação do perfil de tensão, sendo que estas variações são perceptíveis ao olho humano e causam desconforto visual.



Assimile

É importante salientar que cintilação (*flicker*) e flutuações de tensão não possuem a mesma definição.

Flutuação de tensão é a resposta do sistema aos impactos das variações no perfil de tensão, e a cintilação (*flicker*) é um dos efeitos deste fenômeno, sendo conceituado como o impacto da flutuação da tensão na intensidade luminosa (SARMANHO, 2005).

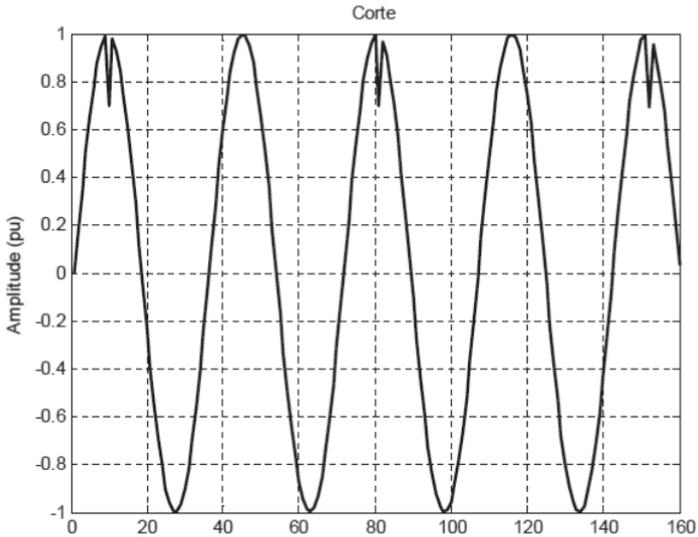
Algumas medidas podem ser tomadas para eliminar ou reduzir este efeito, a saber (REGAGNIN, 2012):

- Instalação de compensadores séries, que reduziram os efeitos da queda de tensão provocadas pelas elevadas correntes provenientes de equipamentos, como o forno a arco.
- Instalação de compensadores síncronos, que atenuariam os efeitos das quedas de tensão no sistema.

Cunha de tensão (*Voltage notch*)

Cunha de tensão ou *voltage notch* é a transição sucessiva e brusca de tensão, que causa cortes periódicos na forma de onda deste componente. Este fenômeno ocorre devido à utilização de conversores de energia trifásicos, que provocam curto-circuito momentâneo entre fases, e pela operação normal de equipamentos de eletrônica de potência, que comutam a corrente do sistema de uma fase à outra (MALANGE, 2010). A Figura 3.3 representa como o efeito da cunha de tensão se manifesta no sistema.

Figura 3.3 | Efeito da cunha de tensão ou voltage notch



Fonte: adaptada de Kern (2008).

Medidas podem ser tomadas para evitar ou reduzir o efeito da cunha de tensão, sendo elas a separação das cargas dos circuitos do sistema elétrico e a substituição de equipamentos mais sensíveis por robustos. Desta forma, é possível mitigar a perda de dados digitais, o impacto econômico por parada de produção e evitar a má operação de equipamentos sensíveis no sistema (MALANGE, 2010).

Sem medo de errar

Retomando a situação-problema descrita no item *Diálogo aberto* desta seção, verificamos que os conceitos referentes à identificação de falhas e distúrbios no sistema de energia elétrica envolvem vários aspectos que influenciam na qualidade da energia.

Para elaborar seu relatório sobre os aspectos que influenciam na qualidade da energia, desempenhando seu papel de engenheiro responsável por esta ação, primeiramente é necessário identificar quais fatores devem ser analisados com relação à QEE e qual a motivação para esta análise.

Com base nas informações estudadas, é possível definir que a principal motivação para verificar quais fatores afetam a qualidade da energia está relacionada às cargas instaladas no sistema. Por estas cargas possuírem características não lineares, elas são mais suscetíveis às oscilações de tensões no sistema e também são as principais motivadoras das perturbações no sistema elétrico, sendo necessária uma maior preocupação com a qualidade da energia.

Desta forma, os aspectos em análise da qualidade do fornecimento da energia vão além da continuidade, averiguando também o fator de potência, os harmônicos, o desequilíbrio de tensão, a flutuação de tensão, as variações de tensão de curta duração e as variações de frequências.

Após a primeira etapa finalizada, é necessário verificar como as falhas podem comprometer a QEE. Analisamos que as falhas ou faltas que ocorrem no sistema são causadas por ação de descargas atmosféricas, contatos de árvores e animais ao sistema elétrico, falhas de equipamento, erro humano, entre outros, sendo assim, o sistema elétrico está passível a este efeito.

Para mitigar os efeitos destas falhas, é necessário classificar como elas atuam, pois, a partir do tipo da falta, podemos analisar o quanto é severa. Portanto, a partir dos conceitos aprendidos, identificamos como faltas mais graves as faltas trifásicas, podendo ser: trifásicas (FFF) ou trifásicas à terra (FFFT), e como faltas menos severas as faltas bifásicas (FF), bifásicas à terra (FFT) ou monofásicas (FT), ocorrendo em maior frequência.

Outra questão que deve ser analisada é quanto à localização da falta. As faltas na linha de transmissão afetam um maior número de consumidores devido à configuração malhada, e as faltas na linha de distribuição afetam um menor número devido à característica radial do sistema.

Por fim, é necessário definir e averiguar quais distúrbios podem afetar o sistema. Identificamos os principais, podendo ser transitórios, com variação de curta duração, variação de longa duração, desequilíbrio de tensão, distorções na forma de onda, flutuação de tensão e variações de frequência no sistema.

A análise de cada um destes aspectos é essencial para a verificação dos fatores que influenciam na qualidade da energia de uma concessionária.

Avançando na prática

Distúrbios do sistema elétrico

Descrição da situação-problema

Agora, vamos imaginar que você já detectou quais são os principais distúrbios que ocorrem no sistema elétrico de sua região. Foi verificado que existem dois, sendo eles, a flutuação de tensão e a cunha de tensão.

Como estes distúrbios afetam a qualidade da energia?

Quais são as causas destes distúrbios?

Existem opções para evitar ou reduzir estes distúrbios no sistema elétrico?

Resolução da situação-problema

O primeiro distúrbio em análise, as flutuações de tensão são causadas principalmente por fornos a arco, máquinas de solda e partida de grandes motores, em suma, por cargas que demandam grande potência de energia, resultando em variações sistemáticas ou séries de mudanças no perfil de tensão, normalmente, não excedendo o limite permitido de tensão (entre 0,95 e 1,05).

O principal efeito causado por estas flutuações de tensão são as cintilações ou *flicker*. O *flicker* pode ser identificado pela cintilação no fluxo luminoso de lâmpadas, que é ocasionado por mudanças nos níveis de tensão. Este efeito é desconfortável, sendo perceptível ao olho humano. Para mitigar ou eliminar este efeito, pode-se instalar compensadores séries ou compensadores síncronos, que reduziriam os efeitos da queda de tensão provocadas pelas elevadas correntes geradas pelos fornos a arco, máquinas de solda ou pela partida de grandes motores.

Para análise do segundo distúrbio descrito nesta seção, a cunha de tensão, foi verificado que este fenômeno causa transições sucessivas e

bruscas de tensão, causadas principalmente pelo uso de equipamentos de eletrônica de potências e por conversores trifásicos.

A redução ou a eliminação deste efeito é possível a partir da substituição de equipamentos mais sensíveis por equipamentos mais robustos e pela separação das cargas dos circuitos elétricos do sistema, de acordo com a demanda de cada dispositivo.

Faça valer a pena

1. A evolução das cargas elétricas contribuiu com vários benefícios ao sistema elétrico, tais como aumento da eficiência energética dos dispositivos, melhora no rendimento, redução de custo e desenvolvimento de novas funções, antes restritas por conta da tecnologia disponível. No entanto, por conta da característica não linear destes equipamentos, algumas preocupações quanto à qualidade do fornecimento foram originadas. Dentro deste contexto, pode-se afirmar que as principais preocupações com relação à qualidade da energia foram ocasionadas pelos seguintes fatores, exceto pelo seguinte aspecto:

- a) Os componentes utilizados nos equipamentos atuais os tornaram mais sensíveis à qualidade da energia.
- b) Aumento na utilização de cargas que causam perturbação ao sistema.
- c) Aumento na utilização de cargas mais eficientes no sistema elétrico, causando melhora no perfil de tensão e, desta forma, melhorando a qualidade do fornecimento da energia.
- d) Crescente instalação de cargas com relação tensão-corrente não linear em todos os setores da sociedade.
- e) Aspectos econômicos relacionados ao suporte da qualidade da energia e grau de imunidade de dispositivos.

2. O sistema elétrico é passível às falhas que podem comprometer a qualidade da energia elétrica e causar a interrupção do fornecimento de energia. Estas falhas ocorrem no sistema por meio, principalmente, da ação de descargas atmosféricas, contatos de árvores e animais ao sistema elétrico, falhas de equipamento, erro humano, entre outros.

Analisando os conceitos relacionados às falhas ou faltas do sistema, podemos averiguar os seguintes aspectos:

- I. As faltas podem ser temporárias ou permanentes.
- II. Falta trifásica (FFF), trifásica à terra (FFFT), bifásicas (FF), bifásicas à terra (FFT) e monofásicas são tipos de faltas no sistema.
- III. Faltas trifásicas são classificadas como falhas menos severas no sistema, ocorrendo com maior frequência.

IV. Faltas localizadas no sistema de transmissão afetam um número maior de consumidores, devido a sua configuração malhada e por atingir uma maior área geográfica.

Analisando as afirmativas apresentadas, assinale a alternativa correta:

- a) As afirmativas I e II estão corretas.
- b) As afirmativas I, II e IV estão corretas.
- c) As afirmativas I e IV estão corretas.
- d) Apenas a afirmativa IV está correta.
- e) As afirmativas I, II, III e IV estão corretas.

3. O sistema elétrico está suscetível a falhas, que podem causar sérios danos à Qualidade da Energia Elétrica (QEE). A análise dos distúrbios ou perturbações que ocorrem neste sistema é importante para mitigação ou redução de efeitos prejudiciais à QEE. Diante disto, é necessário verificar os possíveis tipos de perturbações.

Entre as opções a seguir, qual alternativa não se enquadra como distúrbio do sistema elétrico?

- a) Transitórios.
- b) Desequilíbrio de tensão.
- c) Flutuação de tensão.
- d) Variações de curta duração.
- e) Perdas de transmissão e distribuição nulas.

Seção 3.2

Falhas no sistema elétrico

Diálogo aberto

Caro aluno, nesta seção continuaremos identificando os distúrbios que ocorrem no sistema elétrico e acarretam em uma má qualidade da energia fornecida. Sendo assim, é necessário que você assimile e compreenda os conceitos apresentados, e a melhor forma para que isso ocorra é se colocando em uma situação em que seja necessária a utilização deles. Portanto, imaginaremos que você continua sendo o responsável pelos relatórios de qualidade da energia e que, no último relatório apresentado na Seção 3.1, alguns parâmetros não foram analisados. Dessa forma, é necessário completá-lo, acrescentando informações sobre outros distúrbios que podem ocorrer na rede em estudo.

Para auxiliar na identificação de todos os aspectos que devem ser analisados no seu relatório, algumas questões foram levantadas. Como o desequilíbrio de tensão afeta o sistema elétrico? Quais cálculos devem ser feitos para análise do fator de desequilíbrio na rede em estudo? Existe um valor limite para o fator de desequilíbrio estabelecido? Os afundamentos de tensão, elevação de tensão e ruídos são causados por quais fatores?

Utilize os conceitos apresentados na disciplina, tais como definição e características dos desequilíbrios de tensão, dos afundamentos de tensão, da elevação de tensão e dos ruídos para auxiliar na elaboração deste relatório.

Caro aluno, está preparado para continuar a identificar quais fatores afetam a qualidade da energia elétrica da concessionária em que trabalha? Espero que você esteja animado para este desafio. Bons estudos e um ótimo trabalho!

Continuaremos estudando a respeito dos distúrbios no sistema elétrico, analisando o desequilíbrio de tensão, afundamentos de tensão, elevação de tensão e ruídos.

Desequilíbrio de tensão

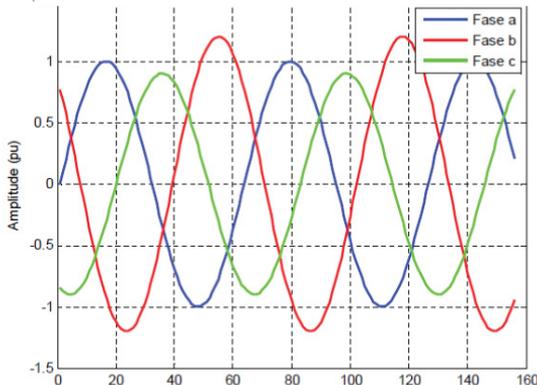
O desequilíbrio de tensão, ou desbalanço, pode ser caracterizado por qualquer diferença nas amplitudes entre as três tensões de fase, ou desvio da defasagem de 120° entre estas tensões ou ainda as duas condições simultaneamente (MAIA, 2011). A condição que mais ocorre no sistema elétrico é a assimetria da amplitude das tensões.

As principais causas para o desequilíbrio de tensão podem ser identificadas, a saber:

- Cargas monofásicas distribuídas inadequadamente.
- Cargas monofásicas conectadas em circuitos trifásicos.
- Utilização de fornos trifásicos a arco.
- Anomalias no sistema elétrico, tais como curto-circuito e falha de isolamento de equipamento.

Podemos verificar como ocorre o desequilíbrio das tensões no sistema analisando a Figura 3.4.

Figura 3.4 | Desequilíbrio de tensão



Fonte: adaptada de Kern (2008).

No Brasil, os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) – Módulo 8, definem como deve ser feito o cálculo do desequilíbrio de tensão, sendo:

$$FD\% = \frac{V_-}{V_+} 100$$

Onde,

FD – fator de desequilíbrio, que quantifica o nível de desequilíbrio de tensão ou corrente em um sistema elétrico trifásico.

V_- – magnitude da tensão de sequência negativa.

V_+ – magnitude da tensão de sequência positiva.

Por esta equação, o desequilíbrio é avaliado a partir da relação entre a magnitude da tensão de sequência negativa e a magnitude da tensão de sequência positiva, não devendo ultrapassar o valor de 2% de FD, para o sistema de média e alta tensão.



Refleta

A ultrapassagem do valor do desequilíbrio de tensão afeta e muito os equipamentos elétricos. Para termos ideia da influência deste valor, imagine que um pequeno desequilíbrio de 3,5% na tensão pode aumentar em 20% as perdas do motor de indução trifásica, ou ainda, um desequilíbrio de 5% ou mais pode causar um dano irreversível ao equipamento, podendo destruí-lo rapidamente (REZENDE; SAMESIMA, 2013).

Refleta: a ultrapassagem do valor limite pode causar prejuízos enormes para indústrias e mitigar este distúrbio é imprescindível.

Pelo PRODIST, o cálculo do desequilíbrio pode ser realizado ainda da seguinte maneira,

$$Des(\%) = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}}$$

$$\beta = \frac{V_{ab}^4 + V_{bc}^4 + V_{ca}^4}{(V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)^2}$$

Onde,

V_{ab} , V_{bc} , V_{ca} – magnitude das tensões trifásicas de linha.

Existem ainda outras formas para o cálculo do desequilíbrio, determinadas por (BELCHIOR, 2011):

- NEMA (*National Electrical Manufacturer Association*): define o desequilíbrio pela relação entre o maior desvio das tensões pelo valor médio das tensões.

$$Des(\%) = \frac{\Delta V}{V_{\text{médio}}} 100$$

$$V_{\text{médio}} = \frac{V_{ab} + V_{bc} + V_{ca}}{3}$$

- IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*): define o desequilíbrio pela diferença entre o maior e o menor valor em módulo das tensões trifásicas sobre a soma das três tensões do sistema.

$$Des(\%) = \frac{3(V_{\text{max}} - V_{\text{min}})}{V_{ab} + V_{bc} + V_{ca}}$$

Vale ressaltar que o cálculo deve ser feito a partir da fórmula estabelecida pelo PRODIST, a fim de cumprir a legislação vigente em nosso país.



Pesquise mais

Para saber mais sobre o desequilíbrio de tensão e seus efeitos no sistema elétrico, acesse:

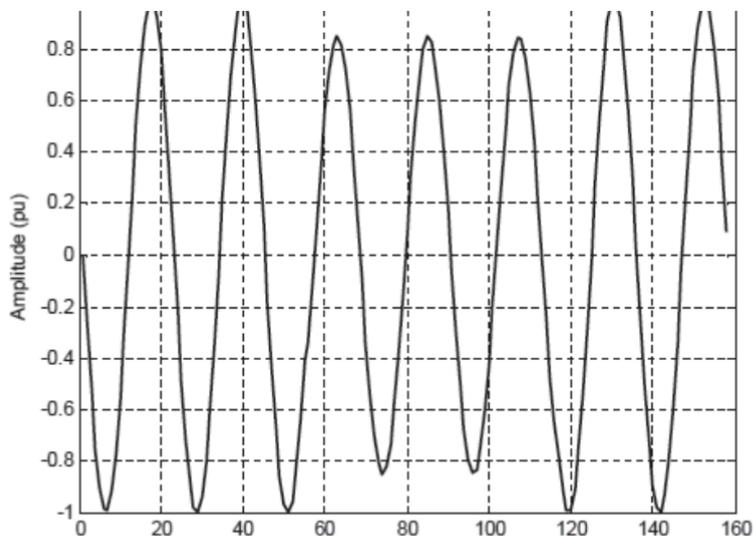
OS EFEITOS do desequilíbrio de tensão. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=V5FuVwrlDts>>. Acesso em: 8 jan. 2017.

REZENDE, P. H. O.; SAMESIMA, M. I. **Efeitos do desequilíbrio de tensões de suprimentos nos motores de indução trifásico**. Disponível em: <<http://www.seer.ufu.br/index.php/horizontecientifico/article/viewFile/4473/11857>>. Acesso em: 8 jan. 2017.

Afundamentos de tensão

Os afundamentos de tensão de curta duração, ilustrados na Figura 3.5, podem ser divididos em temporários ou momentâneos.

Figura 3.5 | Afundamento da tensão de curta duração



Fonte: adaptada de Kern (2008).

Afundamentos momentâneos de tensão são definidos por possuírem valores eficazes de tensão superiores ou iguais a 0,1 e inferiores a 0,9 pu de tensão nominal, com duração superior ou igual a um ciclo (16,67 ms) e inferior ou igual a 3 segundos (ANEEL, 2016). Os afundamentos temporários possuem as mesmas características dos momentâneos, porém, o tempo de duração é superior a 3 segundos e inferior ou igual a 3 minutos (ANEEL, 2016).

Lembrando que, de acordo com o PRODIST, os níveis de tensão entre 1,05 pu e 0,90 podem ser conceituados como adequados, precários ou críticos, como pode ser analisado na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 | Pontos de conexão em Tensão Nominal superior a 1 kV e inferior a 69 kV

| Tensão de Atendimento (TA) | Faixa de Variação da Tensão de Leitura (TL) em Relação à Tensão de Referência (TR) |
|----------------------------|--|
| Adequada | $0,93TR \leq TL \leq 1,05TR$ |
| Precária | $0,90TR \leq TL < 0,93TR$ |
| Crítica | $TL < 0,90TR$ ou $TL > 1,05TR$ |

Fonte: adaptada de Aneel (2016).

As causas do afundamento de tensão no sistema elétrico são:

- Chaveamento de cargas pesadas.
- Partida de motores.
- Faltas no sistema (principal causa).

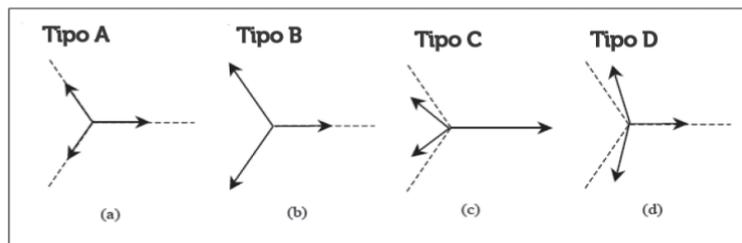
Normalmente, as faltas que ocorrem no sistema determinam o tipo de afundamento, se ele é desequilibrado ou equilibrado. Faltas trifásicas (FFF) geram afundamento de tensão equilibrado ou simétrico, já as faltas fase-terra (FT), fase-fase (FF), fase-fase-terra (FFT) produzem afundamentos desequilibrados ou assimétricos.



Exemplificando

As faltas interferem no tipo de afundamento de tensão no sistema elétrico. Por exemplo: faltas trifásicas produzem afundamentos equilibrados, como ilustrado na Figura 3.6 (a). No caso de uma falta de fase-terra, Figura 3.6 (b), o afundamento de tensão afetará apenas uma fase, e a amplitude de apenas uma tensão é reduzida. Para o caso exemplificado na Figura 3.6 (c), a falta pode ser fase-terra (FT) ou falta entre as fases, implicando na redução da amplitude de duas tensões, a alteração na fase dos ângulos. Por último, a falta pode ser de uma das fases para a terra ou por curto bifásico, acarretando na variação de duas fases na amplitude e ângulo e mudança no módulo da terceira fase (CORRÊA, 2007).

Figura 3.6 | Tipos de afundamento de tensão



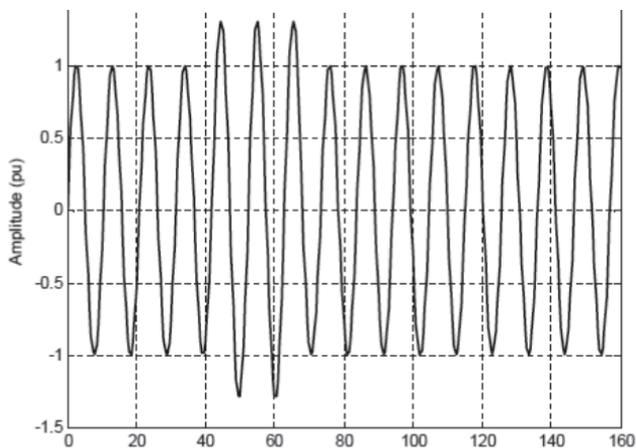
Fonte: adaptada de Maia (2011).

Analisou-se apenas os afundamentos de tensão de curta duração nesta seção, porém, os afundamentos também podem ser de longa duração, sendo denominados de subtensão.

Elevação de tensão

A elevação de tensão é caracterizada quando um defeito causa um aumento maior que 10% no valor eficaz da tensão do sistema, com duração de 0,5 ciclo a 3 min. Pode-se analisar como se comporta este distúrbio na Figura 3.7.

Figura 3.7 | Elevação da tensão de curta duração



Fonte: adaptada de Kern (2008).

Assim como os afundamentos de tensão de curta duração, a elevação de tensão de curta duração pode ser classificada como momentânea ou temporária.

Elevação momentânea de tensão é definida por possuir valor eficaz de tensão superior a 1,1 pu da tensão nominal, com duração superior ou igual a um ciclo (16,67 ms) e inferior ou igual a 3 segundos. A elevação temporária difere da momentânea em relação ao tempo de duração, sendo superior a 3 segundos e inferior a 3 minutos.

As principais causas para este distúrbio no sistema elétrico são (MALANGE, 2010):

- Faltas de fase-terra na rede de transmissão e distribuição.
- Energização de grandes bancos capacitores.
- Saída de grandes blocos de cargas.



Assimile

Os conceitos de afundamentos de tensão e elevação de tensão são similares em relação à classificação e ao tempo de duração.

Afundamentos e elevações de tensão momentâneos possuem tempos de duração superiores ou iguais a um ciclo e inferiores ou iguais a 3 segundos (ANEEL, 2016).

Já os afundamentos e elevações de tensão temporários possuem tempos de duração superiores a 3 segundos e inferiores a 3 minutos (ANEEL, 2016).

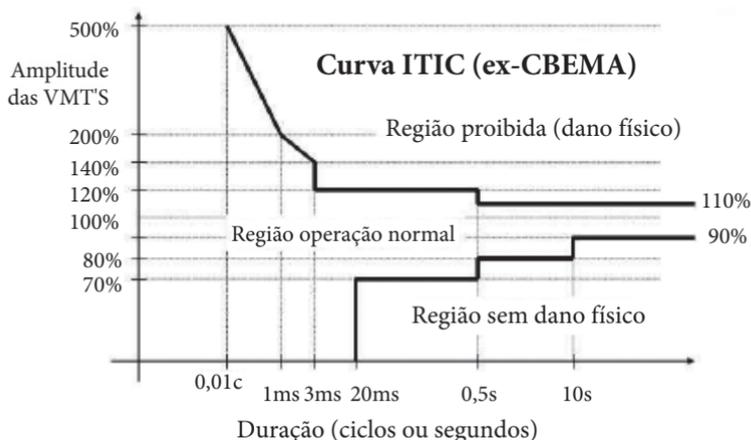
Com relação à amplitude de tensão sobre a tensão de referência, afundamentos de tensão de curta duração possuem valores eficazes superiores ou iguais a 0,1 e inferiores a 0,9 pu. E a elevação de tensão de curta duração possui valor eficaz superior a 1,1 pu (ANEEL, 2016).

Os efeitos decorrentes, tanto da elevação, quanto dos afundamentos de tensão, ocasionam como principal consequência, a má operação de equipamentos eletrônicos, principalmente de computadores e controladores eletrônicos, que são extremamente

sensíveis à variação da qualidade da energia, e podem apresentar falhas imediatas durante os distúrbios de energia, relacionados à elevação ou afundamento de tensão (ARRUDA, 2003).

Para estabelecer o limite suportado por estes equipamentos sensíveis, foi criada a curva ITIC, ilustrada na Figura 3.8. Nesta curva, são definidas três regiões, a região proibida, em que ocorre dano físico, a região de operação normal e a região sem dano físico.

Figura 3.8 | Curva de suportabilidade de equipamentos sensíveis (computadores) - ITIC



Fonte: adaptada de Maia (2011).

Analisou-se apenas as elevações de tensão de curta duração nesta seção, porém, as elevações também podem ser de longa duração, sendo denominados de sobretensão.

Ruído

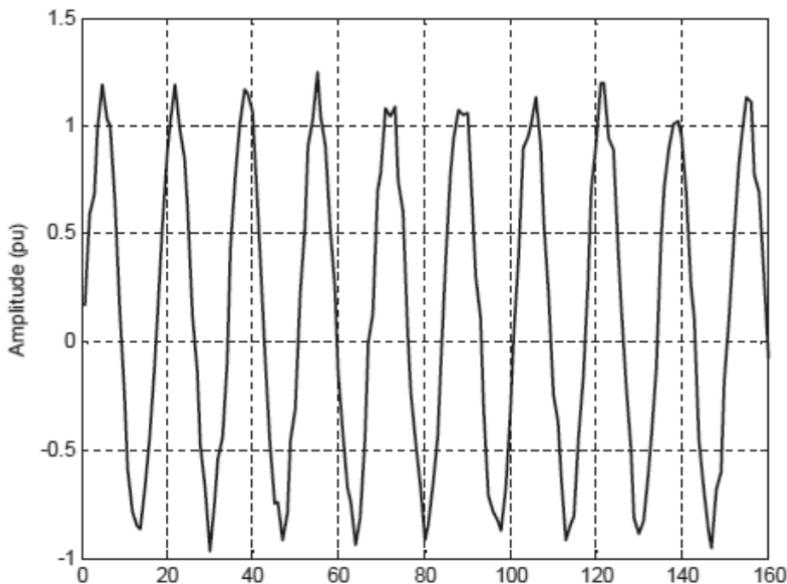
O ruído é uma distorção na forma de onda, que pode ser definido como um sinal indesejável de baixa intensidade, com espectro de frequência amplo, menor que 200 kHz (CARVALHO, 1997). Esta distorção pode ser analisada na Figura 3.9.

A principal causa para sua ocorrência é a utilização de equipamentos de eletrônica de potência, circuitos de controle, equipamentos a arco, retificadores a estado sólido e fontes chaveadas (MALANGE, 2010).

Os ruídos podem ser classificados, como (MALANGE, 2010):

- Ruído de Modo Comum (*Common Mode Noise*): diferença de tensão entre o condutor neutro e o terra.
- Ruído de Modo Normal (*Normal Mode Noise*): diferença de tensão entre o condutor fase e o neutro.

Figura 3.9 | Distorção na forma de onda, ruído



Fonte: adaptada de Kern (2008).

Assim como os demais distúrbios, os ruídos causam mau funcionamento e/ou queima de equipamentos elétricos, principalmente de computadores, podendo ocasionar perdas ou alterações de dados digitais. Para diminuir os efeitos causados por ele, é necessário utilizar filtros, aterrar corretamente os equipamentos e não ligar equipamentos sensíveis no mesmo circuito de alimentação.

Sem medo de errar

Retomando a situação-problema descrita no item *Diálogo aberto* desta seção, verificamos que é essencial a análise dos conceitos referentes aos distúrbios elétricos, a fim de garantir uma boa qualidade no fornecimento de energia.

Sendo assim, para continuar a elaboração do seu relatório sobre a qualidade da energia, desempenhando seu papel de engenheiro responsável, é necessário incluir alguns conceitos sobre desequilíbrio de tensão, afundamentos de tensão, elevação de tensão e ruídos.

Primeiramente, é necessário definir como o desequilíbrio é conceituado. Este distúrbio é caracterizado pela assimetria das tensões, pelo desvio da defasagem de 120° entre estas tensões ou ainda pela ocorrência destas duas condições simultaneamente.

O desequilíbrio deve ser analisado de acordo com as equações fornecidas pelo PRODIST, Módulo 8, sendo:

$$FD\% = \frac{V_-}{V_+} 100$$

Ou ainda,

$$Des(\%) = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}}$$
$$\beta = \frac{V_{ab}^4 + V_{bc}^4 + V_{ca}^4}{(V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)^2}$$

O valor do fator de desequilíbrio não pode ultrapassar 2%, pois níveis maiores podem afetar os equipamentos elétricos de forma irreversível.

Outros parâmetros que devem ser analisados são os afundamentos de tensão e as elevações de tensão, que ocorrem devido a faltas na rede elétrica, causando também problemas na operação de equipamentos eletrônicos. Lembrando que em redes entre 1 kV e 69 kV, a tensão dita adequada está no intervalo de 0,93 pu. a 1,1 pu., caso contrário ela pode ser precária, entre 0,90 p.u. e 0,93 pu., ou crítica, abaixo de 0,90 pu. ou acima de 1,10 pu.

Por fim, o último distúrbio em análise são os ruídos, ocasionados principalmente pela utilização de equipamentos de eletrônica de potência, que causam distorção na forma de onda.

A análise de cada um destes aspectos é essencial para verificação dos fatores que influenciam na qualidade da energia da concessionária em que trabalha.

Avançando na prática

Distúrbios encontrados na região em estudo

Descrição da situação-problema

Agora, vamos imaginar que a região em estudo tem sua renda principal vinculada a indústrias, e que estas empresas estão sendo afetadas principalmente pelos desequilíbrios de tensão, pela elevação e afundamentos de tensão.

Como o desequilíbrio de tensão afeta essas indústrias? Como os afundamentos de tensão e a elevação de tensão afetam o sistema elétrico? Existe algum parâmetro para se estabelecer um nível aceitável para os afundamentos de tensão e elevação de tensão?

Resolução da situação-problema

O desequilíbrio de tensão afeta principalmente as indústrias, analisar este distúrbio e tentar mantê-lo dentro dos 2% estabelecidos pelo PRODIST é essencial. Um desvio maior pode causar sérios danos aos equipamentos elétricos instalados nas indústrias, principalmente aos motores de indução.

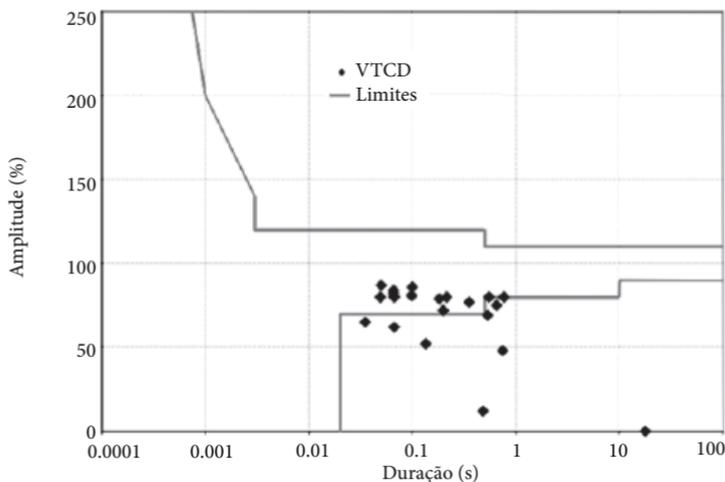
Com relação aos motores, um desequilíbrio de tensão de 3,5% pode causar 20% de perdas no motor, ou ainda se este desequilíbrio de tensão for de 5% ou mais, pode acarretar em danos irreversíveis, gerando danos financeiros aos empresários da região.

Sobre os afundamentos de tensão e elevação de tensão verificados na região, é necessário mitigá-los e utilizar a curva ITIC para analisar os limites de operação normal para os equipamentos eletrônicos instalados na área em estudo.

Supondo que um certo equipamento, podendo ser um computador, uma televisão ou até mesmo uma lâmpada, possua a curva ITIC, ilustrada na Figura 3.10. Por meio da utilização de

equipamentos de medição, aferiram-se 21 medidas (eventos) caracterizadas como Variação de Tensão.

Figura 3.10 | Curva ITIC com ocorrências de VTCD



Fonte: adaptada de Colnagno et al. (2011).

Como pode ser observado, pelo menos 8 eventos, entre os registrados, não fazem parte da operação normal, embora ainda não causem efetivamente dano físico ao equipamento. Por outro lado, afirma-se que tais eventos podem contribuir para a redução da vida útil do equipamento e causar outros prejuízos no correto funcionamento.

Faça valer a pena

1. Os afundamentos de tensão são distúrbios que ocorrem no sistema elétrico e geram má operação dos equipamentos eletrônicos, principalmente dos computadores.

Sobre este tipo de distúrbio no sistema elétrico, é incorreto afirmar que:

- Os afundamentos de tensão de curta duração podem ser classificados como momentâneos e temporários.
- A principal causa dos afundamentos de tensão são as faltas no sistema elétrico.
- O tipo de falta determina normalmente o tipo de afundamento de tensão, podendo ser um afundamento equilibrado ou simétrico, ou um afundamento desequilibrado ou assimétrico.

- d) As faltas trifásicas geram um afundamento de tensão desequilibrado.
- e) Entre as causas do afundamento de tensão estão os chaveamentos de cargas pesadas, partida de motores e faltas no sistema elétrico.

2. O desequilíbrio de tensão ocorre normalmente pela conexão de cargas monofásicas em circuitos trifásicos por anomalias no sistema elétrico, tais como curto-circuito, falha de isolamento de equipamentos, entre outros.

Sobre o desequilíbrio de tensão, pode-se afirmar que:

- I. O desequilíbrio de tensão pode ser caracterizado por qualquer diferença nas amplitudes entre as três tensões de fase.
- II. O desequilíbrio de tensão é caracterizado apenas pelo desvio da defasagem de 120° entre estas tensões.
- III. O desequilíbrio de tensão pode ser caracterizado por qualquer diferença nas amplitudes entre as três tensões de fase e pelo desvio da defasagem de 120° entre estas tensões.
- IV. Pelo PRODIST, o desequilíbrio de tensão é avaliado a partir da relação entre a magnitude da tensão de sequência negativa e a magnitude da tensão de sequência positiva.
- V. O NEMA (National Electrical Manufacturer Association) e o IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) definem equações diferentes das utilizadas pelo PRODIST para o cálculo do desequilíbrio de tensão.

Entre estas afirmações, as alternativas corretas são:

- a) Apenas a afirmativa II está correta.
- b) As afirmativas I e II estão corretas.
- c) As afirmativas I, II e III estão corretas.
- d) As afirmativas II, III e IV estão corretas.
- e) As afirmativas I, III, IV e V estão corretas.

3. Os afundamentos de tensão e as elevações de tensão possuem características similares quanto à classificação e ao tempo de duração.

É correto afirmar que:

- a) Os afundamentos e as elevações de tensão momentâneos possuem tempo de duração superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a 1 minuto.
- b) Os afundamentos e as elevações de tensão temporários possuem duração superior a 10 segundos e inferior a 5 minutos.
- c) Os afundamentos e as elevações de tensão temporários possuem duração superior a 3 segundos e inferior a 3 minutos.
- d) Os afundamentos e as elevações de tensão temporários possuem tempo de duração superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a 3 segundos
- e) Os afundamentos de tensão de curta duração possuem valor eficaz superior ou igual a 0,5 e inferior a 0,8 pu. E a elevação de tensão de curta duração possui valor eficaz superior a 0,9 pu.

Seção 3.3

Indicadores usados nos sistemas elétricos

Diálogo aberto

Caro aluno, a identificação dos indicadores usados para avaliar a qualidade da energia elétrica auxilia na averiguação dos parâmetros que influenciam o bom fornecimento da energia. Sendo assim, é necessário que você assimile e compreenda este conteúdo, e a melhor forma para que isso ocorra é se colocando em uma situação em que seja necessária a utilização dos conceitos aprendidos. Imaginaremos que você trabalha em uma concessionária de energia e já determinou quais os distúrbios que afetam o sistema elétrico local, e pretende agora averiguar quais indicadores devem ser avaliados para obtenção de um bom fornecimento de energia.

Mediante este contexto, você deve elaborar um relatório contendo todos os parâmetros a serem analisados por estes indicadores. Verifique quais são os indicadores identificados no Brasil e como eles podem ser classificados. Descreva como esses indicadores atuam e quais parâmetros são mensurados por eles.

Utilize os conceitos apresentados na disciplina referentes aos índices e aos indicadores de qualidade para auxiliar na elaboração deste relatório.

Caro aluno, você está preparado para identificar quais indicadores devem ser analisados para o bom fornecimento da energia elétrica? Espero que você esteja animado para este desafio. Bons estudos e um ótimo trabalho!

Não pode faltar

Nesta seção será dada continuidade ao estudo dos distúrbios elétricos, sendo três conceitos abordados, a saber:

- Ruído de modo comum.

- Harmônicos.
- Interferência eletromagnética.

A descrição destes fatores que afetam a qualidade no fornecimento da energia será feita em seguida.

Ruído de modo comum

Na Seção 3.2, verificou-se que os ruídos são definidos como sinais indesejáveis de baixa intensidade, com espectro de frequência amplo, sendo menor que 200 kHz (CARVALHO, 1997). Identificou-se também que este efeito pode ser classificado como ruído de modo normal e ruído de modo comum. Nesta seção, apenas o ruído de modo comum será estudado, por ser o principal tipo de ruído responsável por problemas em equipamentos sensíveis às variações da qualidade da energia elétrica.

O ruído de modo comum é caracterizado por se propagar pelas linhas do condutor neutro, fechando o circuito pelo terra, ou seja, tal distúrbio provoca diferença de tensão entre o condutor neutro e o terra. Este é causado, principalmente, pela utilização de equipamentos de eletrônica de potência, tais como equipamentos a arco, retificadores a estado sólido e fontes chaveadas (MALANGE, 2010).



Assimile

A diferença entre o ruído de modo comum e o ruído de modo normal, descrita na seção anterior, será enfatizada a seguir.

Portanto, por definição, ruído de modo normal é a diferença de tensão entre o condutor fase e o neutro, e ruído de modo comum é a diferença de tensão entre o condutor neutro e o terra.

Devido às características desta distorção, o sistema elétrico é afetado, e isto pode causar mau funcionamento e/ou queima de equipamentos elétricos, principalmente dos computadores, o que também pode ocasionar as alterações ou a perda de dados digitais (MALANGE, 2010). Para evitar tais problemas provenientes dos ruídos,

faz-se necessário tomar algumas medidas, tais como:

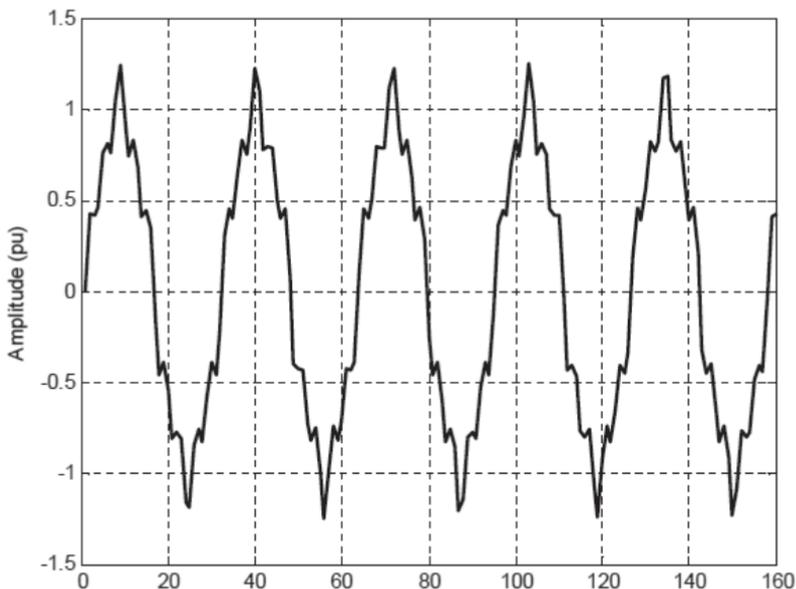
- Utilizar filtros e transformadores isoladores (autotransformadores).
- Aterrar corretamente e, de preferência, aterrar separadamente equipamentos sensíveis de modo a isolar do neutro da rede elétrica.
- Não ligar equipamentos sensíveis no mesmo circuito de alimentação de equipamentos de maior potência elétrica.

Harmônicos

Os harmônicos são tensões ou correntes senoidais de frequências múltiplas inteiras da frequência fundamental, na qual o sistema de energia elétrica opera, usualmente, em 50 ou 60 Hz, e que são responsáveis por distorcer na forma de onda (MALANGE, 2010).

O comportamento deste distúrbio no sistema pode ser verificado analisando a Figura 3.11.

Figura 3.11 | Harmônicos



Fonte: adaptada de Kern (2008).

A principal causa desta distorção é a utilização de cargas elétricas não lineares, podendo ser computadores, circuitos de iluminação com lâmpadas de descarga, motores síncronos, fornos a arco, eletrodomésticos com fontes chaveadas, entre outros (CARVALHO, 1997).

Este problema afeta a qualidade da energia fornecida em vários aspectos, tais como (POMILIO; DECKMANN, 2016):

- Aparecimento de vibrações e ruído. Entre os casos típicos estão os motores de indução.
- Sobreaquecimento de núcleos ferromagnéticos. O aumento de perdas por histerese e correntes parasitas em núcleos de motores, geradores, transformadores estão entre os casos típicos.
- Erro de medição de grandezas elétricas.
- Erro de controle de conversores.
- Erro de atuação da proteção.
- Sobrecorrente de neutro.
- Interferências e ruídos eletromagnéticos.



Refleta

Os harmônicos vão contra todos os princípios estabelecidos para a qualidade do fornecimento de energia elétrica. Atender aos consumidores com uma tensão senoidal, amplitude e frequência constante se torna impossível diante deste distúrbio no sistema elétrico.

Imagine uma determinada porção do sistema elétrico que seja afetada por harmônicos, logo, vibrações atípicas em máquinas rotativas, erros de medição, sobrecorrente e sobreaquecimento em cabecamentos e em equipamentos, entre outros, começam a se evidenciar como problemas na operação do sistema. A consequência, portanto, é a geração de sérios prejuízos aos consumidores, principalmente às

indústrias. Na medida em que motores e acionadores, por exemplo, passam a falhar, ocorre um aumento de custos operacionais, de manutenção e perdas em produtividade.

Reflitam: as distorções harmônicas devem ser mitigadas e seus efeitos ao menos devem ser reduzidos. Procurar soluções para este problema é imprescindível.

Os efeitos deste distúrbio podem ser reduzidos com a utilização de filtros de harmônicos, reatores de linha, transformadores de isolamento e com melhorias no aterramento e fiação (MALANGE, 2010).

Interferência eletromagnética

A interferência eletromagnética (EMI) pode ser caracterizada como uma degradação no desempenho de um equipamento, sistema ou dispositivo devido a perturbações eletromagnéticas. Estas perturbações podem ser ruídos eletromagnéticos, sinais não desejados ou mesmo uma modificação no próprio meio de propagação.

Alguns dispositivos, sistemas ou equipamentos possuem a capacidade de funcionar de forma satisfatória em um ambiente que sofre EMI, ou seja, cada equipamento possui certo grau de imunidade. Tais níveis de imunidade são determinados por Testes de Compatibilidade Eletromagnética (EMC).

Índices e indicadores de qualidade

Tendo em vista as causas e as consequências de todos os distúrbios elétricos existentes, órgãos regulatórios pelo mundo definiram uma série de índices e indicadores de qualidade da energia para garantir que a operação de sistemas elétricos de potência ocorra de maneira eficiente e segura. Nesta seção, os aspectos definidos no Brasil para a qualidade da energia serão analisados.

Portanto, podem-se dividir os indicadores da qualidade no setor elétrico brasileiro em cinco aspectos, sendo:

- Indicadores de continuidade do fornecimento individual.
- Indicadores de continuidade do fornecimento ao conjunto de unidades consumidoras.
- Indicadores de continuidade na rede básica de transmissão.
- Indicadores de conformidade.
- Indicadores de prestação.

1. Indicadores de continuidade do fornecimento individual

Para análise do fornecimento de energia, indicadores de continuidade devem ser verificados, mensurando:

- A frequência de interrupções durante um determinado tempo.
- A duração cumulativa das interrupções ocorridas durante determinado intervalo de tempo.

De acordo com o Módulo 8 do PRODIST, deve-se analisar as DIC, FIC, DMIC e DICRI, como segue:

A **DIC - Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora ou Ponto de Conexão** - determina o tempo de duração da interrupção, como o próprio nome sugere, e é expresso por:

$$DMIC = \max(t(i))$$

Em que,

i – índice de interrupções da unidade consumidora ou ponto de conexão, variando de 1 a n.

n – número de interrupções da unidade consumidora ou ponto de conexão.

t (i) – tempo de duração da interrupção da unidade consumidora ou ponto de conexão, no período apurado.

A **FIC - Frequência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora ou por Ponto de Conexão** - indica o número de interrupções da unidade consumidora, podendo-se ser expresso por:

$$FIC = n$$

A **DMIC - Duração Máxima de Interrupção Contínua por Unidade Consumidora ou Ponto de Conexão** - mensura o tempo máximo de duração da interrupção, podendo-se ser expresso por:

$$DMIC = \max(t(i))$$

A **DICRI = Duração de Interrupção Individual ocorrida em um Dia Crítico** por uma unidade consumidora ou ponto de conexão, indica a duração da interrupção ocorrida em um dia que a quantidade de ocorrências emergenciais em um conjunto elétrico ultrapassa determinado limite, estabelecido como a média, mais três desvios padrões, dos valores diários verificados nos 12 meses do ano anterior. Podendo ser expresso por:

$$DICRI = t_{\text{crítico}}$$

Em que,

$t_{\text{crítico}}$ – expressa a duração da interrupção ocorrida em um dia crítico.

2. Indicadores de confiabilidade no fornecimento ao consumidor final

Para análise da continuidade no fornecimento da energia elétrica ao consumidor, dois indicadores serão verificados, a FEC e a DEC.

A **FEC - Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora**, de acordo com o Módulo 8 do PRODIST, indica o número de interrupções ocorridas em determinado período por um conjunto de consumidores, podendo ser expresso por:

$$FEC = \frac{\sum_{i=1}^{C_c} FIC(i)}{C_c}$$

Em que,

i = índice de unidades consumidoras atendidas em baixa tensão (BT) ou média tensão (MT) faturadas do conjunto.

C_c = número total de unidades consumidoras faturadas do conjunto

no período de apuração, atendidas em BT ou MT.

A **DEC - Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora** - mensura a média de horas que o consumidor final ficará sem fornecimento de energia no período de apuração, podendo ser expresso por:

$$DEC = \frac{\sum_{i=1}^{C_c} DIC(i)}{C_c}$$



Exemplificando

O cálculo do FEC e DEC pode ser exemplificado.

Considere dois trechos, A e B, atendendo 500 unidades consumidoras. Imagine que os trechos A e B tiveram problemas com o fornecimento da energia e 200 unidades consumidoras foram afetadas no trecho A e 300 no trecho B.

O trecho A foi atingido durante o período das 14:00 h às 14:05 h e o trecho B das 14:00 h às 14:15 h.

Mediante esses dados, pode-se calcular a FEC e DEC, sendo:

$$FEC = \frac{200 + 300}{500} = 1 \text{ interrupção / cliente}$$

$$DEC = \frac{200 * (5 / 60) + 300 * (15 / 60)}{500} = 0,1833 \text{ horas}$$

3. Indicadores de continuidade na rede básica de transmissão

Os indicadores de continuidade que avaliam a qualidade no suprimento de energia pelo sistema de transmissão, de acordo com o Operador do Sistema Nacional – ONS, são a FIPC e a DIPC.

A **FIPC - Frequência de Interrupção do Ponto de Controle** - indica o número total de interrupções do ponto de controle com duração igual ou superior a 1 minuto.

A **DIPC - Duração da Interrupção do Ponto de Controle** - verifica a maior duração de interrupções do Ponto de Controle, sendo mensurada em minutos por período de apuração.

4. Indicadores de conformidade

O fator utilizado para avaliar a conformidade no fornecimento de energia é o nível de tensão. Para esta avaliação, leituras de tensão são realizadas, a fim de classificá-las em um dos três níveis: adequado (tensão entre 0,93 e 1,05 pu.), precário (tensão entre 0,90 e 0,93 pu.) ou crítico (tensão abaixo de 0,90 ou acima de 1,05 pu.).

Para análise da conformidade, dois índices devem ser observados, sendo a **DRP** e a **DRC**.

A **DRP - Duração Relativa de Transgressão para Tensão Precária** - indica o percentual das leituras em que o nível de tensão estava na faixa de tensão classificada como precária, podendo ser representada pela expressão:

$$DRP = \frac{nlp}{1008} 100[\%]$$

Sendo,

nlp - representa o maior valor entre as fases do número de leituras situadas nas faixas precárias.

A **DRC - Duração Relativa de Transgressão para Tensão Crítica** - representa o percentual de leituras na faixa de tensão crítica, podendo ser representada pela expressão:

$$DRC = \frac{nlc}{1008} 100[\%]$$

Sendo,

nlc - representa o maior valor entre as fases do número de leituras situadas nas faixas críticas.

O valor 1008 (mil e oito) representa o conjunto de valores de leituras válidas obtidas em intervalos consecutivos de 10 minutos necessários para compor os indicadores DRP e DRC.

5. Indicadores de prestação

O último indicador a ser verificado é o que se relaciona com o atendimento comercial ao consumidor. Para esta análise dois índices foram criados pela ANEEL, análogos a FEC e a DEC, sendo a FER e a DER.

A **FER - Frequência Equivalente de Reclamação** - indica a quantidade de reclamações dos consumidores, procedentes a cada mil unidades.

A **DER - Duração Equivalente de Reclamação** - representa o prazo médio da solução das reclamações solucionadas pela concessionária de energia, mensurado em dias.



Pesquise mais

Para saber mais sobre os indicadores de prestação, a FER e a DER, acesse:

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Nota Técnica nº 5/2013**: Anexo III - minuta de resolução. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2013/045/documento/nt-005-der_fer_-_limites_-_minuta_de_resolucao_-_v3.pdf>. Acesso em: 16 jan. 2017.

Outra informação interessante sobre a continuidade do fornecimento da energia é o ranking desta continuidade, dividido entre grandes (maior que 1 TWh ao ano) e pequenas (menor ou igual a 1 TWh ao ano) concessionárias de energia elétrica, disponibilizado pela ANEEL. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/ranking-2015>>. Acesso em: 27 jan. 2017.

Sem medo de errar

Retomando a situação-problema descrita no item *Diálogo aberto* desta seção, verificamos que a confiabilidade do fornecimento de

energia é avaliada por meio destes indicadores da qualidade, desta forma, a análise deles se torna importante.

Para elaborar seu relatório sobre os índices e os indicadores da qualidade da energia, desempenhando seu papel de engenheiro responsável por esta ação, primeiramente é necessário identificar quais são os parâmetros em estudo.

Com base nas informações apresentadas, averiguamos que cinco parâmetros bases são fixados, sendo três deles referentes à continuidade do fornecimento de energia e os outros dois relacionados à conformidade e à presteza do sistema.

Portanto, os indicadores em análise são:

- Continuidade do fornecimento individual.
- Continuidade do fornecimento ao conjunto de unidades consumidoras.
- Continuidade na rede básica de transmissão.
- Conformidade.
- Presteza.

Após a primeira etapa finalizada, é necessário analisar quais índices são avaliados em cada um destes indicadores de qualidade.

Os indicadores da continuidade mensuram tanto a frequência de interrupções como a duração cumulativa durante um intervalo de tempo, portanto, para a avaliação da continuidade individual, quatro índices devem ser levados em consideração, sendo a DIC, a FIC, a DMIC e a DICRI.

A DIC determina o tempo de duração da interrupção, a FIC indica o número de interrupções da unidade consumidora, a DMIC mensura o tempo máximo de duração da interrupção e a DICRI indica a duração da interrupção ocorrida em um dia crítico.

Para os indicadores relacionados à continuidade em conjunto de unidades consumidoras, avaliamos dois parâmetros, a FEC e a DEC. A FEC indica o número de interrupções ocorridas em determinado

período por um conjunto de consumidores, e a DEC mensura a média de horas que o consumidor final ficou sem fornecimento de energia no período de apuração.

Os índices de continuidade para averiguação da qualidade no suprimento de energia pelo sistema de transmissão são: a FIPC (Frequência de Interrupção do Ponto de Controle) e a DIPC (DIPC - Duração da Interrupção do Ponto de Controle), análogos a FEC e a DEC.

Para análise dos indicadores de conformidade verificamos a DRP - Duração Relativa de Transgressão para Tensão Precária e a DRC - Duração Relativa de Transgressão para Tensão Crítica.

Por fim, os indicadores de prestação consideram os índices FER e DER. A FER indica a quantidade de reclamações dos consumidores, procedentes a cada mil unidades, e DER representa o prazo médio da solução das reclamações solucionadas pela concessionária de energia, mensurado em dias.

Todos estes índices devem ser avaliados em seu relatório para assegurar a qualidade no fornecimento de energia em sua região.

Avançando na prática

Cálculo da FEC e DEC

Descrição da situação-problema

Após elaborar seu relatório sobre os índices e os indicadores da qualidade da energia, desempenhando seu papel de engenheiro responsável por esta ação, é necessário avaliar a DEC e a FEC de sua região e, para isso, uma situação-problema foi definida, descrita a seguir.

Vamos considerar, portanto, uma localidade com 650 consumidores dividida em três trechos, A, B e C, que tiveram problemas de fornecimento de energia porque houve uma interrupção no fornecimento em um determinado período de tempo.

Os dados relacionados a cada trecho estão descritos na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 | Dados de consumidores afetados por queda de energia elétrica

| Trecho | Início (h) | Término (h) | Consumidores atingidos |
|--------|------------|-------------|------------------------|
| A | 14:00 | 14:05 | 150 |
| B | 14:00 | 14:15 | 300 |
| C | 14:00 | 14:55 | 200 |

Fonte: elaborada pelo autor.

Com base nestes dados, você, engenheiro, deve calcular a FEC e a DEC da região em estudo.

Resolução da situação-problema

Mediante esses dados, pode-se calcular a FEC e a DEC, sendo:

$$FEC = \frac{150 + 300 + 200}{650} = 1 \text{ interrupção/cliente}$$

$$DEC = \frac{150 * (5 / 60) + 300 * (15 / 60) + 200 * (55 / 60)}{650}$$

$$DEC = 0,42 \text{ horas}$$

Faça valer a pena

1. Para avaliar a conformidade no fornecimento de energia elétrica, o fator utilizado é o nível de tensão. São realizadas leituras, e verifica-se em qual categoria as tensões apuradas se classificam, podendo ser nível adequado, precário ou crítico.

A respeito dos indicadores de conformidade, é incorreto afirmar:

- Dois índices são analisados pelos indicadores de conformidade, sendo a DRP e a DRC.
- DRP indica o percentual das leituras em que o nível de tensão está na faixa classificada como precária.
- Os índices avaliados pelos indicadores de conformidade estão relacionados à duração relativa de transgressão por faixa de tensão.
- DRC indica o percentual de leituras na faixa de tensão crítica.
- DRC indica o percentual de leituras na faixa de tensão correta.

2. Para análise da qualidade da energia fornecida, três indicadores de continuidade são avaliados, sendo:

- Indicadores de continuidade do fornecimento individual.
- Indicadores de continuidade do fornecimento ao conjunto de unidades consumidoras.
- Indicadores de continuidade na rede básica de transmissão.

Sobre os indicadores de continuidade, é incorreto afirmar.

- a) Os indicadores de continuidade mensuram a frequência de interrupções durante um determinado tempo e a duração cumulativa das interrupções ocorridas durante determinado intervalo de tempo.
- b) DIC, FIC, DMIC e DICRI são índices avaliados pelo indicador de continuidade do fornecimento individual.
- c) DEC e FEC são índices avaliados pelo indicador de continuidade do fornecimento ao conjunto de unidades consumidoras.
- d) DRP e DRC são índices avaliados pelos indicadores de continuidade do fornecimento individual.
- e) FIPC e DIPC são índices avaliados pelos indicadores de continuidade na rede básica de transmissão.

3. Os harmônicos são tensões ou correntes senoidais de frequências múltiplas inteiras da frequência fundamental, na qual o sistema de energia elétrica opera, usualmente, em 50 ou 60 Hz, que distorcem na forma de onda.

Sobre este distúrbio, é possível afirmar que:

- I. As distorções harmônicas causam vibrações em motores de indução.
- II. Sobreaquecimento de núcleos ferromagnéticos é um dos problemas ocasionados pelos harmônicos.
- III. Os efeitos deste distúrbio podem ser reduzidos com a utilização de filtros de harmônicos, reatores de linha, transformadores de isolamento e com melhorias no aterramento e na fiação.
- IV – A principal causa desta distorção é a utilização de cargas elétricas lineares.

Analisando as afirmativas apresentadas, assinale a alternativa correta:

- a) As afirmativas I, II e III estão corretas.
- b) As afirmativas I e IV estão corretas.
- c) As afirmativas I, II e IV estão corretas.
- d) As afirmativas I, III e IV estão corretas.
- e) As afirmativas II, III e IV estão corretas.

Referências

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **PRODIST**: módulo 8. Brasília, 2016. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/modulo-8>>. Acesso em: 10 fev. 2017.

_____. **Módulo 8**: Qualidade da energia. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/modulo8_revisao_1_retificacao_1.pdf>. Acesso em: 23 dez. 2016.

_____. **Nota Técnica nº 5/2013**: Anexo III - minuta de resolução. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2013/045/documento/nt-005-der_fer_-_limites_-_minuta_de_resolucao_-_v3.pdf>. Acesso em: 16 jan. 2017.

_____. **Ranking da continuidade do serviço 2015**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/ranking-2015>>. Acesso em: 27 jan. 2017.

ARGENTA, Tales Luiz Busanello. **Afundamentos de tensão provenientes de faltas no sistema elétrico de potência**: um estudo de caso. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2013.

ARRUDA, Elcio Franklin. **Análise de distúrbios relacionados com a qualidade da energia elétrica utilizando a transformada Wavelet**. São Carlos: Universidade de São Paulo, 2003.

BELCHIOR, Fernando Nunes. **QEE**: desequilíbrios. Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI. Grupo de Estudos da Qualidade da Energia Elétrica – GQEE, 2011. Disponível em: <http://www.gqee.unifei.edu.br/arquivos_upload/disciplinas/20/Desequilibrios.pdf>. Acesso em: 14 fev. 2016.

BOEIRA, Fernando Jardim. **Estudo avançado sobre interferência eletromagnética**. Canoas: Centro Universitário la Salle, 2010.

CARVALHO, Paulo Luciano. **Uma contribuição ao estudo da depressão de tensão**. Itajubá: Escola Federal de Engenharia de Itajubá, 1997.

COLNAGNO, G. P. et al. **A nova norma de qualidade da energia elétrica brasileira e um medidor de baixo custo**. Conferência Brasileira sobre Qualidade de Energia, Cuiabá-MT, 2011.

CORRÊA, Felipe Ivan Malta. **Estudo de um sistema de distribuição com enfoque na qualidade da energia elétrica**. São Carlos: Universidade de São Paulo, 2007.

FERREIRA, Danton Diego. **Análise de distúrbios elétricos em sistema de potência**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2010.

GUIGUER, Sergio. **Proteção de sistema de distribuição**. Porto Alegre: Sagra, 1988.

KERN, Fernanda Gonzaga. **Análise da qualidade de energia elétrica utilizando transformada Wavelet**. Ijuí: Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, 2008.

LIMA, Fernando P. A.; MINUSSI, Carlos Roberto. **Análise de distúrbios de tensão em sistemas de distribuição de energia elétrica usando o algoritmo de seleção negativa**. Ilha Solteira: Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2012.

LIZ, Muriel Bittencourt. **Contribuição para a redução da inferência eletromagnética em fontes chaveadas.** Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2003.

MAIA, Reinaldo Moreira. **Caracterização das variações de tensão de curta duração e seus impactos em uma planta da indústria alimentícia.** Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), 2011.

MALANGE, Fernando Cezar Vieira. **Rede neuro-fuzzy-Wavelet para detecção e classificação de anomalias de tensão em sistemas elétricos de potência.** Ilha Solteira: Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, 2010.

MATANA, Gleison Melhado. **Proposta de equipamento para medição dos fenômenos relativos à qualidade da energia elétrica utilizando conceitos de instrumentos virtuais.** São Carlos: Universidade de São Paulo, 2008.

OS EFEITOS do desequilíbrio de tensão. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=V5FuVwrlDts>>. Acesso em: 8 jan. 2017.

POMILIO, José Antenor. **Qualidade da energia elétrica e eletrônica de potência.** Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2002.

POMILIO, José Antenor; DECKAMNN, Sigmar Maurer. **Condicionamento da energia elétrica e dispositivos FACTS.** Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2009.

REGAGNIN, Flavio de Andrade. **Flutuações de tensão causada pelos fornos a arco: efeitos e possíveis mitigações.** Itatiba: Universidade São Francisco, 2012.

REZENDE, P. H. O.; SAMESIMA, M. I. **Efeitos do desequilíbrio de tensões de suprimentos nos motores de indução trifásico.** Disponível em: <<http://www.seer.ufu.br/index.php/horizontecientifico/article/viewFile/4473/11857>>. Acesso em: 8 jan. 2017.

ROSS, R. P. et al. **Definição das metodologias e procedimentos necessários às campanhas de medição dos indicadores de desempenho.** Disponível em: <http://www.ons.org.br/download/administracao_transmissao/engenharia_transmissao/ONSRE028-2005-RelatorioCampanhas_Rev4.pdf>. Acesso em: 23 dez. 2016.

SARMANHO, Uiraçaba Abaetê Solano. **Influência dos distúrbios elétricos em média tensão na qualidade de energia: estudo de um ambiente universitário.** Porto Alegre: Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, 2005.

SOUZA, Fabiano Alves. **Detecção de falhas em sistema de distribuição de energia elétrica usando dispositivos programáveis.** Ilha Solteira: Faculdade de Engenharia – UNESP, 2008.

Identificação das fontes de energias renováveis

Convite ao estudo

Caro aluno, nesta unidade daremos continuidade à Unidade 3, em que estudamos as falhas e os distúrbios do sistema elétrico, e também retomaremos alguns conceitos da Unidade 1, especialmente as fontes de energias renováveis. Vamos nos aprofundar no estudo do setor energético do Brasil, analisando algumas tecnologias para armazenamento de energia e o potencial de algumas fontes renováveis, além de entender como se realizam estudos de viabilidade de energias renováveis. Um ponto muito importante desta unidade será o estudo detalhado de duas fontes renováveis de energia, a eólica e a solar fotovoltaica. Além disso, você terá a oportunidade de entender o funcionamento dos sistemas interligados e isolados de energia do Brasil e da microgeração de energia elétrica.

Na primeira seção, estudaremos o desenvolvimento de tecnologias para energias renováveis e para armazenamento de energia elétrica, o potencial de geração de energias renováveis no Brasil e os estudos de viabilidade de projetos de energias renováveis. Na segunda seção, entenderemos melhor as características das centrais de geração de energia eólica e solar fotovoltaica. Na última seção, estudaremos os sistemas interligados e isolados de energia elétrica e como a microgeração de energia se insere no setor elétrico. Ainda nessa seção, analisaremos a importância das energias renováveis, da eficiência energética e da microgeração para o sistema elétrico.

Retomando o contexto de aprendizagem, você, aluno, é o superintendente de recursos energéticos da empresa pública de planejamento energético do Brasil e vai se envolver em várias tarefas que vão demandar uma visão integrada do setor

elétrico e das fontes renováveis de energia.

Portanto, temos como objetivo desta unidade que você, aluno, possa compreender o potencial elétrico no contexto nacional e ter visão a respeito do futuro das fontes renováveis. Com isso, você poderá analisar a viabilidade da utilização de fontes de energia, especialmente as renováveis, e compreender como isso se insere no planejamento energético de uma empresa, região ou país.

Bons estudos e um ótimo trabalho nesta nova etapa!

Seção 4.1

Desenvolvimento tecnológico e viabilidade das energias renováveis

Diálogo aberto

Caro aluno, nesta seção, estudaremos o desenvolvimento de tecnologias para energias renováveis e para armazenamento de energia elétrica e também avaliaremos os seus respectivos potencial e viabilidade. Esse conhecimento é a base para o planejamento e desenvolvimento das energias renováveis e do setor elétrico como um todo.

Por isso, considere que você é um engenheiro da superintendência de recursos energéticos da empresa pública de planejamento energético do Brasil e foi convocado a participar de uma comissão que definirá as prioridades para um programa nacional de incentivo à pesquisa e ao desenvolvimento em energias renováveis. O programa será subdividido em cinco partes, referentes a cada uma das regiões do Brasil, para agregar as diferentes características e realidades do país.

Assim, elabore um documento com as premissas do programa de pesquisa e desenvolvimento, definindo e justificando quais tecnologias para energias renováveis devem ser pesquisadas em cada região, considerando a distribuição geográfica do potencial de geração e quais tecnologias de armazenamento de energia elétrica devem ser pesquisadas.

Também deixe claro em algum ponto do documento a importância do desenvolvimento de tecnologias, como inversores de frequência, controladores de carga, baterias, etc., para a integração das fontes renováveis com o sistema elétrico, além das próprias tecnologias de geração de energia. Solicite que as pesquisas analisem a viabilidade das tecnologias empregadas e explique a importância dessa análise.

Discuta o assunto usando os conceitos apresentados na disciplina, como as tecnologias de armazenamento disponíveis no mercado e em desenvolvimento, e também o potencial das fontes de energias renováveis de cada região do Brasil. Aproveite para fazer considerações além das apresentadas para detalhar a situação e justificar melhor sua decisão.

Caro superintendente de recursos energéticos, você está preparado para resolver essa nova tarefa?

Espero que esteja animado. Bons estudos e um ótimo trabalho!

Não pode faltar

Desenvolvimento de tecnologias para energias renováveis

A participação das fontes renováveis de energia na matriz energética mundial vem crescendo devido, principalmente, à necessidade de redução de emissões de gases de efeito estufa e de poluentes atmosféricos. Esse movimento está ocorrendo com mais força em alguns países da Europa, que definiram metas de uso de energias renováveis e, para alcançá-las, ofereceram subsídios à energia gerada a partir dessas fontes. Isso, somado ao aumento da demanda energética mundial pelo crescimento populacional e aumento do consumo por habitante, gerou um movimento local e depois mundial de desenvolvimento e inovação tecnológica em busca de mais eficiência e menor custo na geração de energia a partir de fontes renováveis.

Além do desenvolvimento da tecnologia para geração de energia renovável em si, é imprescindível que haja soluções para inserção das energias renováveis no sistema elétrico nacional. No caso das fontes renováveis intermitentes e não despacháveis, como eólica, solar e das ondas, é necessário haver meios de solucionar problemas de estabilidade e garantia de abastecimento. Para isso, há uma série de possibilidades, como a ampliação do sistema de transmissão, o armazenamento de energia elétrica, a mudança de operação das atuais usinas, a gestão e a flexibilização da carga (incentivo ao consumo em horários fora de ponta), a geração distribuída, entre outros.

As fontes renováveis que mais tiveram desenvolvimento nos últimos tempos foram a eólica e a solar fotovoltaica, e, por isso, mais

adiante teremos seções dedicadas a essas fontes. No entanto, todas as outras fontes renováveis citadas na Unidade 1 desta disciplina também estão tendo avanços tecnológicos significativos, tornando-se mais eficientes e viáveis.

Uma das tecnologias em desenvolvimento mundial é o conceito de cidades inteligentes ou *smart cities*, que, basicamente, é o uso de tecnologias avançadas de informação e comunicação que melhorem a infraestrutura dos centros urbanos com o objetivo de criar condições de sustentabilidade. Uma das áreas de estudo das cidades inteligentes é a integração de fontes de energias renováveis, tecnologias de armazenamento e tecnologias de comunicação que tornem o sistema elétrico mais eficiente e dinâmico.



Refleta

Como as cidades inteligentes podem ser mais eficientes no uso da energia elétrica? Já existem tecnologias relacionadas a cidades inteligentes disponíveis no mercado e sendo utilizadas? Como esse conceito em desenvolvimento no mundo interfere na sua formação técnica e na sua atuação profissional?

Desenvolvimento de tecnologias para armazenamento de energia elétrica

Com a tendência de crescimento do uso de energias renováveis intermitentes, como a solar e a eólica, surgem desafios de integração e gerenciamento. Por isso, tornou-se importante armazenar a energia elétrica gerada de forma irregular ao longo do dia, para ser utilizada nos horários de maior demanda para complementar a matriz energética.

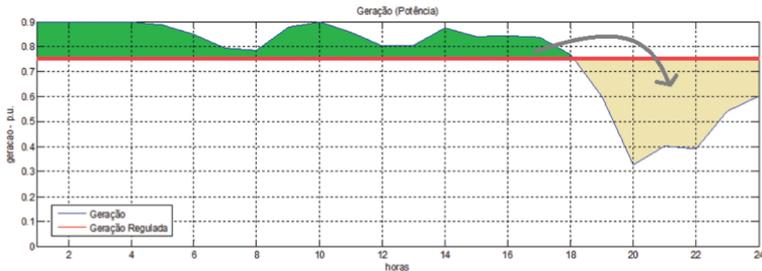


Exemplificando

A Figura 4.1 ilustra uma curva da geração de energia elétrica de uma fonte eólica em um dia qualquer, e como funcionaria um sistema de armazenamento para gestão da geração. Na parte em verde, a geração acima da quantidade necessária (linha vermelha) é armazenada por algumas horas para ser utilizada nas horas em que a geração está abaixo

da necessidade (parte amarela do gráfico). Isso permitiria que uma fonte intermitente como a eólica ou a solar, passasse a ser constante.

Figura 4.1 | Exemplo de curva de geração de energia elétrica de fonte eólica em 24h



Fonte: adaptada de Tolmasquim (2016).

As tecnologias para armazenamento têm características distintas, como capacidade, potência, tempo de resposta, peso, volume e temperatura de operação. Além disso, as tecnologias podem estar maduras e consolidadas no mercado ou ainda em desenvolvimento e com altos custos para uso. Sendo assim, a seguir, apresentamos algumas das tecnologias disponíveis para armazenamento de energia elétrica:

- **Armazenamento hídrico convencional:** tecnologia muito consolidada e largamente aplicada na geração de energia hidrelétrica. Basicamente é a utilização de barragens para armazenar água e utilizá-la quando houver demanda de energia.
- **Armazenamento hídrico por bombeamento:** essa tecnologia emprega o bombeamento de água para um reservatório mais elevado e, a partir disso, o funcionamento é similar ao armazenamento hídrico convencional, diferindo por ocorrerem mais ciclos de carga e descarga. A capacidade de armazenamento varia entre 100 MW a 3000 MW. A energia elétrica necessária pode vir do sistema interligado, em momentos de preços baixos, ou pela integração com fontes intermitentes, como eólica e solar, em momentos

de excesso de oferta. Desconsiderando-se a armazenagem hídrica convencional por não possuir dados globais de disponibilidade, o bombeamento é a tecnologia mais utilizada mundialmente (IEA, 2014).

- **Armazenamento de energia por ar comprimido:** quando há disponibilidade de energia elétrica a baixo custo, o ar comprimido é armazenado em locais como cavidades subterrâneas para ser utilizado posteriormente em uma turbina a gás convencional com o combustível. A capacidade de armazenamento é alta, sendo acima de 100 MW, porém, essa tecnologia depende de condições geológicas favoráveis. Já é utilizada comercialmente, mas ainda não é madura e demanda desenvolvimento para melhoria da eficiência e uso em maior escala.

- **Armazenamento térmico de energia:** opera basicamente aproveitando a capacidade de os materiais manterem a temperatura baixa ou alta e serem armazenados em espaços com isolamento térmico. O calor ou o frio recuperado são utilizados para gerar energia elétrica ou para reduzir seu consumo em aplicações térmicas, como ar-condicionado. As tecnologias de armazenamento térmico podem ser à baixa temperatura (aquífero, gelo, criogênico) ou à alta temperatura.

- **Armazenamento eletroquímico de energia:** refere-se às baterias, como de chumbo ácido, níquel-cádmio, hidretos de níquel-metal, sódio-enxofre, cloreto de sódio-níquel, lítio, entre outras. O princípio do funcionamento de baterias é a existência de células eletroquímicas contendo um eletrólito (meio líquido, pastoso ou sólido de transferência de íons entre eletrodos) e eletrodos negativos (denominados ânodos, que fornecem elétrons, sendo oxidados durante a reação eletroquímica de carga ou descarga) e positivos (ou cátodos, que recebem elétrons, sendo reduzidos durante a reação). No caso específico da bateria que permite recarga, durante sua descarga, elétrons se movem espontaneamente ao eletrodo com maior eletronegatividade; já durante a sua carga, uma voltagem externa é aplicada, forçando elétrons a se moverem ao eletrodo de menor eletronegatividade (LUND et al., 2015).



Outras tecnologias inovadoras para armazenamento são as células de hidrogênio, o armazenamento hidráulico em pistão rochoso, o armazenamento magnético por supercondução, os capacitores e os supercapacitores e os volantes de inércia. Busque mais informações sobre essas tecnologias em:

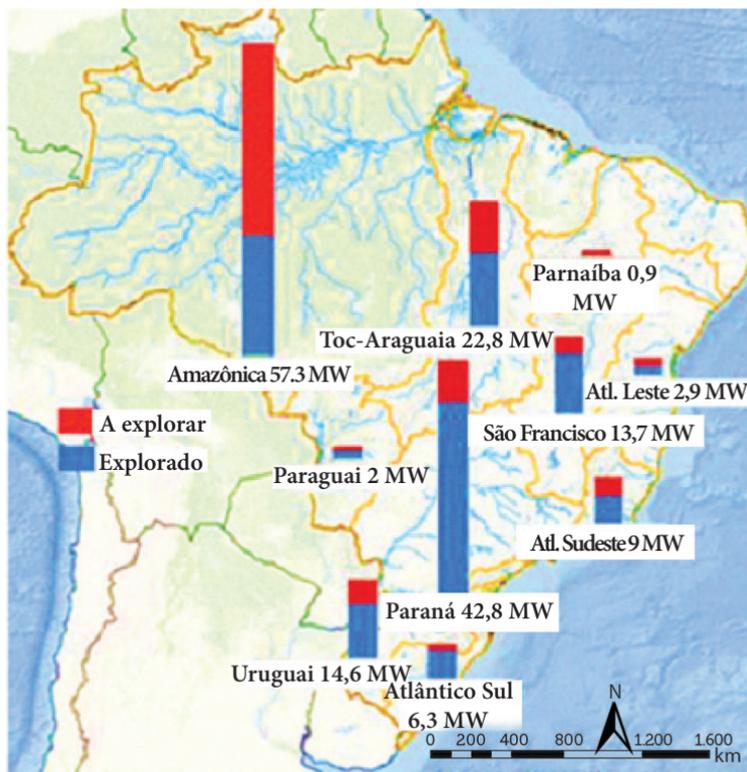
BUENO, A. F. M.; BRANDÃO, C. A. L. Tecnologias. In: _____. **Visão geral de tecnologia e mercado para os sistemas de armazenamento de energia elétrica no Brasil**. Belo Horizonte, p. 8-23. Disponível em: <http://www.abaque.com.br/Estudo_Mercado_Armazenamento_Brasil.pdf>. Acesso em: 9 dez. 2016.

Potencial de geração de energias renováveis no Brasil

Conhecer e analisar o potencial das fontes de energia de um país é uma etapa prioritária do seu planejamento energético e para a tomada de decisão de investidores e empresas. Nesse sentido, o potencial de cada fonte precisa ser analisado do ponto de vista da quantidade e da distribuição no território.

Sobre o potencial hidrelétrico do Brasil, estima-se que haja 67,7 GW de capacidade elétrica ainda disponíveis para exploração, sendo que 104,6 GW já foram explorados, totalizando 172 GW (TOLMASQUIM, 2016). Na Figura 4.2 está a distribuição desse potencial por região hidrográfica.

Figura 4.2 | Potencial hidrelétrico por região hidrográfica



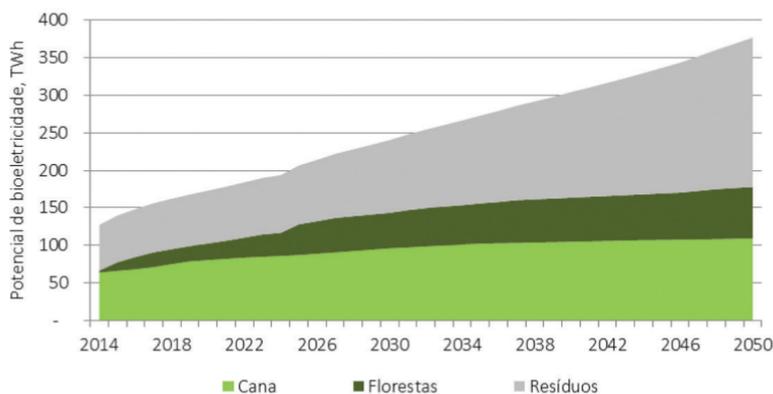
Fonte: adaptada de Tolmasquim (2016).

Pode-se observar que o maior potencial de hidroeletricidade a ser explorado no Brasil está localizado na região amazônica com 35,4 GW a explorar dos 57,3 GW total. No entanto, seu aproveitamento é dificultado pelos impactos ambientais de grandes empreendimentos e pelas distâncias aos grandes centros consumidores, o que encarece o transporte da energia elétrica produzida. Destaca-se que o potencial hidrelétrico a ser aproveitado não pode ser considerado estático, principalmente em um estudo de planejamento de longo prazo, podendo haver alguns aproveitamentos superdimensionados e outros subdimensionados, dependendo da evolução das hipóteses consideradas na concepção dos projetos (TOLMASQUIM, 2016).

Outra fonte renovável importante para o Brasil é a biomassa, que tem grande potencial para geração de energia elétrica, denominada

aqui de bioeletricidade. Para a biomassa proveniente da cana-de-açúcar, de florestas energéticas e dos resíduos (agrícola, pecuária e urbanos), a oferta potencial de bioeletricidade gerada de forma centralizada foi de cerca de 127 TWh em 2014 e a estimativa do Plano Nacional de Energia para 2050 é que o potencial pode chegar a cerca de 380 TWh. Na Figura 4.3, é apresentada a estimativa de crescimento da oferta de bioeletricidade no Brasil para geração centralizada até 2050.

Figura 4.3 | Oferta potencial de bioeletricidade em geração centralizada até 2050



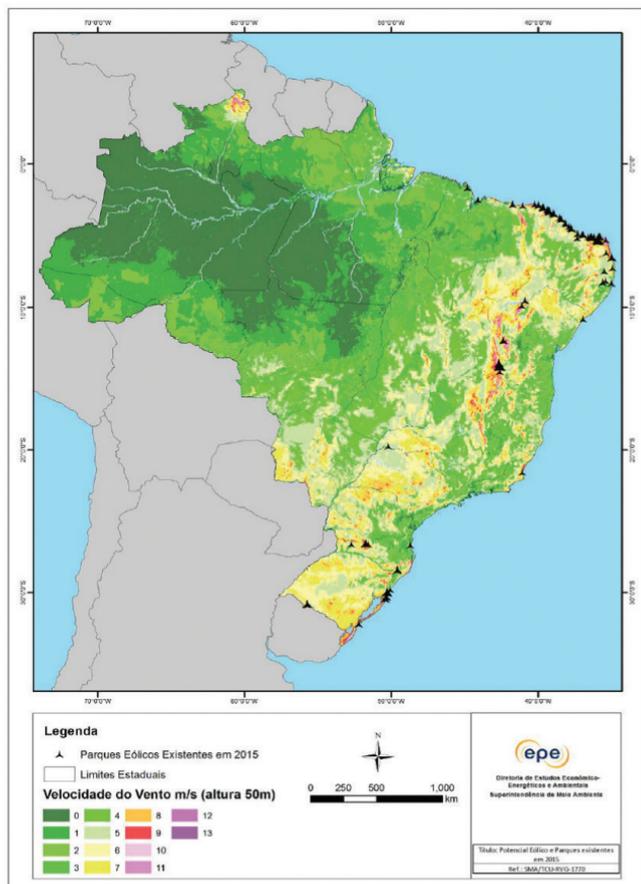
Fonte: adaptada de Tolmasquim (2016).

Com relação à fonte eólica, o potencial de geração de energia elétrica aumenta conforme as tecnologias evoluem e permitem que os geradores sejam instalados em maiores alturas. Estudos indicam que o potencial de geração de energia eólica do Brasil a 150 m de altura é de 440 GW (TOLMASQUIM, 2016). Desse potencial, 10,34 GW já estão sendo explorados (ABEEOLICA, 2016).

A Figura 4.4 mostra o potencial dos ventos para a altura de 50 m no Brasil de acordo com o atlas de 2001, com a localização dos parques eólicos em operação. Pode-se perceber que os sítios indicados como de melhor recurso eólico estão sendo explorados, com ênfase para a região Nordeste. O perfil geral de circulação atmosférica no Brasil apresenta variações significativas por diferenças em propriedades de superfícies, tais como geometria e altitude de terreno, vegetação e distribuição de superfícies de terra

e água, além de diferentes afetações por sistemas atmosféricos (AMARANTE et al., 2001).

Figura 4.4 | Potencial dos ventos para a altura de 50 m e localização dos parques eólicos em operação no Brasil



Fonte: adaptada de Tolmasquim (2016).

No caso da fonte solar, a localização do Brasil quase que totalmente nos trópicos possibilita que haja uma incidência mais vertical dos raios solares, até mesmo durante o inverno, ou seja, maior radiação solar e, conseqüentemente, maiores níveis de produção de energia por painéis fotovoltaicos, tornando essa fonte vantajosa. A Figura 4.5 apresenta os dados brasileiros de irradiação direta normal, adequados às aplicações heliotérmicas e fotovoltaicas, e é bastante nítido que

há regiões com maior irradiação diária, como o oeste da Bahia e o Vale do São Francisco. No entanto, destaca-se que praticamente todo o território brasileiro está na faixa de variação da irradiação global horizontal anual de 1.500 a 2.200 kWh/m², tornando-o elegível à geração solar fotovoltaica. Como referência, a Alemanha, um dos países com maior capacidade instalada fotovoltaica, possui irradiação entre 900 e 1.250 kWh/m² (PEREIRA et al., 2006).

Ao considerar apenas a faixa de melhor irradiação (6.000 a 6.200 Wh/m²) e áreas antropizadas (áreas onde há ocupação/modificação humana), estima-se a possibilidade de instalação de 307 GWp em centrais fotovoltaicas, com geração aproximada de 506 TWh/ano (TOLMASQUIM, 2016).

Figura 4.5 | Mapa de irradiação solar direta normal diária do Brasil



Fonte: adaptada de Tolmasquim (2016).

Além dessas fontes de energia elétrica, estima-se que o potencial de geração a partir das ondas no Brasil seja de 87 GW e a partir das marés seja de 27 GW (TOLMASQUIM, 2016). A extensa costa brasileira e as vastas áreas de mar territorial são condições naturais para o aproveitamento energético dos recursos do mar.

Estudo de viabilidade de projetos de energias renováveis

Estudos de viabilidade são muito utilizados para analisar a viabilidade de um projeto ou empreendimento, buscar recursos com investidores ou financiadores, analisar riscos, comparar cenários e comparar tecnologias e questões técnicas. Por isso, podem ter diversos enfoques, como econômico-financeiro, técnico, legal, operacional, ambiental, de mercado, entre outros.

Para uma avaliação técnica, é necessário analisar alguns aspectos, como o estágio de desenvolvimento da tecnologia, o desempenho, a segurança, a confiabilidade, os aspectos ambientais, entre outros. Nesse caso, as tecnologias são comparadas no sentido de analisar vantagens e desvantagens.

Entretanto, qualquer decisão técnica precisa também levar em conta aspectos econômicos e financeiros, pois estão diretamente ligados. Por isso, é necessário realizar uma análise de viabilidade econômico-financeira que pode utilizar de diversos métodos, escolhidos conforme a situação e o objetivo. Alguns desses métodos são: análise de investimento por fluxo de caixa, análises de elasticidade, análise de cenários, análise de sensibilidade e simulações, etc.

Um dos métodos consolidados e muito empregado é a análise de investimento por fluxo de caixa, que considera o investimento, as receitas, os custos de operação e manutenção, os impostos, os juros e qualquer valor financeiro que pese sobre o projeto dentro de um horizonte de tempo definido para o projeto. Com esse fluxo de valores organizado, é possível calcular alguns indicadores, como o Valor Presente Líquido (VPL), a Taxa Interna de Retorno (TIR) e o Tempo de Retorno do Investimento (*payback*). Assim, diferentes cenários técnicos, econômicos e financeiros podem ser analisados a partir da comparação entre os indicadores obtidos.

A análise de viabilidade de projetos de energias renováveis é feita com os métodos já descritos, mas há algumas particularidades, no caso de fontes com uso ainda em crescimento, como eólica, solar, biogás, maremotriz, etc. Isso se deve ao fato de serem utilizadas tecnologias nem sempre disponíveis em larga escala no mercado, haver incertezas em relação aos custos de operação e manutenção e incertezas de investidores e financiadores sobre a eficiência e a confiabilidade da tecnologia. Isso tudo aumenta a percepção de risco do projeto e, conseqüentemente, as taxas de juros de financiamento e as estimativas de custo e de investimento, pois é necessário maior provisionamento de recursos para possíveis falhas ou aumentos de custos.

Assim, é muito importante analisar a viabilidade de um empreendimento de energias renováveis na fase de planejamento, garantindo que será sustentável e trará os benefícios esperados.



Assimile

Conhecer o potencial da fonte de energia é essencial para o estudo de viabilidade de implantação do seu aproveitamento energético. Para estudos iniciais de viabilidade, podem ser utilizados dados mais gerais e em nível regional ou nacional. No entanto, para o estudo de viabilidade mais detalhado, é necessário ter dados de potencial de geração mais precisos e localizados. Assim, o estudo do potencial das fontes de energias renováveis e da viabilidade de aproveitamento é muito importante no planejamento energético do país.

Sem medo de errar

As energias renováveis vêm se tornando cada vez mais importantes no setor energético mundial, e o desenvolvimento de tecnologias eficientes para aproveitar essas fontes passa a ser imprescindível. Por isso, é tão importante que o Brasil incentive a pesquisa e o desenvolvimento em energias renováveis e se mantenha na liderança das fontes renováveis em sua matriz energética. Assim, a seguir definiremos algumas premissas para um programa de pesquisa e desenvolvimento em energias renováveis no Brasil.

Para definir quais serão as tecnologias para energias renováveis a serem inseridas no programa, faremos primeiramente uma análise do potencial de cada fonte por região do país.

- **Hidrelétrica:** o potencial hidrelétrico ainda a ser explorado se concentra na região Norte do Brasil. Há um potencial baixo ainda a ser explorado na região Nordeste, mas pode-se considerar que é insignificante perto do potencial existente no Norte.
- **Biomassa - agricultura e pecuária:** a maior produção agrícola brasileira concentra-se nas regiões Centro-Oeste, Sul e Sudeste, e isso também ocorre na pecuária. Por isso, explorar a biomassa residual dessas atividades parece ser mais viável nessas regiões. A biomassa de cana-de-açúcar, muito produzida na região Sudeste, tem um grande potencial para queima direta do bagaço e biodigestão da vinhaça para a produção de biogás. Já a biomassa residual da suinocultura, avicultura e bovinocultura de leite está mais concentrada na região Sul do país, mas há grande produção na região Sudeste e Centro-Oeste. Há ainda a biomassa residual do cultivo de soja e milho, que são produzidos principalmente na região Sul e Centro-Oeste.
- **Biomassa - urbano:** os resíduos sólidos urbanos (RSU) são produzidos em grandes centros urbanos, e, analisando a localização desses centros no país, observa-se que ficam principalmente na região Nordeste, Sul e Sudeste. Entretanto, por ser uma fonte de energia que pode apoiar a resolução de problemas ambientais, é importante que se considere o potencial dos RSU em todas as regiões.
- **Eólica:** o potencial para energia eólica no Brasil está claramente concentrado nas regiões Nordeste, Sul e Sudeste. Diversas usinas eólicas já foram instaladas no Nordeste, mas ainda há um potencial grande a ser explorado.
- **Solar fotovoltaica:** nesse caso, o potencial é considerado bom para todas as regiões do país, especialmente para a região Nordeste, Centro-Oeste e Sudeste. No Norte, por haver áreas extensas de floresta, não seria possível instalar

grandes usinas de energia fotovoltaica. No entanto, seria uma ótima alternativa para o abastecimento dos sistemas isolados de energia elétrica, que atualmente usam, na sua maioria, combustíveis fósseis, como diesel.

Para facilitar a análise, é possível classificar as fontes de energia por região segundo a prioridade baseado no potencial descrito anteriormente. No Quadro 4.1, a seguir, fizemos essa priorização entre baixa, média e alta, conforme as conclusões tiradas.

Quadro 4.1 | Prioridade para pesquisa em energias renováveis

| Fonte de energia elétrica | Região | | | | |
|---------------------------|--------|----------|-------------|-------|---------|
| | Norte | Nordeste | Cetro-Oeste | Sul | Sudeste |
| Hidrelétrica | Alta | Baixa | Baixa | Baixa | Baixa |
| Biomassa - agricultura | Baixa | Média | Alta | Alta | Alta |
| Biomassa - pecuária | Baixa | Média | Alta | Alta | Alta |
| Biomassa - urbano | Média | Alta | Média | Alta | Alta |
| Eólica | Baixa | Alta | Baixa | Alta | Alta |
| Solar fotovoltaica | Média | Alta | Alta | Média | Alta |

Fonte: elaborado pelo autor.

Atenção

Aluno, é importante que você analise não apenas o potencial em quantidade de energia a ser gerada, mas a importância daquela fonte para a região, considerando os aspectos ambientais e sociais.

Sendo assim, as prioridades do programa para as tecnologias de energias renováveis são:

- Região Norte: hidrelétrica, biomassa – urbana e solar fotovoltaica.
- Região Nordeste: biomassa residual – urbana e solar fotovoltaica e eólica.
- Região Centro-Oeste: biomassa – agricultura e pecuária e

urbana e solar fotovoltaica.

- Região Sul: biomassa – agricultura e pecuária e urbana, solar fotovoltaica e eólica.
- Região Sudeste: biomassa – agricultura e pecuária e urbana, solar fotovoltaica e eólica.

Para definir quais tecnologias de armazenamento de energia elétrica serão consideradas no programa de pesquisa em elaboração, primeiramente, é importante analisar as tecnologias que estão sendo pesquisadas mundialmente para que o país siga as tendências de inovação e se beneficie desses avanços. As tecnologias de armazenamento ainda necessitam de maiores níveis de maturidade, de maneira geral, sendo ainda um desafio determinar quem deve investir nessas tecnologias, se o consumidor final, com pequenos armazenadores e distribuídos, ou as concessionárias, com grandes centros de armazenamento e centralizados, e como elas devem ser integradas e operadas nos sistemas elétricos de potência.

O Brasil possui um grande potencial hidrelétrico que poderia ser aproveitado com tecnologias de armazenamento hídrico convencional, por barramento. No entanto, esses empreendimentos vêm tendo dificuldades para receber licenciamento ambiental por alagarem grandes áreas de terras. Então, apesar de ser uma alternativa muito viável para o país, já não é uma opção muito aplicável. O armazenamento hídrico por bombeamento seria uma alternativa interessante para aproveitar a infraestrutura existente de barragens.

Tecnologias que já vêm sendo pesquisadas no país por serem bastante promissoras, são as eletroquímicas, como as baterias e as células de hidrogênio. Apesar de serem tecnologias apenas utilizadas em projetos pilotos, seria importante investir em pesquisa e desenvolvimento para que futuramente o país possa utilizá-las. Outra tecnologia que, embora não seja muito difundida, merece ser considerada no programa para as tecnologias de energias renováveis é o armazenamento térmico realizado em usinas heliotérmicas, pois o Brasil recebe bastante irradiação solar e essa alternativa tecnológica permitiria que o fluido aquecido fosse armazenado para gerar energia elétrica em momentos de grande demanda.

Objetivos de um programa de desenvolvimento tecnológico em energias renováveis

Descrição da situação-problema

Caro aluno, considere que você ainda é o superintendente de recursos energéticos da empresa pública de planejamento energético do Brasil e agora foi convocado a participar de uma comissão que definirá as atividades que deverão ser desenvolvidas dentro do programa nacional de pesquisa e desenvolvimento em energias renováveis.

Assim, elabore um documento com as atividades e os objetivos mínimos que o programa deve ter, respondendo às seguintes perguntas:

Seria necessário estudar o potencial das fontes de energias renováveis, atualizando os bancos de dados e mapas já existentes para o país ou realizando estudos específicos para cada estado? Por quê?

Seria necessário estudar tecnologias de armazenamento de energia elétrica e analisar a aplicabilidade de cada uma em cada estado ou região? Por quê?

Seria necessário fazer análise de viabilidade de tecnologias para energias renováveis? Quais aspectos seriam considerados? Por quê?

Discuta o assunto usando os conceitos apresentados na disciplina, como as tecnologias de armazenamento, o potencial de energias renováveis do Brasil e os estudos de viabilidade.

Caro superintendente de recursos energéticos, você está preparado para resolver essa nova tarefa?

Espero que esteja animado. Bons estudos e um ótimo trabalho!

Resolução da situação-problema

Um programa de pesquisa e desenvolvimento em energias renováveis precisa analisar mais do que apenas as tecnologias para geração de energia elétrica. Por isso, o programa proposto deverá prever atividades diversas, como o estudo do potencial, as tecnologias

de armazenamento de energia elétrica e o estudo de viabilidade das tecnologias.

Uma das atividades a ser realizada no programa será o estudo do potencial das fontes de energias renováveis, focando na atualização dos bancos de dados e mapas já existentes no país. Isso é importante, pois, com o avanço das tecnologias, o potencial de geração pode ser alterado. Exemplo disso é a energia eólica, em que nos primeiros estudos de potencial se considerava a altura de 50 metros e com o avanço das tecnologias, os estudos começaram a ser feitos para alturas maiores, chegando a 150 metros, aumentando o potencial de geração elétrica dessa fonte de energia. Também será importante realizar estudos específicos para cada região, para obter dados mais detalhados e precisos, permitindo que os projetos de pesquisa e desenvolvimento para energias renováveis tenham resultados mais precisos e que os incentivos às fontes renováveis sejam mais adequadas para a realidade regional. Assim, os resultados do programa serão melhores e mais aplicáveis.

Nesse programa também deverá haver uma atividade para estudar as tecnologias de armazenamento de energia elétrica e sua aplicabilidade em cada região, para garantir que as pesquisas e, posteriormente, os investimentos sejam adequados à vocação regional.

Será imprescindível que se realizem estudos de viabilidade das tecnologias estudadas no programa, principalmente dos aspectos econômico-financeiro, técnico, legal, operacional, ambiental e de mercado. Isso aumentará a chance de que as tecnologias pesquisadas sejam utilizadas em larga escala no setor elétrico.



Faça você mesmo

Caro aluno, sugerimos que você acesse o site da Agência Nacional de Energia Elétrica e analise as tecnologias que estão sendo consideradas nas chamadas de projetos do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica. Acesse o seguinte link:

ANEEL. **Projetos de chamada estratégica.** Disponível em: <<https://goo.gl/ol3su7>>. Acesso em: 12 dez. 2016.

Aproveite essa oportunidade para conhecer mais sobre desenvolvimento tecnológico no setor elétrico!

Faça valer a pena

1. O desenvolvimento tecnológico das energias renováveis é muito importante para atender ao aumento da demanda de energia elétrica e à necessidade de redução de emissão de gases de efeito estufa. Nesse caso, o objetivo do desenvolvimento tecnológico é criar e melhorar tecnologias para torná-las acessíveis e viáveis economicamente.

Assinale a alternativa correta sobre o desenvolvimento tecnológico para as energias renováveis:

a) A geração distribuída de energia elétrica não é uma forma de integração das energias renováveis no sistema elétrico.

b) O hidrogênio como fonte de energia elétrica é uma tecnologia madura e viável economicamente, em comparação com a fonte hidrelétrica, para uso em larga escala.

c) O desenvolvimento tecnológico para geração de energia eólica ainda é insignificante.

d) Quando se fala em desenvolvimento de energias renováveis, deve-se focar apenas nas tecnologias de geração.

e) O armazenamento de energia elétrica é uma forma de garantir a estabilidade do sistema elétrico quando se considera o uso de fontes de energia intermitentes.

2. As tecnologias de armazenamento de energia possuem diversas finalidades e podem trazer vários benefícios, tanto para as concessionárias de energia como diretamente para os consumidores finais. Entre estas, uma das mais visadas e importantes funções é utilizar tais tecnologias para armazenar a energia em períodos de carga leve e despachar em horários de maior demanda, aliviando o montante produzido pela geração nesses períodos. Para isso, existem diversas tecnologias em diferentes estágios de desenvolvimento e uso.

Assinale a alternativa que não apresenta tecnologias de armazenamento de energia elétrica:

a) Baterias.

b) Células de hidrogênio.

c) Turbinas a gás.

d) Lagos de usinas hidrelétricas.

e) Ar comprimido.

3. O Brasil destaca-se mundialmente pela participação das fontes renováveis na matriz energética, principalmente hidráulica e biomassa. Além disso, ainda possui um grande potencial a ser explorado de geração

de energia elétrica a partir de fontes renováveis, como a solar e a eólica. A seguir, tem-se afirmativas sobre a participação das fontes renováveis na matriz energética do Brasil.

I. O país possui um potencial ainda pouco expressivo para geração de energia elétrica por fonte solar.

II. Grande parte do potencial hidrelétrico próximo aos grandes centros urbanos do Brasil já foi explorado.

III. O potencial eólico explorado do país concentra-se principalmente na região Nordeste.

Analisando as afirmativas, assinale a alternativa correta:

a) V, V, F.

b) V, F, F.

c) V, F, V.

d) F, V, V.

e) F, F, V.

Seção 4.2

Sistemas eólicos e fotovoltaicos

Diálogo aberto

Caro aluno, nesta seção, entenderemos melhor os conceitos da energia eólica e da energia solar fotovoltaica e como estimar a quantidade de energia elétrica que pode ser gerada a partir dessas fontes.

Assim, considere que você é um engenheiro da superintendência de recursos energéticos da empresa pública de planejamento energético do Brasil e precisa entregar um estudo prévio de potencial de geração de energia solar fotovoltaica em telhados de casas populares financiadas pelo Governo Federal. O sistema será de geração distribuída/microgeração, ou seja, estará conectado com a rede de distribuição de energia elétrica e deve ser dimensionado para atender um consumo mensal de 80 kWh na cidade de Campinas/SP.

Para esse estudo, você deve estimar a potência demandada pelo sistema e a quantidade de placas fotovoltaicas a serem instaladas. Considere que cada painel de silício policristalino terá a potência de 240 Wp. Busque dados de irradiação para a cidade de Campinas/SP no banco de dados Sundata do Cresesb (Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/sundatn.htm>>. Acesso em 2 mar. 2017) e detalhe os cálculos e as considerações feitas. Além disso, defina as características básicas do sistema como os componentes necessários.

Aproveite para calcular quanto será a economia mensal no pagamento da tarifa dessa família proprietária da casa popular, assumindo um valor de tarifa de R\$ 0,16/kWh.

Caro engenheiro, você está preparado para resolver essa tarefa?

Espero que esteja animado. Bons estudos e um ótimo trabalho!

Não pode faltar

Geradores eólicos

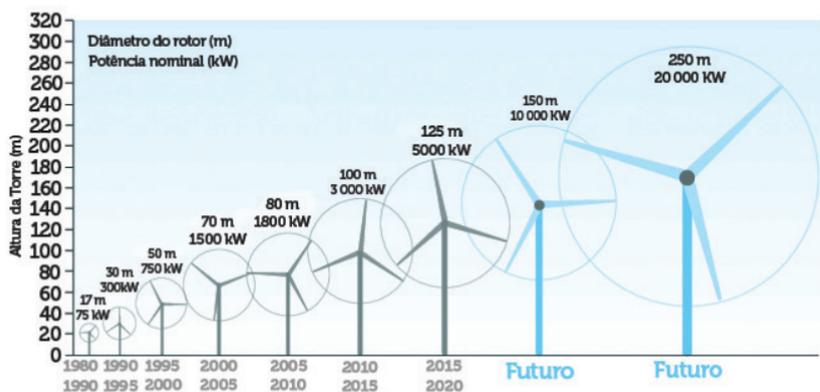
A humanidade vem utilizando os ventos para geração de energia há milhares de anos para bombeamento de água, moagem de

grãos e outras aplicações de energia mecânica. No entanto, o uso para geração de energia eólica avançou muito nas últimas décadas, após os choques no preço do petróleo e a demanda por tecnologias menos poluentes.

Como descrito na Unidade 1 desta disciplina, a energia eólica é obtida através da energia cinética dos ventos, que é convertida pela rotação das pás dos aerogeradores e geram energia elétrica em processo similar às hidrelétricas. Os ventos que sopram em escala global (gerados por diferença de pressão entre o Equador e os polos, que é consequência das diferenças de irradiação solar no globo terrestre) e aqueles que se manifestam em escala local (gerados por diferença de temperatura entre mar e terra e em regiões de montanha) são influenciados por aspectos como altitude, rugosidade do solo, presença de obstáculos e relevo. Nesse sentido, em regiões com construções baixas ou sem construções, a velocidade do vento aumenta rapidamente com a altitude, enquanto que em regiões com construções altas o vento só atinge velocidades mais altas em maiores altitudes. Assim, quanto menor é a interferência dos obstáculos do solo, menor a turbulência do vento e melhor é o aproveitamento energético. Por isso, os aerogeradores são instalados preferencialmente em regiões de maior altitude, torres mais altas, terrenos planos e com poucos obstáculos ou no mar (*offshore*).

A área de varredura também é um fator importante, e, por isso, as pás dos aerogeradores são cada vez maiores para aumentar e estabilizar a eficiência da transformação da energia contida no vento em eletricidade. Na Figura 4.6, é possível ver a evolução dos aerogeradores em relação ao diâmetro do rotor, altura da torre e potência nominal desde 1980 até uma previsão do futuro.

Figura 4.6 | Evolução dos aerogeradores: diâmetro do rotor, altura de torre e potência nominal

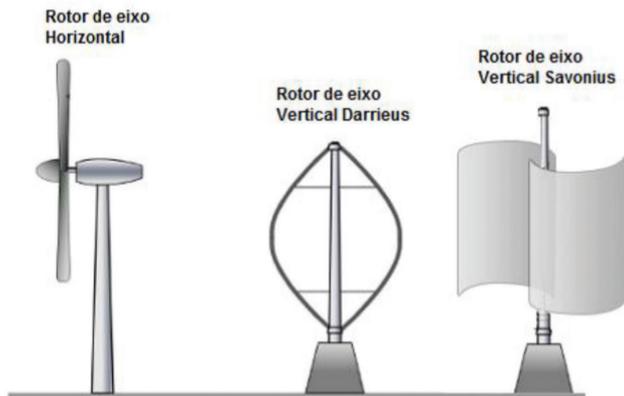


Fonte: adaptada de CGEE (2015).

Os aerogeradores possuem três elementos principais: rotor (conjunto das pás e cubo do aerogerador responsável por capturar a energia no vento), eixo (elo que transfere a energia captada no rotor para o gerador), gerador (responsável pela conversão de energia mecânica em elétrica) e vários elementos secundários que variam de acordo com o tipo e projeto do aerogerador. Existem dois tipos básicos de rotores, os de eixo vertical e os de eixo horizontal.

Os rotores de eixo vertical têm seu eixo de rotação perpendicular à direção do vento, operando com ventos de qualquer direção. Possuem duas configurações principais (Figura 4.7): Savonius (energia gerada pela força de arrasto) e Darrieus (energia gerada pela força de sustentação). Embora essas configurações sejam consideradas para parques *offshore* (no mar) por permitirem que itens do sistema, como transmissão e gerador, fiquem na parte inferior, demandando menor investimento na estrutura para manter a estabilidade, elas acabam tendo como desvantagem a eficiência no tipo Savonius e o custo da pá no caso do Darrieus. Outra oportunidade para esses geradores surge na aplicação em geração distribuída por operarem bem com mudanças de direção dos ventos e também com turbulência, que ocorre em alturas entre 10 e 20 m, e em áreas urbanas.

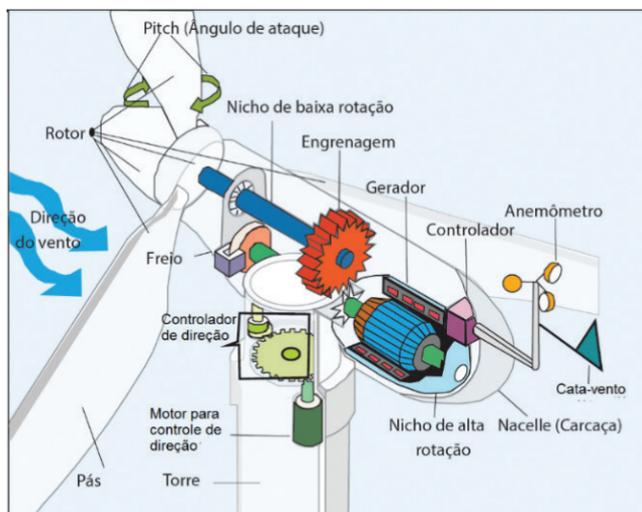
Figura 4.7 | Tipos de aerogeradores



Fonte: adaptada de Tolmasquin (2016).

Os rotores de eixo horizontal têm o eixo de rotação paralelo à direção do vento, e isso demanda um mecanismo para posicioná-lo em relação à direção do vento e tem um melhor aproveitamento, especialmente onde ocorrem muitas mudanças na sua direção. Os modelos diferem pela quantidade de pás (multipás), podendo ser de três, duas ou uma pá apenas. O rotor com três pás é o mais comum, principalmente devido à maior eficiência aerodinâmica, custo, velocidade de rotação, peso, estabilidade e ruído (Figura 4.8).

Figura 4.8 | Componentes de um aerogerador

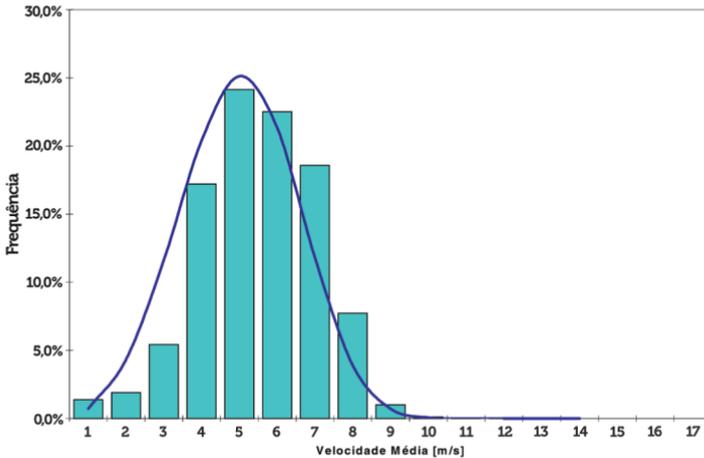


Fonte: adaptada de Neosun (2016).

Centrais de energia eólica

Para estimar o potencial de energia eólica de uma central, o primeiro passo é obter dados de medição da velocidade do vento em bancos de dados públicos ou em medições a campo (mais precisos). Com isso, obtém-se o valor de velocidade média anual do vento e a curva de frequência de ocorrência de velocidade, como o exemplo da Figura 4.9.

Figura 4.9 | Exemplo de histograma de velocidade média do vento a 30 m de altura



Fonte: adaptada de Dutra (2001).

Com os dados de velocidade do vento, é possível calcular a potência disponível com:

$$P_d = \frac{1}{2} \rho A V^3$$

em que P_d é a potência do vento, ou potência disponível [W], ρ é a massa específica do ar (em geral, utiliza-se o valor médio de 1,225 kg/m³), A é a área da seção transversal (área varrida pelas pás) [m²] e V é a velocidade do vento [m/s].



Assimile

A potência disponível varia principalmente com a velocidade do vento. Se a velocidade do vento dobra, a potência aumenta em oito

vezes, mas dobrando a área da seção transversal, a potência apenas dobra. Por isso, é tão importante escolher locais com valores altos de velocidade do vento para melhoria da viabilidade da usina.

Vale ressaltar que nem toda potência disponível no vento é convertida em energia, então os fabricantes de turbinas fornecem dados de potência gerada (P_g) e de coeficiente de potência (C_p) do sistema segundo a velocidade do vento em uma curva de potência (Figura 4.10a). É importante saber que há uma velocidade mínima e uma máxima para o funcionamento da turbina. Uma velocidade de vento menor que a mínima não possibilita que a turbina opere, e uma maior que a máxima pode prejudicar a estrutura, por isso a operação é interrompida. A relação entre a potência gerada e a disponível em um sistema eólico é dada por:

$$C_p = \frac{P_g}{P_d}$$

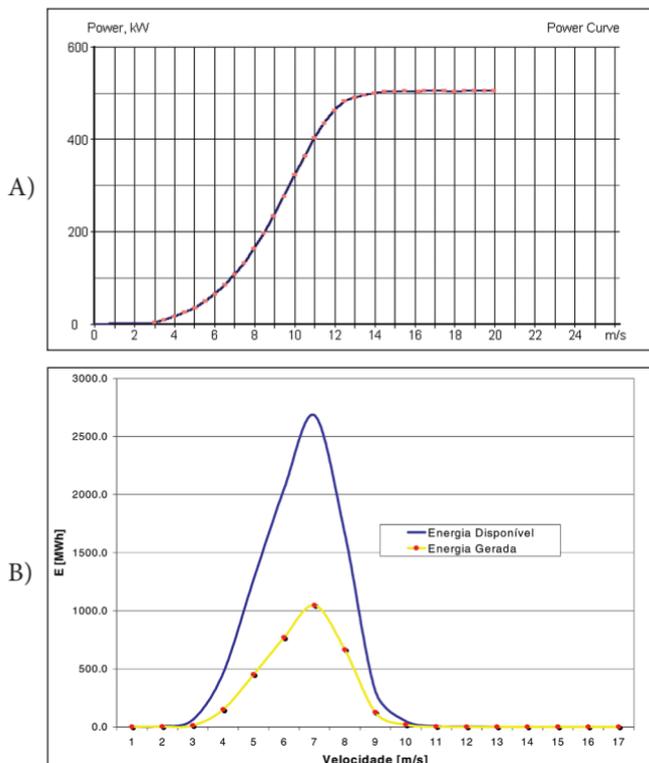
A partir disso, é possível estimar a produção de energia anual disponível (E_d) e gerada (E_g), multiplicando a potência pela quantidade de horas de produção da seguinte forma:

$$E_d = P_d \times H \quad \text{e} \quad E_g = P_g \times H$$

Se o objetivo é estimar a produção de energia operada, utiliza-se o valor de 8.760 horas, já para análises sazonais, o valor é 2.160 horas, e para análises mensais, assume-se 720 horas.

Importante destacar que há duas formas de calcular a energia gerada por uma turbina eólica: pela velocidade média anual ou pela distribuição da frequência de ocorrência das velocidades (Figura 4.10b). Para estimativas iniciais, o resultado da primeira opção é suficiente, porém, para o planejamento detalhado de um projeto de parque eólico, é necessário utilizar o segundo método.

Figura 4.10 | Exemplo de (a) gráfico de potência de turbina eólica em relação à velocidade do vento e de (b) gráfico de energia disponível e energia gerada por uma turbina eólica



Fonte: adaptada de Dutra (2001).

Uma central de energia eólica, ou parque eólico, é formada pelo conjunto de aerogeradores e equipamentos auxiliares (os centros de transformação, os inversores e os sistemas de proteção). A localização dos aerogeradores é definida conforme os dados de direção dos ventos do local e de distâncias mínimas para a melhor eficiência. Após isso, é necessário construir as fundações em concreto armado, que sustentarão as torres, e interligar os aerogeradores e os equipamentos auxiliares, para aí conectar todo o parque com a rede de transmissão.

Os parques podem ser *offshore* (no mar) ou *onshore* (em terra), sendo estes últimos a maioria. Os *offshore* são interessantes em países pequenos e regiões com poucas áreas disponíveis para instalação ou com melhor potencial no mar. Os sistemas de geração eólica são classificados em:

- Centralizados: grandes aerogeradores (maiores que 100 kW) organizados em conjunto, formando parques eólicos ligados aos sistemas elétricos (regionais ou nacionais).
- Distribuídos: pequenos aerogeradores que fornecem energia diretamente para casas, fazendas e indústrias. Podem estar conectados com a rede de distribuição e compensar parte do consumo de energia elétrica na fatura da concessionária ou isolados em locais distantes da rede de distribuição ou onde for mais viável economicamente a autoprodução.



Pesquise mais

Há diversas ferramentas e aplicativos que facilitam o dimensionamento e o planejamento de parques eólicos. Uma delas é o RETScreen, software de gerenciamento de energias limpas disponível no site do governo do Canadá. Permite identificar e avaliar a viabilidade técnica e financeira de projetos, medir e verificar o desempenho de instalações e encontrar oportunidade para melhorar a produção de energia. Está disponível em:

NATURAL RESOURCES CANADA. Energy. Energy Resources. Data Analysis Software and Modelling Tools. **RETScreen**. Disponível em: <<http://www.nrcan.gc.ca/energy/software-tools/7465>>. Acesso em: 21 jan. 2017.

Geradores fotovoltaicos

Como explicado na Unidade 1, a energia solar fotovoltaica é gerada pela aplicação do princípio que um material semicondutor, quando exposto à radiação solar, transfere elétrons da banda de valência de uma partícula para a banda de condução (efeito fotovoltaico). As placas são fabricadas para que aproveitem o movimento de emissão e retorno do elétron para criar uma diferença de potencial e, portanto, tensão, para que, assim, gere energia elétrica.



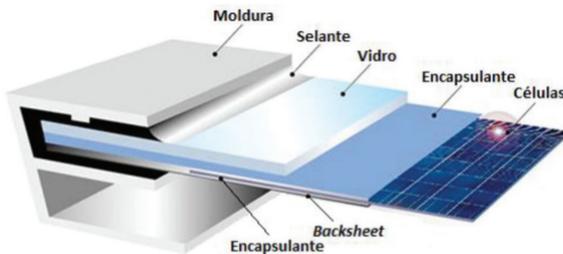
Exemplificando

É muito comum pessoas se depararem com um painel fotovoltaico e com um painel para aquecimento de água instalados nas edificações e acharem que se trata do mesmo equipamento com o mesmo princípio de funcionamento, não é verdade? Por isso, entenda a principal diferença entre eles. No painel solar fotovoltaico, a radiação

solar é transformada em energia elétrica. No painel de aquecimento de água, a radiação solar é armazenada diretamente na forma de energia térmica para aquecer a água que circula no sistema. Essa água é utilizada em chuveiros domésticos, por exemplo.

As placas ou os módulos fotovoltaicos são formadas por células solares conectadas em série ou em paralelo, montadas em quadro geralmente de alumínio e cobertas por um encapsulamento que as protege juntamente com suas conexões da ação do tempo e dos eventuais impactos. Há também uma camada de vidro e um material selante que une todas as camadas (Figura 4.11).

Figura 4.11 | Camadas de um módulo fotovoltaico típico



Fonte: adaptada de Tolmasquin (2016).

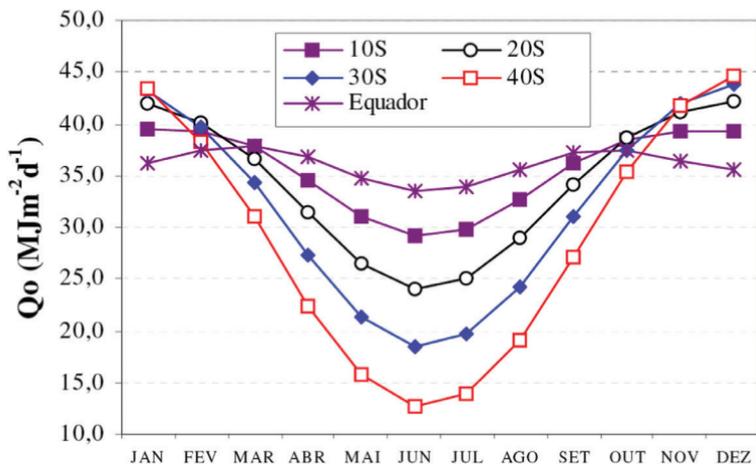
Entre os sistemas que aproveitam a energia solar para geração de eletricidade, uma das vantagens dos sistemas fotovoltaicos é a geração de energia elétrica diretamente pelas placas fotovoltaicas, enquanto que os heliotérmicos necessitam primeiramente armazenar a energia térmica para posteriormente transformá-la em energia elétrica. Além disso, os equipamentos não possuem muitas peças mecânicas móveis que demandem manutenção periódica, além da limpeza periódica das placas para garantir a passagem dos raios solares. Outra vantagem é serem moduláveis, facilitando a adaptação à área disponível para instalação.

Os principais tipos de células fotovoltaicas disponíveis são de silício cristalino (monocristalino e policristalino) e filmes finos (silício amorfo hidrogenado, telureto de cádmio e disseleneto de cobre (gálio) e índio (CIS e CIGS)). A eficiência do silício monocristalino é

de 17 a 21,5% e a do policristalino é de 14 a 17%, para silício amorfo é de 4 a 8%, para telureto de cádmio é de 10 a 16,3% e de disseleneto de cobre é 12 a 14,7% (TOLMASQUIN, 2016). A eficiência do silício cristalino faz com que seja o mais utilizado atualmente, apesar de ter custos mais elevados.

Nem toda a superfície da Terra é perpendicular à radiação do sol, e o ângulo de incidência dos raios solares é diferente em cada ponto, e, por isso, há uma redução da irradiância solar quanto mais longe da linha do Equador se está. Como há uma mudança do ângulo de rotação da Terra ao longo do ano, a irradiação solar também varia conforme a região do planeta. Regiões mais distantes da linha do Equador têm uma variação maior do que as próximas. O gráfico da Figura 4.12 apresenta a variação da irradiação solar média diária em megajoule por metro quadrado por dia ($\text{MJ}/\text{m}^2/\text{dia}$) para cada mês de um ano conforme a localização, indo desde a linha do Equador até a latitude de 40° para o sul ou 40S (região próxima ao polo sul).

Figura 4.12 | Variação da irradiação solar média diária conforme a localização no globo terrestre (latitude)

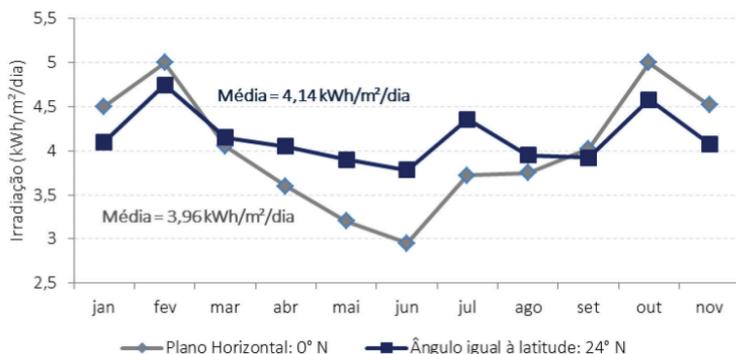


Fonte: adaptada de Tolmasquin (2016).

No entanto, esse efeito pode ser atenuado se os painéis solares tiverem uma inclinação em direção ao Norte (no Hemisfério Sul), com o mesmo ângulo da latitude local. No gráfico da Figura 4.13, é

possível observar como essa inclinação melhora a irradiação em uma placa solar ao longo do ano.

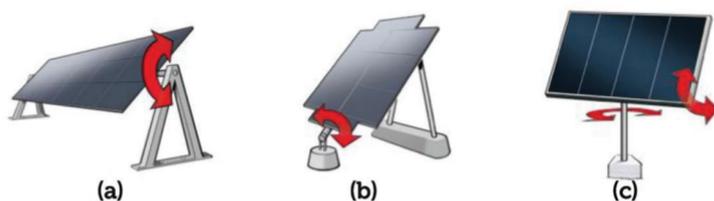
Figura 4.13 | Gráfico de irradiação global nos planos horizontal e inclinado ao longo de um ano



Fonte: adaptada de Tolmasquin (2016).

Outra forma de melhorar a irradiação solar sobre uma placa solar ao longo de um dia, é utilizar mecanismos de seguimento do sol de um ou dois eixos (Figura 4.14).

Figura 4.14 | Sistemas de seguimento solar de (a), (b) um e (c) dois eixos



Fonte: adaptada de Tolmasquin (2016).

Essa tecnologia é mais utilizada em centrais instaladas no solo, mas gera altos custos de instalação e manutenção, o que demanda avaliação prévia de viabilidade.

Centrais de geração fotovoltaica

Da mesma forma que a energia eólica, a solar fotovoltaica pode ser gerada em pequenas centrais com o objetivo de atender uma

comunidade isolada. Outra possibilidade é a instalação em uma residência para conexão com a rede de distribuição e compensação do consumo de energia elétrica na fatura da concessionária. Há também a possibilidade de instalação de diversos módulos em grandes centrais de geração. Os componentes básicos de qualquer sistema são o módulo fotovoltaico, o inversor (convertem corrente contínua em corrente alternada), os conectores, os cabos, as estruturas e os componentes elétricos. Entretanto, para o caso de sistemas isolados, é necessário haver controlador de carga e bateria para armazenar a energia excedente (Figura 4.15).

Figura 4.15 | Componentes dos sistemas de geração de energia fotovoltaica



Fonte: adaptada de Tolmasquin (2016).

Para o caso de instalação em uma residência, o primeiro passo para dimensionar o sistema de geração fotovoltaica é calcular o consumo médio diário de energia elétrica (E) em Wh/dia, utilizando os valores dos últimos 12 meses. Também é necessário ter os dados de irradiação da região onde a residência está localizada. Uma das fontes de dados disponível publicamente para o território nacional é o banco de dados Sundata (Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/sundatn.htm>>. Acesso em: 2 mar. 2017.). Tendo as coordenadas geográficas do local, é possível consultar a ferramenta e obter os dados de irradiação diária média (H_d) em kWh/m²/dia, para quatro

ângulos: plano horizontal, ângulo igual à latitude, maior média anual e maior mínimo mensal. Para o caso do sistema conectado à rede de distribuição, o indicado é utilizar a irradiação média diária no ângulo que fornece o maior valor médio diário anual de irradiação solar, tentando aproveitar ao máximo a energia disponível no local.

Outra etapa é a escolha do módulo fotovoltaico e, assim, a coleta de dados da especificação técnica, necessários para o cálculo de sua eficiência (η), como: área do módulo (A_m) em metros quadrados [m^2], a potência de pico ou ponto de máxima potência que o módulo pode estabelecer sob as condições padronizadas (P_{mpp}) em watt pico [Wp]. A potência de pico de um determinado sistema fotovoltaico que funcione em corrente contínua é a potência obtida quando a placa é irradiada por uma luz que simula a luz solar com a potência de 1000 W/m^2 , à temperatura de $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Assim, a eficiência pode ser calculada dividindo-se a potência de saída por metro quadrado do módulo (W/m^2) pela potência de entrada do módulo em 1 metro quadrado, ou seja, a potência de 1000 W/m^2 irradiada, conforme esta equação:

$$\eta = \frac{P_{mpp}}{A_m \left[1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]}$$

A partir disso, é possível calcular a quantidade de módulos (Q_m) que será necessária para atender o consumo médio diário de energia elétrica (E).

$$Q_m = \frac{E}{H_t \times \eta \times A_m}$$

Assim, pode-se calcular a área total necessária para o sistema, multiplicando-se a área de cada módulo pela sua quantidade. Também é possível estimar a potência total do sistema, multiplicando a quantidade de módulos pela sua potência de pico.



Refleta

A energia solar fotovoltaica é considerada uma energia limpa, porém, será que a produção das placas fotovoltaicas gera impactos

ambientais? E qual será o destino das placas depois que acabar a vida útil? É possível reciclar?

Sem medo de errar

Para realizar o estudo prévio de potencial de geração de energia solar fotovoltaica em telhados de casas populares financiadas pelo Governo Federal, o primeiro passo é estimar a potência demandada pelo sistema de geração de energia solar fotovoltaica. Portanto, deve-se calcular o consumo médio diário de energia elétrica (E) da residência. Para isso, divide-se o consumo mensal, que é de 80 kWh/mês por 30 dias e se obtém o valor de 2,667 kWh/dia ou 2.667 Wh/dia.

A outra etapa do cálculo é obter o valor de irradiação média diária no ângulo que fornece o maior valor médio diário anual de irradiação solar (H_t), já que o projeto será conectado à rede de distribuição. As coordenadas geográficas de um ponto de Campinas são -22,890492, -47.076905 e, com isso, obtém-se a irradiação de 5,18 kWh/m²/dia ou 5.180 Wh/m²/dia para o ângulo 22°.

A seguir, escolheremos um modelo de módulo solar fotovoltaico. O modelo hipotético escolhido tem a seguinte especificação técnica: potência de pico (P_{mpp}) é 240 Wp e área é 1,6 m² por módulo. A eficiência (η) desse módulo é calculada então pela seguinte equação:

$$\eta = \frac{\frac{P_{mpp}}{A_m}}{1000 \left[\frac{W}{m^2} \right]} = \frac{\frac{240}{1,6}}{1000} = 0,15$$

Utilizando-se esses dados, é possível estimar a quantidade de módulos necessários com:

$$Q_m = \frac{E}{H_t \times \eta \times A_m} = \frac{2.667}{5.180 \times 0,15 \times 1,6} = 2,1$$

Assim, serão dois módulos, que juntos ocuparão uma área de $3,2 \text{ m}^2$ do telhado da casa e terão uma potência pico de 480 Wp .

Além disso, o sistema deverá ter conectores, estruturas metálicas de suporte e outros componentes elétricos e um inversor de corrente contínua para alternada.

Se o consumo de energia elétrica da família era de 80 kWh/mês e a tarifa para uma família de baixa renda é de $\text{R\$ } 0,16/\text{kWh}$, multiplicando os dois valores, conclui-se que a família economizará $\text{R\$ } 12,80/\text{mês}$. Considerando que a família para a qual se destina o programa de moradias populares é de baixa renda, essa economia mensal é um valor considerável.

Imaginando que a família não tivesse direito à tarifa reduzida e tivesse que pagar $\text{R\$ } 0,44/\text{kWh}$, a economia passaria a ser de $\text{R\$ } 35,20/\text{mês}$.



Atenção

Aluno, preste atenção nas unidades de medida utilizadas para que os resultados sejam corretos. A irradiação é dada em $\text{Wh/m}^2/\text{dia}$, então, a demanda de energia deve ser convertida de kWh/dia para Wh/dia .

Avançando na prática

Estimativa de potência de uma usina fotovoltaica

Descrição da situação-problema

Considere que você é um engenheiro da superintendência de recursos energéticos da empresa pública de planejamento energético do Brasil e precisa entregar um estudo prévio de potencial de geração de energia solar fotovoltaica em uma usina solar fotovoltaica. O sistema deverá gerar $1 \text{ MWh}/\text{dia}$ e ser instalado em um local com mais de $5,80 \text{ kWh/m}^2/\text{dia}$.

Calcule a potência total do sistema e a quantidade de placas fotovoltaicas a serem instaladas. Considere que cada painel terá a potência silício cristalino de 240 Wp e área de $1,6 \text{ m}^2$ por módulo. Busque dados de irradiação para encontrar uma localização que

se adéque ao valor mínimo pedido para a irradiação média diária no ângulo (banco de dados Sundata do Cresesb, disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/sundatn.htm>>. Acesso em: 2 mar. 2017). Escreva qual foi a cidade escolhida e detalhe os cálculos e as considerações feitas. Além disso, defina as características básicas do sistema, como os componentes necessários.

Caro engenheiro, você está preparado para resolver essa nova tarefa?

Espero que esteja animado. Bons estudos e um ótimo trabalho!

Resolução da situação-problema

Considerando que a geração de energia da usina será de 1 MWh/dia, é necessário converter esse valor para a mesma unidade da irradiação, ou seja, 1.000.000 Wh/dia.

Continuando o cálculo, vamos buscar o valor de irradiação média diária no ângulo que fornece o maior valor médio diário anual de irradiação solar (H_t). Uma localização adequada é a cidade de Fortaleza/CE, na localização geográfica -3,725915, -38,524081. Com isso, obtém-se no Sundata a irradiação média diária no ângulo de 5,83 kWh/m²/dia ou 5.830 Wh/m²/dia para o ângulo de 3°. A escolha de uma localização com irradiação maior para a instalação de uma usina fotovoltaica é importante para aumentar a geração de energia elétrica e, assim, a viabilidade técnica e econômica do empreendimento.

A eficiência (η) de cada módulo é calculada então pela seguinte equação:

$$\eta = \frac{\frac{P_{mpp}}{A_m}}{1000 \left[\frac{W}{m^2} \right]} = \frac{1,6}{1000} = 0,15$$

Utilizando-se esses dados, é possível estimar a quantidade de módulos necessários com:

$$Q_m = \frac{E}{H_t \times \eta \times A_m} = \frac{1.000.000}{5.830 \times 0,15 \times 1,6} = 714,7 \approx 715$$

Assim, serão 715 módulos silício policristalino, que juntos ocuparão uma área de 1144 m², que serão instalados no solo. Além disso, o sistema deverá ter conectores, estruturas metálicas de suporte e outros componentes elétricos e um inversor de corrente contínua para corrente alternada. Além disso, deverá prever a estrutura de conexão com a rede de transmissão de energia elétrica e uma subestação de elevação de tensão.



Faça você mesmo

Caro aluno, sugerimos que você acesse o site do programa América do Sol do Instituto Ideal para encontrar mais informações sobre a energia solar fotovoltaica, como fornecedores, normas e custos. Veja mais em: programa América do Sol. Disponível em: <<http://americadosol.org/conhecimento-em-energia-fotovoltaica>>. Acesso em: 4 jan. 2017.

Aproveite essa oportunidade para conhecer mais sobre essa fonte de energia que está sendo cada vez mais utilizada no Brasil!

Faça valer a pena

1. A energia eólica e a solar fotovoltaica são consideradas energias renováveis por usarem fontes que se renovam. Nos últimos anos seu uso vem crescendo e ocorreu um grande desenvolvimento tecnológico, porém, há algumas tecnologias que são mais viáveis e, assim, mais utilizadas.

I. A energia proveniente do sol não interfere na disponibilidade de energia eólica, mas apenas na de fotovoltaica.

II. A energia eólica pode ser gerada por aerogeradores com eixo vertical e horizontal.

III. As células fotovoltaicas com silício são as mais utilizadas atualmente para a geração de energia solar fotovoltaica.

Analisando as afirmativas, assinale a alternativa correta:

- a) V, F, V.
- b) F, F, V.
- c) F, V, V.
- d) V, V, F.
- e) V, F, F.

2. Analisando a equação:

$$P_d = \frac{1}{2} \rho A V^3$$

que é utilizada para estimar a potência disponível no vento, é possível observar a relação com a área varrida pelas pás do aerogerador, com a densidade do ar e com a velocidade do vento.

Considerando isso, se a velocidade do vento dobrar, quanto será a variação na potência disponível?

- a) 8 vezes maior.
- b) 4 vezes maior.
- c) 8 vezes menor.
- d) 2 vezes menor.
- e) 2 vezes maior.

3. A geração distribuída de energia elétrica é caracterizada pela conexão de microgeradores em baixa tensão e diretamente na rede de distribuição. Essa forma de geração vem crescendo nos últimos anos devido aos aumentos das tarifas de energia e aos avanços tecnológicos.

Um sistema de geração de energia solar fotovoltaica conectado à rede de distribuição deve ser projetado utilizando o seguinte valor de irradiação solar:

- a) Valor de irradiação solar para o ângulo igual a latitude.
- b) Maior média anual de irradiação solar.
- c) Menor valor médio diário anual de irradiação solar.
- d) Menor média anual de irradiação solar.
- e) Maior valor médio diário anual de irradiação solar.

Seção 4.3

Sistema interligado

Diálogo aberto

Caro aluno, nesta seção, estudaremos o Sistema Interligado Nacional, os sistemas isolados e a microgeração de energia elétrica. Além disso, será discutida a importância das energias renováveis, da eficiência energética e da microgeração de energia elétrica para o setor energético. Esses conhecimentos são muito importantes para um profissional do setor energético.

Por isso, considere que você é um engenheiro da superintendência de recursos energéticos da empresa pública de planejamento energético do Brasil e precisa elaborar um documento técnico que apresente um resumo da microgeração de energia elétrica no Brasil para o Ministro de Minas e Energia. Para isso, sugerimos que você escreva o texto respondendo às perguntas a seguir:

- O que é a microgeração e como funciona?
- Qual é a diferença entre microgeração, minigeração e geração distribuída?
- Quais são as vantagens e as desvantagens da microgeração?
- Qual é a importância desse novo mecanismo para o Sistema Interligado Nacional?
- Qual é a relação entre a energia solar fotovoltaica e a microgeração?
- A microgeração é importante para o aumento do uso de energias renováveis no Brasil?

Caro superintendente de recursos energéticos, você está preparado para resolver essa tarefa?

Espero que esteja animado. Bons estudos e um ótimo trabalho!

Sistema interligado de energia elétrica

Sistemas interligados de energia elétrica conectam diversas usinas geradoras e uma extensa rede de transmissão, permitindo que trabalhem conjunta e complementarmente. A tendência de interligar sistemas elétricos de estados, como no Brasil, tem justificativa nas seguintes vantagens:

- Caso uma usina tenha um problema e pare de injetar energia elétrica na rede, o sistema será abastecido por outras usinas.
- Caso haja um problema em uma linha de transmissão, outra linha atenderá essa demanda na maioria das vezes. Em linhas com grande fluxo de potência, nem sempre o sistema conseguirá contornar o problema e, assim, ocorrerá uma queda de energia.

No entanto, essa interligação pode ser prejudicial caso um problema em uma usina ou linha não consiga ser resolvido e acabe por afetar o funcionamento de parte ou de todo o sistema. Por isso, existe um sistema denominado Esquema Regional de Alívio de Carga (ERAC), que detecta variações de frequência da rede, que são causadas por sobrecarga, e, assim, antes do sistema de proteção atuar cortando a corrente, ocorre um desligamento parcial para reestabelecer o sistema. Esse mecanismo causa menos impacto que a queda de toda uma linha de transmissão.



Exemplificando

Nos últimos anos ocorreram dois importantes episódios de queda de energia elétrica no SIN. Um deles foi no dia 4 de fevereiro de 2014, em que cerca de 6 milhões de brasileiros em 11 estados ficaram sem energia elétrica devido à ocorrência de um curto-circuito em uma linha de transmissão de 500 kV, no estado do Tocantins. O outro episódio foi em 10 de novembro de 2009, quando a falha em uma linha de transmissão da Usina de Itaipu provocou um grande desligamento que afetou o Brasil e o Paraguai e cerca de 60 milhões de brasileiros ficaram algumas horas sem energia elétrica (BARROS; BORELLI; GEDRA, 2014).

O Brasil optou por ter um sistema elétrico interligado na década de 1970, considerando as vantagens já citadas, a possibilidade de diminuição dos custos globais de produção de energia elétrica e o aumento da confiabilidade do sistema. As principais funções do Sistema Interligado Nacional (SIN) são: a transmissão da energia gerada pelas usinas para os grandes centros de carga; a integração entre os diversos elementos do sistema elétrico para garantir estabilidade e confiabilidade da rede; a interligação entre as bacias hidrográficas e regiões com características hidrológicas heterogêneas de modo a otimizar a geração hidrelétrica; e a integração energética com os países vizinhos (Paraguai, Uruguai, Argentina e Venezuela) (BRASIL, 2015).

O SIN é composto por mais de 100 mil quilômetros de linhas de transmissão e é predominantemente hidrelétrico, sendo que cerca de 65% da sua capacidade de armazenamento se localiza nos estados de Minas Gerais, Goiás, e São Paulo, ao longo das bacias de quatro grandes rios: São Francisco, Grande, Tocantins e Paranaíba. Ter reservatórios de grande capacidade conseqüentemente faz com que o SIN tenha uma dependência das chuvas - onde, quando e quanto choverá são as questões mais importantes, e a administração desses fluxos de armazenamento dos reservatórios é o que leva ao atendimento de energia elétrica do SIN (PINTO, 2014).



Assimile

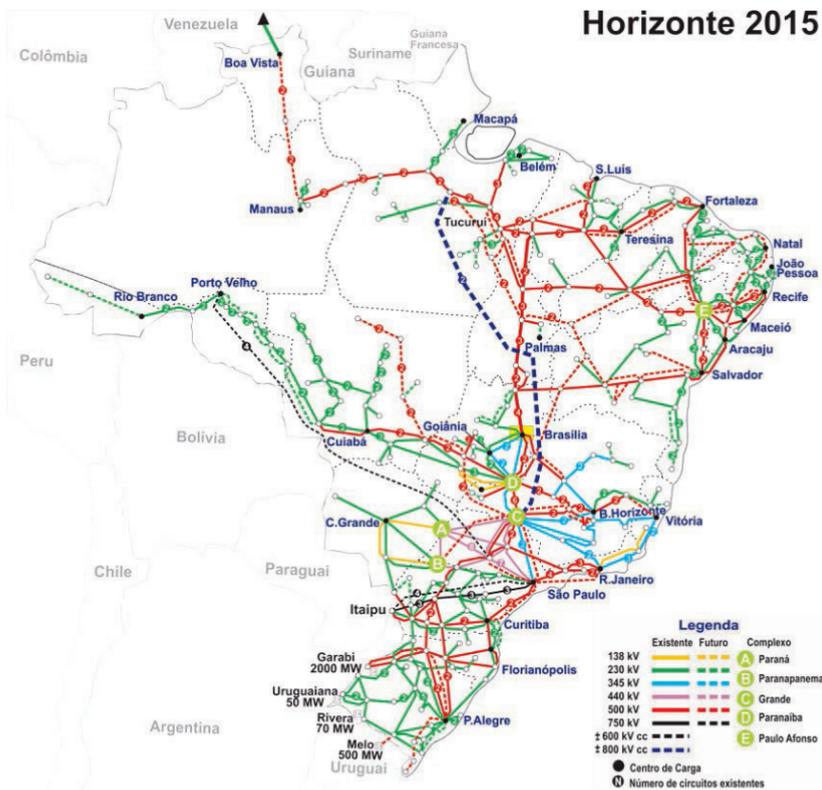
O SIN permite que as fontes de energia se complementem, por exemplo, em épocas típicas de estiagem na região Sudeste, as usinas termelétricas à biomassa (bagaço de cana) estão operando por ser o período da safra da cana-de-açúcar. Casos de complementariedade como esses são importantes por reduzir o gasto com combustíveis para as termelétricas, por levar em consideração o superávit hidrelétrico de outro ponto do sistema, caso haja.

O Operador Nacional do Sistema (ONS) é o responsável por operar o SIN de forma imparcial em relação a todos os agentes de geração e transmissão de energia elétrica conectados ao sistema.

Devido à sua grande extensão territorial e à presença de um parque gerador predominantemente hidrelétrico, o SIN foi desenvolvido

utilizando-se uma grande variedade de níveis de tensão, em função das distâncias envolvidas entre as fontes geradoras e os centros de carga, indo de 230 kV a 750 kV (BRASIL, 2015). No mapa da Figura 4.16 é possível ver as redes de transmissão que compõem o SIN e as redes planejadas previstas no horizonte de 2015.

Figura 4.16 | Mapa do Sistema Interligado Nacional em 2015



Fonte: adaptada de ONS (2017).

O planejamento é de expansão do sistema ao longo dos próximos anos, principalmente no sentido de integração com sistemas isolados da região Norte, mas, segundo o ONS (2017), apenas 1,7% da energia requerida pelo país encontra-se fora do SIN, em pequenos sistemas isolados localizados principalmente na Região Amazônica. Muitas vezes, a ligação desses sistemas é inviável pelas distâncias envolvidas e baixa demanda de energia. Assim, são sistemas importantes para garantir o acesso à energia por toda a população, mesmo que distante dos grandes centros urbanos.

Muitas vezes denominado como o maior sistema interligado de energia elétrica do mundo, o SIN perde para outros sistemas em quantidade de clientes e em potência de pico (Quadro 4.2). Entretanto, pode ser considerado o maior sistema interligado de fontes renováveis do planeta, devido, em grande parte, às fontes de geração hídricas (PINTO, 2016).

Quadro 4.2 | Maiores operadores de transmissão de energia elétrica do planeta (dados de 2013)

| País | Operador do sistema de transmissão | Potência de pico (GW) | Clientes (milhões) |
|----------------|---|-----------------------|--------------------|
| Austrália | Aemo (Australian Energy Market Operator) | 35 | 19 |
| China | CSG (China Southern Power Grid) | 129 | 240 |
| Bélgica | Elia Group | 29 | 30 |
| África do Sul | Eskom | 37 | 50 |
| Coreia do Sul | KPX (Korea Power Exchange) | 76 | 50 |
| Estados Unidos | MISO (Midwest Independent Transmission System Operator) | 98 | 39 |
| Reino Unido | National Grid | 61 | 62 |
| Brasil | ONS (Operador Nacional do Sistema) | 77 | 189 |
| Índia | Power Grid Corporation of India Limited | 135 | 1200 |
| Estados Unidos | PJM Interconnection | 164 | 60 |
| Espanha | REE (Red Eléctrica de España) | 44 | 46 |
| França | RTE (Réseau de Transport d'Électricité) | 100 | 100 |
| China | SGCC (State Grid Corporation of China) | 544 | 1100 |
| Rússia | SO UPS (System Operator of Unified Power System) | 157 | 144 |
| Japão | Tepco (Tokyo Electric Power Company) | 64 | 45 |
| Itália | TERNA (Rete Elettrica Nazionale) | 57 | 60 |

Fonte: adaptada de Pinto (2014).

Um exemplo de sistema interligado é o do Estados Unidos e Canadá, onde há quatro redes regionais que gerenciam a transmissão de energia elétrica nos Estados Unidos (com exceção do Alasca e do

Havaí) e no Canadá. Apesar de haver conexão entre as redes, não existe um único operador do sistema, como ocorre no Brasil.

Na Europa, há uma associação dos operadores de transmissão, composto por 41 operadores de 34 países, com 880 GW de capacidade de geração e 3.200 TWh de consumo de eletricidade, 305 mil km de linhas de transmissão para 532 milhões de clientes nos sistemas de potência (dados de 2012) (PINTO, 2014).

Sistemas isolados de energia elétrica

Os sistemas isolados brasileiros respondem pelo fornecimento de energia aos estados do Acre, Amazonas, Pará, Rondônia, Roraima, Amapá e Mato Grosso, bem como à ilha de Fernando de Noronha. A partir da interligação de Manaus e Macapá ao Sistema Interligado Nacional, a participação desses sistemas na carga do país ficará restrita a menos de 1% (ELETROBRAS, 2017).

Historicamente, os sistemas isolados do Brasil estão mais concentrados na região Norte do país pela dificuldade de construção de redes de transmissão em meio à floresta. Entretanto, as técnicas construtivas vêm evoluindo, permitindo a construção de torres mais altas e mais distantes e, assim, a integração de alguns sistemas com o SIN vem ocorrendo nos sistemas que atendem às capitais dos estados. O objetivo é aumentar a confiabilidade do sistema do Norte e reduzir custos de geração, pela diminuição do consumo de óleo combustível nos geradores, principal fonte de energia dessa região.

A operação dos sistemas isolados é coordenada pelo Grupo Técnico Operacional da Região Norte - GTON, responsável pelo Planejamento e Acompanhamento da Operação dos Sistemas Isolados da Região Norte e coordenado pela Eletrobrás. É composto por representantes de empresas públicas e privadas, no planejamento da expansão e da operação, bem como no acompanhamento da operação, objetivando assegurar o fornecimento de energia elétrica em condições adequadas de segurança e qualidade aos consumidores (ELETROBRAS, 2017).

A geração nesses sistemas é predominantemente térmica à base de óleo combustível, porém, o uso de fontes renováveis vem crescendo, principalmente a solar fotovoltaica e a eólica em sistemas híbridos,

como óleo diesel mais solar fotovoltaica. Apesar disso, os custos de geração dos sistemas isolados ainda são maiores do que do SIN, pelo uso de combustíveis fósseis e pela necessidade de transporte desses combustíveis por longas distâncias. Assim, o Governo Federal criou um encargo denominado CCC (Conta de Consumo de Combustíveis), que é cobrado nas tarifas de distribuição e de uso do sistema de transmissão e distribuição (TUST e TUSD) em todo o Brasil. Esse encargo subsidia a compra do óleo diesel e do óleo combustível usados na geração de energia das termelétricas que fornecem eletricidade para os sistemas isolados, reduzindo o valor final da tarifa para aproximar do valor de tarifa do SIN. Os recursos da CCC são administrados pela Eletrobras, e os valores (recolhidos mensalmente nas contas de luz pelas distribuidoras de energia elétrica) são fixados pela Aneel (PINTO, 2014).

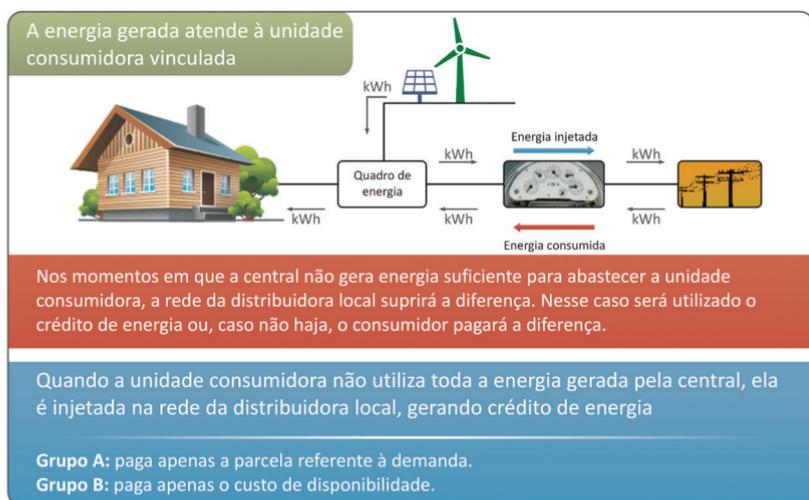
Microgeração de energia elétrica a partir de fontes renováveis

Desde 17 de abril de 2012, quando entrou em vigor a Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012 (revisada pela Resolução Normativa nº 687/2015), o consumidor brasileiro pode gerar sua própria energia elétrica a partir de fontes renováveis ou cogeração qualificada (qualificada segundo aspectos de racionalidade energética, para fins de participação nas políticas de incentivo à cogeração) e até fornecer o excedente para a rede de distribuição de sua localidade (ANEEL, 2016a). Essa modalidade de geração é denominada de microgeração (capacidade elétrica instalada de até 75 kW) e minigerção (capacidade elétrica instalada entre 75 e 5.000 kW ou 75 a 3.000 kW para fonte hídrica). Também é conhecida por geração distribuída, por injetar a energia elétrica gerada diretamente na rede de distribuição, ou seja, próximo às cargas.

Algumas das vantagens da geração distribuída são: a redução de perdas na rede de distribuição, a diversificação da matriz energética, redução de custos para o consumidor, aumento do uso de fontes renováveis, possibilidade de adiar investimentos em transmissão, entre outros. Já as desvantagens estão mais associadas ao aumento da quantidade de pequenos geradores espalhados na rede de distribuição, tais como: o aumento da complexidade de operação da rede, a dificuldade na cobrança pelo uso do sistema elétrico, a eventual incidência de tributos e a necessidade de alteração dos procedimentos das distribuidoras para operar, controlar e proteger suas redes (ANEEL, 2016b).

O mecanismo criado por essa resolução permite que, quando a quantidade de energia gerada em determinado mês for superior à energia consumida naquele período, o consumidor fique com créditos que podem ser utilizados para diminuir a fatura dos meses seguintes em um prazo de 60 meses ou para abater o consumo de unidades consumidoras do mesmo titular situadas em outro local (desde que na área de atendimento de uma mesma distribuidora). Na Figura 4.17, é apresentado um esquema que explica o funcionamento do sistema de compensação de energia elétrica existente no Brasil atualmente. No entanto, os consumidores ainda precisam pagar o custo de disponibilidade da rede de distribuição e alguns impostos, conforme o estado em que vivem e o grupo em que se enquadram (Grupo A ou B).

Figura 4.17 | Sistema de compensação de energia elétrica



Fonte: adaptada de ANEEL (2016b).

Também é permitido reunir potenciais geradores em cooperativas ou associações e instalar uma unidade de micro ou minigeração distribuída para utilizar a energia gerada para redução das faturas dos consorciados ou cooperados, também se aplicando a condomínios.



Pesquise mais

A microgeração e a minigeração de energia elétrica vêm crescendo muito nos últimos anos no Brasil e são uma grande oportunidade para

empresas e profissionais do setor. Por isso, busque entender melhor como funcionam nos seguintes links:

AMÉRICA DO SOL. **Guia de microgeradores fotovoltaicos**. Disponível em: <<http://www.americadosol.org/guiaFV/>>. Acesso em: 14 jan. 2017.

Importância das energias renováveis, da eficiência energética e da microgeração para o sistema elétrico

O crescimento da demanda de energia elétrica e a necessidade de atender a toda população vêm exigindo cada vez mais planejamento do setor elétrico nacional. Pelo lado da oferta de energia, o uso de fontes renováveis permite a diversificação da matriz energética, o que aumenta a segurança energética. Além disso, isso permite que o Brasil vá ao encontro das metas de redução de emissões de gases de efeito estufa e de impactos ambientais, demanda da sociedade contemporânea. Assim, é inegável a importância das energias renováveis no cenário atual e futuro do setor elétrico nacional e até mundial.

Ainda pelo lado da oferta de energia, a microgeração demonstra ser uma alternativa importante e complementar no sentido de garantir a dispersão dos geradores e o aumento do uso de fontes renováveis. A geração distribuída pode ser considerada um caminho sem volta no Brasil, pois, apesar das dificuldades de operacionalização, é uma tecnologia que traz benefícios sociais, ambientais, econômicos e, principalmente, de segurança energética.

Pelo lado da demanda, a eficiência energética cumpre um papel imprescindível de redução do consumo de energia elétrica em residências, indústrias e estabelecimentos comerciais. Além da redução de custos para os consumidores, os benefícios do setor elétrico passam pela redução da demanda pela ampliação do sistema e da carga oferecida. Em uma sociedade cada vez mais eletrointensiva, ações de eficiência no uso da energia elétrica são essenciais para a garantia de abastecimento de todos.

Assim, observa-se o quanto esses três conceitos estão interligados na sustentação e no crescimento do setor elétrico, e, assim, a importância de haver planejamento e incentivos para que seus benefícios sejam alcançados.



A opinião da sociedade normalmente é muito importante na definição de tendências. No caso do crescimento do uso das energias renováveis, das medidas de eficiência energética e da microgeração de energia, qual você acha que foi e é o papel da sociedade?

Sem medo de errar

A microgeração distribuída é uma modalidade de geração de energia elétrica que permite que um consumidor possa gerar energia e fornecer o excedente para a rede de distribuição. Esse excedente pode compensar o consumo nos momentos em que não houver geração própria. É importante destacar que esse mecanismo também se aplica à minigeração, e a diferença entre essas modalidades é a potência instalada, sendo que a microgeração é de até 75 kW e a minigeração é de 75 a 3.000 kW ou 5.000 kW, dependendo da fonte de energia (valores para o Brasil). A geração distribuída é a geração de energia com conexão direta com a rede de distribuição de energia elétrica (BRASIL, 2004) e, assim, inclui a micro e a minigeração.

Essa forma de gerar energia vem se popularizando, mesmo que lentamente no Brasil, por ter algumas vantagens, como a redução de perdas na rede de distribuição, a diversificação da matriz energética, a redução de custos para o consumidor, o aumento do uso de fontes renováveis, a possibilidade de adiar investimentos em transmissão, entre outros.

No entanto, é importante citar algumas das barreiras para a microgeração geradas pelo aumento da quantidade de consumidores conectados, injetando energia elétrica na rede. Algumas dessas barreiras são: o aumento da complexidade de operação da rede, a dificuldade na cobrança pelo uso do sistema elétrico, a eventual incidência de tributos e a necessidade de alteração dos procedimentos das distribuidoras para operar, controlar e proteger suas redes (ANEEL, 2016b).

Essa modalidade de geração de energia elétrica é muito importante para a evolução e o crescimento do Sistema Interligado

Nacional, pois aumenta a estabilidade da rede e diversifica a matriz, não só no sentido das fontes, mas também no sentido de porte dos geradores. Essa é uma tendência mundial que vem tendo muitos investimentos em desenvolvimento tecnológico, como citado na Seção 4.1 da Unidade 4 dessa disciplina.

Nesse sentido, o desenvolvimento das tecnologias para geração de energia solar fotovoltaica foi muito importante para expandir a presença da microgeração. As tecnologias para energia fotovoltaica são modulares, o que permite que se adaptem ao espaço disponível e à demanda de energia do consumidor. A redução dos preços dos módulos fotovoltaicos nos últimos anos, principalmente após a forte entrada dos fabricantes chineses no mercado, também tornou essa fonte de energia mais acessível, o que aumentou seu uso na microgeração. Apesar de outras fontes serem utilizadas para a microgeração, a energia solar fotovoltaica se destaca e, atualmente, é líder nesse setor no Brasil.



Atenção

Aluno, relacione os conceitos aprendidos nas outras seções dessa unidade para resolver essa tarefa descrita no *Sem medo de errar*. É importante que você perceba que a microgeração tornou viável a geração de energia solar fotovoltaica em pequena escala, por permitir a conexão com a rede de distribuição, reduzindo, assim, os custos e possibilitando o uso da energia elétrica da rede quando não há geração fotovoltaica.

Finalmente, deve-se destacar o papel da microgeração na diversificação da matriz energética e no uso de fontes renováveis não convencionais. A possibilidade de gerar energia elétrica em pequena escala e reduzir o valor da fatura mensal traz como consequência um provável aumento do uso de fontes, como a solar fotovoltaica, a eólica, o biogás, além da hídrica por pequenas centrais geradoras.

Elaborando um texto sobre a microgeração

Descrição da situação-problema

Continuamos imaginando que você é o superintendente de recursos energéticos da empresa pública de planejamento energético do Brasil, mas que agora precisa elaborar um novo documento técnico que apresente um resumo da microgeração de energia elétrica no país. Esse novo documento será enviado para líderes do setor energético do Brasil e precisa citar aspectos técnicos, ambientais, sociais e econômicos da microgeração.

Caro superintendente de recursos energéticos, você está preparado para resolver essa nova tarefa?

Espero que esteja animado. Bons estudos e um ótimo trabalho!

Resolução da situação-problema

A microgeração de energia elétrica é regulada no Brasil desde 2012 e seu uso vem crescendo e se popularizando desde então. Esse é um mercado com grande potencial de crescimento e que pode trazer grandes benefícios para o país.

A busca pela redução de impactos ambientais e de emissões de gases de efeito estufa, a microgeração e a minigeração são essenciais. Além disso, a microgeração traz benefícios sociais e econômicos para a sociedade, criando novas oportunidades de trabalho e de geração de renda em todo o Brasil, e as vantagens técnicas e operacionais que a microgeração pode trazer para o sistema elétrico nacional são consideráveis.

Por isso, essa modalidade de geração de energia deve ser incentivada e apoiada pelo governo brasileiro para se desenvolver e ser cada vez mais utilizada.



Caro aluno, sugerimos que você aplique os conhecimentos desenvolvidos nesta seção por meio da seguinte atividade: estude os procedimentos e as regras para a micro e minigeração na sua região para que você esteja preparado para perguntas sobre o tema. Simule a instalação de um sistema de microgeração de energia solar fotovoltaica em sua casa e busque estimar o potencial e quais seriam os passos para a conexão com a rede de distribuição e compensação do consumo na tarifa. Um documento de apoio será o seguinte:

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Micro e minigeração distribuída**: sistema de compensação de energia elétrica. 2. ed. Brasília: ANEEL, 2016b. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/documents/656877/14913578/Caderno+tematico+Micro+e+Minigera%C3%A7%C3%A3o+Distribuida+-+2+edicao/716e8bb2-83b8-48e9-b4c8-a66d7f655161>>. Acesso em: 14 jan. 2017.

Faça valer a pena

1. O Sistema Interligado Nacional possui mais de 100 mil quilômetros de extensão em redes de transmissão e vem sendo expandido para a integração com alguns sistemas isolados e para o melhor aproveitamento das fontes energéticas.

Qual das alternativas não apresenta uma vantagem do Sistema Interligado Nacional do Brasil?

- a) Redução dos gastos com combustíveis para as usinas térmicas, pelo maior aproveitamento do potencial hidrelétrico.
- b) Possibilidade de diminuição dos custos globais de produção de energia elétrica.
- c) Aumento da confiabilidade do sistema.
- d) Redução da integração energética entre as regiões do país.
- e) Interligação entre as bacias hidrográficas e regiões com características hidrológicas heterogêneas de modo a otimizar a geração hidrelétrica.

2. Os sistemas isolados brasileiros estão localizados principalmente na região Norte do país, sobretudo devido às grandes distâncias para o SIN e a existência de extensas áreas de floresta.

Assinale a alternativa que indica a principal fonte de energia utilizada atualmente nos sistemas isolados do Brasil:

- a) Solar fotovoltaica.
- b) Eólica.
- c) Termelétrica a gás natural.
- d) Hidrelétrica.
- e) Termelétrica a óleo diesel.

3. A Resolução nº 482/2012, alterada pela Resolução no 687/2015 da ANEEL, que permite a conexão de micro e minigeradores na rede de distribuição de energia elétrica, foi um marco na evolução do setor elétrico brasileiro e uma demonstração da necessidade da inovação e adaptação às novas demandas do setor e da sociedade.

A seguir, têm-se afirmativas sobre a microgeração e a minigeração de energia elétrica no Brasil:

I. Permite que uma unidade geradora compense o consumo de energia elétrica de outra unidade, desde que seja do mesmo titular e estejam na área de atendimento de uma mesma distribuidora.

II. A microgeração indica que a capacidade elétrica instalada é de até 75 kW.

III. É permitido também utilizar combustíveis fósseis como única fonte para se enquadrar como microgeração ou minigeração pelas Resoluções ANEEL nº 482/2012 e no 687/2015.

Analisando as afirmativas, assinale a alternativa correta:

- a) V, V, F.
- b) F, V, F.
- c) V, F, F.
- d) V, F, V.
- e) F, F, V.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA (ABEEOLICA). **Capacidade instalada**. São Paulo, 2016. Disponível em: <<http://www.abeeolica.org.br/>>. Acesso em: 12 dez. 2016.

AMARANTE, O. A. C. et al. **Atlas do potencial eólico brasileiro**. Brasília, 2001. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas_eolico/Atlas%20do%20Potencial%20Eolico%20Brasileiro.pdf>. Acesso em: 14 fev. 2016.

AMÉRICA DO SOL. **Guia de microgeradores fotovoltaicos**. Disponível em: <<http://www.americadosol.org/guiaFV/>>. Acesso em: 14 jan. 2017.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Informações técnicas**. Geração distribuída. Brasília, 2016a. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/informacoes-tecnicas/-/asset_publisher/CegkWaVJWF5E/content/geracao-distribuida-introducao-1/656827?inheritRedirect=false>. Acesso em: 14 jan. 2017.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Micro e minigeração distribuída**: sistema de compensação de energia elétrica. 2. ed. Brasília: ANEEL, 2016b. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/documents/656877/14913578/Caderno+tematico+Micro+e+Minigera%C3%A7%C3%A3o+Distribuida++2+edicao/716e8bb2-83b8-48e9-b4c8-a66d7f655161>>. Acesso em: 14 jan. 2017.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução nº 687, de 24 de novembro de 2015**. Altera a Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, e os Módulos 1 e 3 dos Procedimentos de Distribuição (PRODIST). Brasília, 2015. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>>. Acesso em: 15 jan. 2017.

_____. **Resolução nº 482, de 17 de abril de 2012**. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências. Brasília, 2012. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em: 15 jan. 2017.

BARROS, B. F.; BORELLI, R.; GEDRA, R. L. **Geração, transmissão e consumo de energia elétrica**. 1. ed. São Paulo: Érica, 2014.

BRASIL. **Decreto Nº 5.163 de 30 de julho de 2004**. Regulamenta a comercialização de energia elétrica, o processo de outorga de concessões e de autorizações de geração de energia elétrica, e dá outras providências. Brasília, 2004. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2004-2006/2004/Decreto/D5163.htm>. Acesso em: 31 jan. 2017.

_____. Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética. **Plano decenal de expansão de energia 2024**. Brasília: MME/EPE, 2015.

BUENO, A. F. M.; BRANDÃO, C. A. L. **Visão geral de tecnologia e mercado para os sistemas de armazenamento de energia elétrica no Brasil**. [s.d.]. Disponível em: <http://www.abaque.com.br/Estudo_Mercado_Armazenamento_Brasil.pdf>. Acesso em: 9 dez. 2016.

CENTRO DE ENERGIA EÓLICA. PUC-RS. Links - Mapas e softwares. **Softwares para análise**

de recursos eólicos. [s.d.]. Disponível em: <http://www.pucrs.br/ce-eolica/links_mapas_e_softwares.php>. Acesso em: 3 jan. 2017.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS (CGEE). **Programa demonstrativo para inovação em cadeia produtiva selecionada:** energia eólica. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2015.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA (CRESESB). Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL). **Programa SunData.** 2016. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata&>>. Acesso em: 2 jan. 2017.

DUTRA, R. M. **Viabilidade técnico-econômica da energia eólica face ao novo marco regulatório do setor elétrico brasileiro.** 2001. 334 f. Tese (Mestrado em Ciências em planejamento energético)-Universidade Federal Do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2001.

ELETRONBRAS. **Nosso negócio. Geração. Sistemas isolado.** 2017. Disponível em: <<https://www.eletronbras.com/elb/main.asp?Team=%7BF6839649-9BFF-4C62-A77C-21863DBA3F48%7D>>. Acesso em: 15 jan. 2017.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Technology Roadmap:** energy storage. Paris: OECD/IEA, 2014. Disponível em: <<http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/technologyroadmapenergystorage.pdf>>. Acesso em: 14 fev. 2017.

LUND, P. D. et al. Review of energy system flexibility measures to enable high levels of variable renewable electricity. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 45, p. 785-807, 2015.

NEOSUN. **Eólico – Concepção.** [s.d.]. Disponível em: <http://www.neosun.com.br/?page_id=988>. Acesso em: 2 jan. 2017.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA (ONS). **Conheça o sistema. O que é o SIN - Sistema Interligado Nacional.** 2017. Disponível em: <http://www.ons.org.br/conheca_sistema/o_que_e_sin.aspx>. Acesso em: 15 jan. 2017.

PEREIRA, E. B. et al. **Atlas brasileiro de energia solar.** São José dos Campos, 2006. Disponível em: <http://ftp.cptec.inpe.br/labren/publ/livros/brazil_solar_atlas_R1.pdf>. Acesso em: 14 fev. 2017.

PINTO, M. O. **Energia elétrica:** geração, transmissão e sistemas interligados. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

SENTELHAS, P.; ANGELOCCI, L. **LCE 306:** meteorologia agrícola: radiação solar e balanço de energia. Piracicaba: ESALQ/USP, 2012. Disponível em: <http://www.esalq.usp.br/departamentos/leb/aulas/lce306/Aula5_2012.pdf>. Acesso em: 2 jan. 2017.

TOLMASQUIM, M. T. **Energia renovável:** hidráulica, biomassa, eólica, solar, oceânica. Rio de Janeiro: EPE, 2016.

ISBN 978-85-8482-827-2



9 788584 828272 >