

Medidas e materiais elétricos

Daniel Augusto Pagi Ferreira

© 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

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

André Luis Delvas Fróes

Hugo Tanzarella Teixeira

Renato Billia de Miranda

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)

Ferreira, Daniel Augusto Pagi
F383m Medidas e materiais elétricos / Daniel Augusto Pagi
Ferreira. – Londrina : Editora e Distribuidora Educacional
S.A., 2017.
192 p.

ISBN 978-85-8482-853-1

1. Medidas elétricas. 2. Condutores elétricos. 3.
Semicondutores. 4. Dielétricos. 5. Materiais magnéticos. I.
Título.

CDD 621.37

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 Materiais condutores e semicondutores	7
Seção 1.1 - Materiais condutores	8
Seção 1.2 - Materiais semicondutores	21
Seção 1.3 - Dispositivos semicondutores	34
Unidade 2 Materiais dielétricos, propriedades mecânicas e térmicas	51
Seção 2.1 - Materiais dielétricos	53
Seção 2.2 - Piezoeletricidade	67
Seção 2.3 - Propriedades mecânicas e térmicas	79
Unidade 3 Materiais magnéticos	97
Seção 3.1 - Fundamentos de materiais magnéticos	99
Seção 3.2 - Magnetização e histerese	114
Seção 3.3 - Transformadores	129
Unidade 4 Princípios de medidas elétricas	145
Seção 4.1 - Medidas elétricas em corrente contínua e alternada	147
Seção 4.2 - Aterramentos	163
Seção 4.3 - Medição de potência e energia elétrica	178

Palavras do autor

Seja bem-vindo ao curso de Medidas e Materiais Elétricos. Nele, você terá a oportunidade de entender as principais propriedades dos materiais condutores, semicondutores, isolantes e magnéticos, além de estudar alguns equipamentos para medições de grandezas elétricas. Você já percebeu a quantidade existente desses materiais em nosso dia a dia? Por que alguns materiais são excelentes para serem usados como condutores e outros, pelo contrário, não conseguem conduzir praticamente nenhuma corrente? O conhecimento e o uso adequado de alguns materiais são fundamentais para o desenvolvimento de novas tecnologias e para compreender o funcionamento de equipamentos.

Na Unidade 1, estudaremos os materiais condutores e semicondutores e veremos aplicações práticas diretas com base em conceitos relativamente simples mas extremamente importantes. Estudaremos e conheceremos o funcionamento de condutores, os motivos pelos quais esses materiais se comportam dessa maneira, além dos materiais e dispositivos semicondutores (diodo e transistor) essenciais para a eletrônica.

Na Unidade 2, nós estudaremos os materiais isolantes (ou dielétricos) e algumas de suas importantes aplicações enquanto capacitores. Conheceremos também o efeito piezoelétrico, algumas propriedades mecânicas e térmicas e a forma como podemos usá-los em sensores e transdutores.

Os materiais magnéticos serão o foco principal da Unidade 3, na qual estudaremos a geração de campos magnéticos, as classificações de materiais magnéticos, as curvas de histerese e de magnetização e, finalmente, o princípio de funcionamento dos transformadores, um dos equipamentos de maior importância nos Sistemas Elétricos de Potência (SEP).

Por fim, na Unidade 4, estudaremos os princípios de medidas elétricas de tensão e corrente, usando voltímetros e amperímetros, respectivamente, além da resistência de aterramento e medições de energia e potência.

Este livro é a base de estudo da disciplina Medidas e Materiais Elétricos e ajudará você a compreender todos os conceitos tratados. A leitura de livros clássicos da área é fundamental para o aprofundamento dos conteúdos e deverá ser uma rotina, não apenas para este curso, mas para toda a vida profissional. Estude regularmente e faça todas as atividades propostas nas etapas de pré-aula e pós-aula,

Bons estudos!

Materiais condutores e semicondutores

Convite ao estudo

Seja bem-vindo à Unidade 1 do curso de Medidas e Materiais Elétricos. Nesta unidade, você estudará o comportamento físico e as aplicações de materiais condutores e semicondutores, com foco nos primeiros. Estes são de grande importância prática para engenheiros e técnicos, pois, sem eles, não seria possível fazer transmissão de energia elétrica em sistemas de potência, transmissão de sinais em redes de comunicação e/ou de automação cabeadas, entre outras aplicações. O entendimento das propriedades fundamentais dos materiais condutores é, portanto, de extrema importância para sua formação profissional.

Nesta unidade, vamos nos colocar no lugar de um engenheiro que trabalha no departamento de desenvolvimento de uma multinacional que fornece insumos para a produção de cabos para instalações elétricas industriais. Você e sua equipe, responsáveis por esse projeto, deverão apresentar os materiais condutores necessários e usar uma máquina bobinadeira para prepará-los para o transporte. Sua empresa precisa fornecer parte dos materiais necessários para construção de cabos de média tensão. Além disso, o cliente solicitou que os cabos tenham as menores bitolas possíveis. Os conceitos de condutividade e resistividade nos ajudarão a determinar quais são os materiais mais adequados para produzir um cabo de menor diâmetro. Por fim, você e sua equipe proporão uma nova solução para a medida do comprimento dos cabos entregues ao cliente, a qual tornará o processo automático e preciso, utilizando um sensor de efeito Hall e um transistor. Seu gestor solicitou que todo o processo seja descrito detalhadamente na forma de um relatório.

Para que essa tarefa siga com qualidade e domínio, atente para os conceitos que abordaremos no decorrer do texto. Bons estudos!

Seção 1.1

Materiais condutores

Diálogo aberto

Nesta seção, estudaremos as principais propriedades de materiais condutores, focalizando principalmente a resistividade e a condutividade. Esses parâmetros são extremamente importantes e indicam se determinado material é bom ou mau condutor de eletricidade. Com base nos conhecimentos adquiridos após o estudo desta seção, você terá plenas condições de compreender e resolver o desafio proposto.

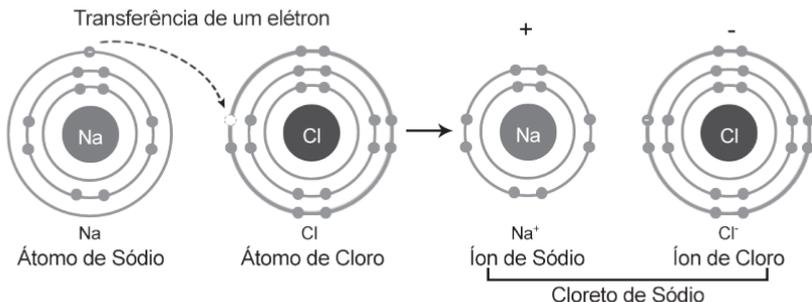
Sua empresa precisa fornecer parte dos materiais necessários para a construção de cabos de média tensão. O cliente solicitou que esses cabos fossem os menores possíveis, razão pela qual você precisa escolher qual é o material mais adequado, que resultará em um condutor de menor diâmetro. Você e sua equipe devem verificar quais metais estão disponíveis, as suas condutividades e/ou resistividades, os parâmetros geométricos desejados dos cabos (comprimento e diâmetro) etc.

Não pode faltar

Para que possamos entender as características dos materiais, vamos começar estudando as **ligações químicas** existentes, que são responsáveis por definir esses aspectos de condutividade ou resistividade, entre outras propriedades.

A **ligação iônica** é aquela que acontece entre íons, isto é, átomos de um determinado elemento químico carregados negativamente ou positivamente. Um exemplo de material do nosso cotidiano que apresenta essa ligação é o cloreto de sódio **NaCl**, que é formado por um íon Na^+ e outro Cl^- (Figura 1.1). Nessa ligação, o elétron de valência do íon **Na⁺** é fornecido para um átomo de cloro. A ligação iônica resulta em materiais de elevados pontos de fusão (devido as suas elevadas energias de ativação), além de tornarem os materiais quebradiços e duros, podendo ser aplicados como isolantes elétricos e térmicos.

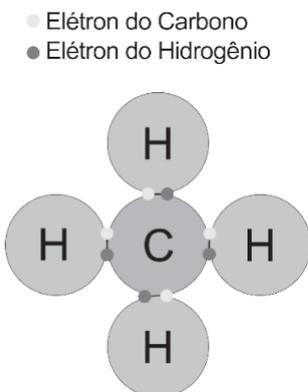
Figura 1.1 | Ligação iônica do cloreto de sódio



Fonte: elaborada pelo autor.

A **ligação covalente** é aquela na qual ocorre o compartilhamento dos elétrons de átomos adjacentes. A Figura 1.2 apresenta a ligação da molécula de metano, em que quatro elétrons oriundos de quatro átomos de hidrogênio (H^+) são compartilhados com um átomo de carbono, que possui quatro elétrons na camada de valência. Dessa forma, os quatro elétrons dos átomos de hidrogênio completam a camada de valência do carbono. Essa forma de ligação é muito comum em polímeros.

Figura 1.2 | Ligação covalente do metano

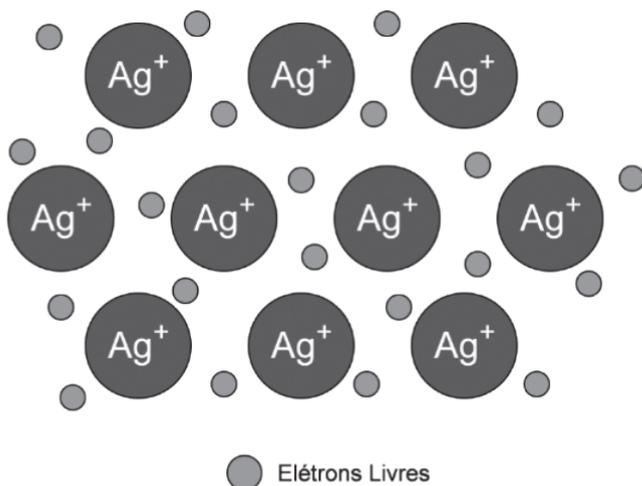


Fonte: elaborada pelo autor.

A **ligação metálica** é, como o próprio nome sugere, encontrada nos metais e nas ligas metálicas. Esses materiais geralmente têm de dois a três elétrons de valência, que não estão ligados a qualquer outro

átomo. Assim, esses elétrons estão "livres" para se movimentarem ao longo de todo metal, formando uma espécie de nuvem eletrônica (Figura 1.3).

Figura 1.3 | Nuvem eletrônica da ligação metálica



Fonte: elaborada pelo autor.



Pesquise mais

O conhecimento das ligações químicas é necessário para entender algumas propriedades dos materiais elétricos. Para uma leitura mais aprofundada do assunto, leia o capítulo 2 do livro:

ATKINS, P. W.; JONES, L. Princípios de química: questionando a vida moderna e o meio ambiente. 5 ed. Porto Alegre: Bookman, 2009. 1048 p.

Resistividade e condutividade

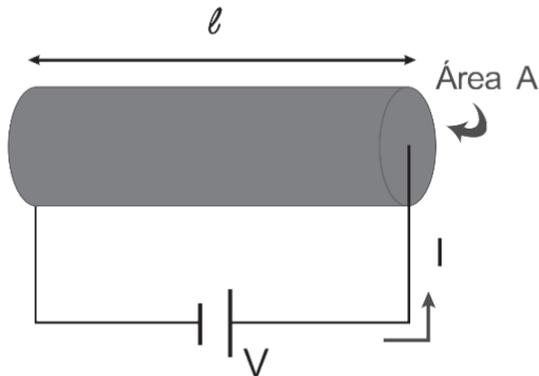
Uma característica importante de um material condutor é a sua resistência elétrica. Você já estudou a Primeira Lei de Ohm, uma lei física que indica a relação entre a tensão e a corrente elétrica em um elemento resistivo de acordo com:

$$V = RI$$

Há também a Segunda Lei de Ohm, que nos permite calcular a resistência de fios condutores:

$$R = \frac{\rho l}{A}$$

Figura 1.4 | Condutor cilíndrico



Fonte: elaborada pelo autor.

como apresentado na Figura 1.4.

onde l é o comprimento do fio (em m), A é a área da sua seção transversal (em m^2 e ρ é a **resistividade** desse material (dada em $\Omega \cdot \text{m}$). Outra propriedade importante, e que também está relacionada com a facilidade de um determinado material em conduzir corrente, é a **condutividade** σ , definida conforme:

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

A condutividade é medida em $(\Omega \cdot \text{m})^{-1}$ e indica a facilidade com que um material consegue conduzir corrente elétrica, ou seja, quanto mais alta for a condutividade de um material, maior será a corrente que o atravessa para uma mesma diferença de potencial. Caso contrário, um material com baixa condutividade terá uma alta resistência elétrica.



Assimile

Lembre-se: a resistividade é o inverso da condutividade, ou seja:

$$\rho = \frac{1}{\sigma}$$



Exemplificando

Um fio de alumínio com 2 mm de diâmetro deve ter uma resistência máxima de 5 Ω . Qual deve ser seu comprimento máximo, em metros, se sua condutividade é $3,8 \times 10^7 (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$?

Resolução:

Sabemos que a resistência de um fio cilíndrico é dada pela Segunda Lei

de Ohm $\left(R = \frac{\rho l}{A} \right)$ Dessa forma, para calcular o comprimento máximo,

basta resolver esta equação para o comprimento, como segue:

$$R = \frac{\rho l}{A} = \frac{l}{\sigma A} \rightarrow l = R \sigma A$$

Substituindo os valores, temos:

$$R = \frac{\rho l}{A} = \frac{l}{\sigma A} \rightarrow l = R \sigma A$$

Com base nos conceitos de condutividade e resistividade, é possível indicar se um material é um bom ou mau condutor de eletricidade. Materiais condutores, principal foco desta seção, possuem alta condutividade (da ordem de $10^7 (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$, ao passo que isolantes possuem baixa condutividade (da ordem de $10^{-10} (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$ e $10^{-20} (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$). Materiais com condutividade entre as duas faixas citadas anteriormente são classificados como semicondutores.

Para entendermos a origem da corrente elétrica em materiais sólidos, precisamos lembrar das suas estruturas físicas. Metais costumam ter uma grande quantidade de elétrons livres que, na presença de um campo elétrico, entram em movimento, ganhando aceleração e, portanto, velocidade. Para os metais, como as cargas que entram em movimento são os elétrons, diremos que este tipo de condução é eletrônica. Além desta, há ainda a condução iônica, quando íons (cátions ou ânions) entram em movimento, produzindo corrente elétrica.

Ao aplicar um campo elétrico em um material, uma força (de Coulomb) aparecerá nos elétrons, fazendo que estes acelerem. A velocidade final de um elétron é limitada por conta de choques elásticos e inelásticos que acontecem dentro do material. Em cada choque, os elétrons podem mudar a direção da trajetória e perdem energia cinética. Dessa forma, os elétrons têm uma velocidade média na direção do campo elétrico, chamada de velocidade de arraste (v_a), calculada da seguinte forma:

$$v_a = \mu_e E$$

Em que: μ_e é a mobilidade de um elétron, medida em metro quadrado por volt-segundo $m^2/(V \cdot s)$ e E é o campo elétrico aplicado, em volt por metro V/m . A mobilidade eletrônica indica a frequência segundo a qual ocorrem os eventos de espalhamento (mudança de trajetória) e pode ser usada para calcular a condutividade para a grande maioria dos metais:

$$\sigma = n |e| \mu_e$$

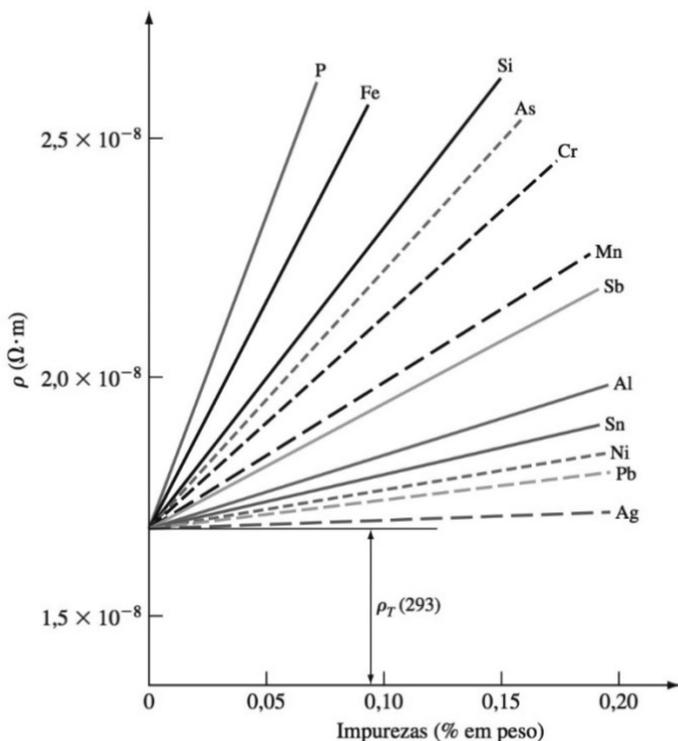
Em que: n é o número de elétrons livres por unidade de volume e $|e|$ é o módulo da carga do elétron, cujo valor é $1,6 \times 10^{-19}$ C.

Podemos avaliar também a resistividade elétrica dos metais (em vez da condutividade) e sua influência com a temperatura e concentração de impurezas. Para temperaturas acima de aproximadamente -200 °C, a resistividade aumenta linearmente com a temperatura, de acordo com:

$$\rho_T = \rho_0(1 + \alpha_T T)$$

Em que: ρ_0 é a resistividade a 0 °C, α_T é o coeficiente térmico de resistividade ($^{\circ}\text{C}^{-1}$) e T é a temperatura do metal em °C. Podemos alterar a resistividade de um metal adicionando impurezas neste, conforme apresentado na Figura 1.5.

Figura 1.5 | Variação da resistividade elétrica com a concentração de impurezas



Fonte: adaptado de Smith e Hashemi (2013, p. 540).



Refleta

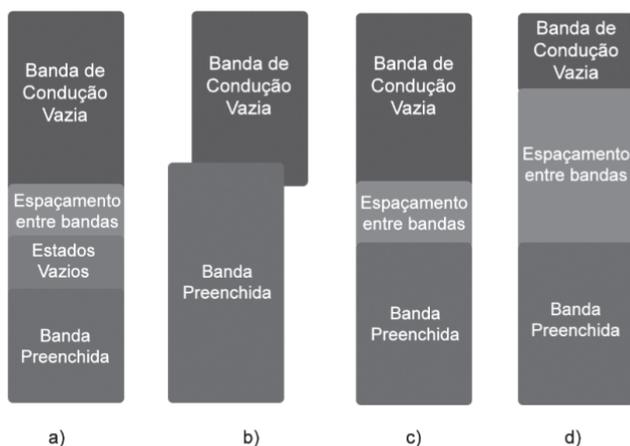
A escolha de qual material condutor usar pode ter impactos não apenas técnicos como também econômicos. Como exemplo, considere a prata e o cobre como materiais base para construção de cabos. A prata é mais condutiva que o cobre, uma vez que tem condutividade elétrica maior. Por que, então, não usamos prata para construir cabos?

Bandas de energia nos sólidos

Conforme vimos anteriormente, para que haja corrente elétrica, é necessário haver cargas em movimento. No caso dos metais, essas cargas são os elétrons. Poderíamos concluir, intuitivamente, que, se temos disponível uma quantidade maior de elétrons livres, teremos então uma corrente elétrica maior.

Nem todos os elétrons de um material estão disponíveis para se movimentarem na presença de um campo elétrico. Na verdade, a quantidade de elétrons livres está intimamente relacionada ao arranjo dos estados ou níveis eletrônicos (s, p, d e f) e à forma como estes estão preenchidos. Há quatro estruturas de bandas possíveis para uma temperatura de 0 K, conforme apresentado na Figura 1.6.

Figura 1.6 | Estruturas de bandas eletrônicas



Fonte: adaptado de Callister e Rethwisch (2016, p. 670).

A estrutura apresentada na Figura 1.6a é característica de metais que possuem apenas um elétron de valência s, como o cobre, os quais possuem estados eletrônicos disponíveis na mesma banda e em uma banda de energia acima. A estrutura da banda da Figura 1.6b também é encontrada em alguns metais, como o magnésio, no qual ocorre uma superposição entre uma banda vazia com uma banda preenchida. Na Figura 1.6c, temos a estrutura de banda encontrada nos materiais

semicondutores, na qual podemos ver um espaçamento entre bandas. Na última estrutura de banda eletrônica, apresentada na Figura 1.6d, temos uma configuração típica de bandas de energia para materiais isolantes. Note que o espaçamento entre bandas no caso dos isolantes é maior que aquele visto para os semicondutores. Em outras palavras, a energia necessária para retirar um elétron de uma banda de energia mais baixa para um nível energético superior é maior para os isolantes do que para os semicondutores.



Pesquise mais

A teoria de bandas de energia pode ser usada para explicar as diferenças entre condutores, semicondutores e isolantes, como apresentado anteriormente no texto. Aprofunde seus estudos com a leitura do item 18.5 do livro:

CALLISTER JR, W. D.; RETHWISCH, David G. Ciência e engenharia dos materiais: uma introdução. 9 ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 2016. 912 p.

Sem medo de errar

Lembre-se de que você trabalha no departamento de desenvolvimento de uma multinacional que fornece insumos para produção de cabos para instalações elétricas industriais. Você e sua equipe são os responsáveis por esse projeto e devem apresentar os materiais condutores necessários para produção dos cabos de média tensão. Você, então, precisa escolher, baseando-se nos conceitos de condutividade e resistividade, qual material condutor resultará em um cabo de menor diâmetro.

Tradicionalmente, os condutores usados para cabos são de cobre ou de alumínio, cujas condutividades são $6,0 \times 10^7 (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$ e $3,8 \times 10^7 (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$, respectivamente. Consideremos que a sua empresa precisa fornecer um desses materiais para preparar um condutor nu de 100 m, que conduzirá uma corrente máxima de 40 A, com uma queda de tensão máxima de 1 V. Vamos calcular, usando os conhecimentos adquiridos nesta seção, qual seria o diâmetro mínimo do condutor

tanto para o cobre quanto para o alumínio. Para condutores cilíndricos, temos que a resistência de um condutor pode ser calculada de acordo com a segunda lei de Ohm $\left(R = \frac{\rho l}{A}\right)$. Portanto, temos:

$$R = \frac{\rho l}{A} = \frac{l}{\sigma A} = \frac{V}{I}$$

Sabemos que a seção transversal de um cilindro é uma circunferência de raio r , cuja área é πr^2 . Assim, temos que:

$$\frac{l}{\sigma \pi r^2} = \frac{V}{I}$$

Resolvendo essa equação para r , temos:

$$r = \sqrt{\frac{l}{\sigma \pi} \cdot \frac{I}{V}}$$

Como o diâmetro é o dobro do raio:

$$D = 2r = 2 \cdot \sqrt{\frac{l}{\sigma \pi} \cdot \frac{I}{V}}$$

Substituindo os valores dados no exercício, temos que os diâmetros dos condutores serão:

- Para o cobre: $D_{Cu} = 2 \sqrt{\frac{100}{6 \times 10^7 \times \pi} \cdot \frac{40}{1}} \rightarrow D_{Cu} \approx 9mm$
- Para o alumínio: $D_{Al} = 2 \sqrt{\frac{100}{3,8 \times 10^7 \times \pi} \cdot \frac{40}{1}} \rightarrow D_{Al} \approx 11,6mm$.

Concluimos, portanto, que o condutor de cobre terá um diâmetro menor que o de alumínio.

! Atenção

Além de saber calcular o diâmetro do condutor, é necessário levar em consideração o custo de cada um dos insumos que não foram levados em consideração no caso apresentado. Como a densidade do cobre ($8,89g/cm^3$) é maior que a do alumínio ($2,703g/cm^3$), precisaremos de uma massa menor de alumínio para construir o condutor. Como o custo do cobre é superior ao do alumínio, o cabo de cobre ficará mais caro do que o de alumínio. Leia os artigos dos *links* seguintes para maiores detalhes:

- Disponível em: <<http://www.impacta.com.br/blog/2015/03/29/condutor-de-cobre-ou-aluminio-saiba-quando-e-por-que-utiliza-los/>>. Acesso em: 28 jul. 2016.
- Disponível em: <<https://www.osestoreletrico.com.br/por-que-o-cobre-e-amplamente-utilizado-em-sistemas-eletricos/>>. Acesso em: 28 jul. 2016.

Avançando na prática

Cálculo do comprimento de um condutor

Descrição da situação-problema

Você foi contratado para dimensionar um condutor para alimentar um equipamento que está 70 m distante do quadro de distribuição. Foi solicitado que a queda de tensão no condutor seja no máximo de 1 V, quando este conduz uma corrente de 25 A. Além disso, há duas bobinas com condutores de cobre e alumínio de 35 mm² disponíveis. Vamos determinar qual desses condutores deve ser usado. Sabemos que as condutividades do cobre e do alumínio são $6,0 \times 10^7$ e $3,8 \times 10^7$ ($\Omega \cdot \text{m}$)⁻¹, respectivamente.

Resolução da situação-problema

A solução para esse problema é bastante similar à do problema anterior. Como queremos descobrir qual é o comprimento máximo do condutor, basta resolvermos $\frac{l}{\sigma \pi r^2} = \frac{V}{I}$ para o comprimento l . Assim:

$$\frac{l}{\sigma \pi r^2} = \frac{V}{I} \rightarrow l = \sigma A \frac{V}{I}$$

Substituindo os valores do problema, temos:

- Para o cobre:

$$l_{cu} = \sigma A \frac{V}{I} = 6 \times 10^7 \cdot 35 \times (10^{-3})^2 \cdot \frac{1}{25} = 84 \text{ m}$$

- Para o alumínio

$$l_{Al} = \sigma A \frac{V}{I} = 3,8 \times 10^7 \cdot 35 \times (10^{-3})^2 \cdot \frac{1}{25} = 53,2m$$

Concluimos, portanto, que será necessário usar o condutor de cobre para satisfazer o critério de 1 V de queda de tensão máxima.

Faça valer a pena

1. A ligação _____ é aquela que acontece entre íons, isto é, átomos de um determinado elemento químico carregados negativamente ou positivamente. A ligação _____ é aquela na qual ocorre o compartilhamento dos elétrons de átomos adjacentes.

Escolha a alternativa com os tipos de ligações químicas que preenchem corretamente a lacuna do texto.

- Covalente e iônica.
- Iônica e covalente.
- Iônica e metálica.
- Covalente e metálica.
- Metálica e covalente.

2. ρ é a resistividade do material (dada em $\Omega \cdot m$). Outra propriedade importante, que também está relacionada com a facilidade de um determinado material em conduzir corrente, é a condutividade σ (medida em $(\Omega \cdot m)^{-1}$), definida como o inverso da resistividade.

Os parâmetros de resistividade e condutividade são extremamente importantes para verificar se determinado metal é bom ou mau condutor. Sobre o assunto, analise as afirmativas a seguir:

I. Quanto maior for a resistividade de um material, maior será a sua condutividade.

II. A condutividade não tem nenhuma relação com a resistência de um material.

III. Quanto maior for a resistividade de um material, menor será a sua condutividade.

É correto o que se afirma apenas em:

- I.
- II.

- c) III.
- d) I e III.
- e) II e III.

3. ρ é a resistividade do material (dada em $\Omega \cdot m$). Outra propriedade importante, que também está relacionada com a facilidade de um determinado material em conduzir corrente, é a condutividade σ (medida em $(\Omega \cdot m)^{-1}$), definida como o inverso da resistividade.

Calcule a resistência de um fio de alumínio de 200 m de comprimento e 1 mm de raio, considerando que a condutividade do alumínio é

$$\sigma_{Al} = 3,8 \times 10^7 (\Omega \cdot m)^{-1}.$$

- a) $R = 1,73 \Omega$.
- b) $R = 1,60 \Omega$.
- c) $R = 1,63 \Omega$.
- d) $R = 1,68 \Omega$.
- e) $R = 1,70 \Omega$.

Seção 1.2

Materiais semicondutores

Diálogo aberto

Seja bem-vindo à Seção 1.2 do curso de Medidas e Materiais Elétricos. Começamos esta unidade estudando o comportamento físico e as aplicações de materiais condutores e semicondutores. Nesta seção, nós estudaremos os materiais semicondutores e o efeito Hall.

Os materiais semicondutores possuem condutividade elétrica, como o próprio nome sugere, maior que a de um isolante mas menor que a de um condutor. A condutividade elétrica dos semicondutores pode ser controlada pela inserção de impurezas (dopagem). Esses materiais são a base da indústria eletrônica, uma vez que é a partir deles que são construídos os dispositivos eletrônicos como diodos e transistores. Outra aplicação importante que temos dos materiais semicondutores é a de sensores baseados em efeito Hall, que podem ser usados para resolver o desafio proposto nesta seção. Portanto, o domínio sobre esses tópicos é fundamental.

Nesta unidade, você deve se colocar no lugar de um engenheiro que trabalha no departamento de desenvolvimento de uma multinacional, que fornece insumos para produção de cabos para instalações elétricas industriais. Você e sua equipe, responsáveis por esse projeto, devem agora usar uma máquina bobinadeira para preparar os cabos para transporte. Ao mesmo tempo em que parte da equipe definia o material e os parâmetros dos cabos a serem fornecidos ao cliente, outra parte dela trabalhava na atualização tecnológica da bobinadeira, uma vez que vocês precisam trabalhar em equipe, já que, do contrário, não conseguirão cumprir os prazos.

Para conhecer o comprimento do cabo, você precisa saber exatamente o número de voltas com que ele foi enrolado sobre um cilindro de madeira. Você sabe que uma ótima solução envolve o uso de um sensor de efeito Hall. Para resolvermos esse desafio, atente para os conceitos que abordaremos no decorrer do texto.

Bons estudos!

Não pode faltar

Estudamos na seção anterior as principais propriedades dos materiais condutores e vimos que, com base na condutividade, podemos classificar os materiais elétricos em três grandes grupos: os condutores, os isolantes e os semicondutores, sendo este último o de estudo desta seção. Como o próprio nome sugere, um material semicondutor não conduz eletricidade tão bem quanto um condutor nem isola eletricamente da mesma forma que o faz um isolante. Assim, por ter uma característica intermediária entre condutor e isolante, esses materiais são chamados de semicondutores.

As propriedades desses materiais podem depender da presença de impurezas no material, isto é, da presença de pequenas quantidades de outros elementos químicos na composição do semicondutor. Ademais, há duas classes de materiais semicondutores, como segue:

- **Extrínsecos:** as características elétricas dependem dos átomos de impureza.
- **Intrínsecos:** o comportamento elétrico depende da estrutura eletrônica do material puro.

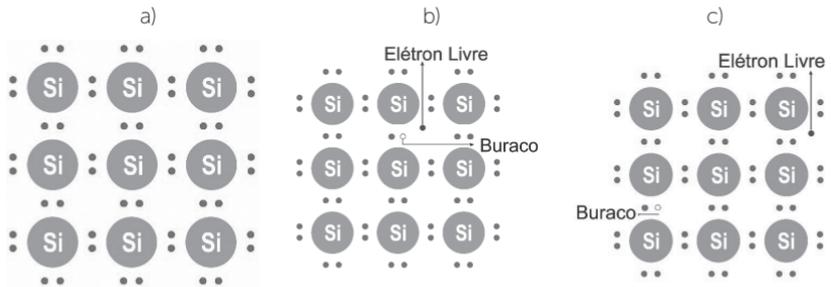
Semicondução intrínseca

Os elementos semicondutores mais comuns que encontramos são o silício (**Si**) e o germânio (**Ge**), que estão localizados no Grupo IVA da tabela periódica e, portanto, possuem quatro elétrons na camada de valência. Você já estudou anteriormente que, para que um átomo se estabilize, ele necessita de oito elétrons na camada de valência (regra do octeto). Observe na Figura 1.7a a ligação entre átomos de silício. Como há pares de elétrons compartilhados entre átomos vizinhos, essa ligação é covalente e cada átomo está com oito elétrons. A partir do momento no qual temos um campo elétrico aplicado ao material, forneceremos energia para os elétrons, os quais podem, por fim, se desprender do núcleo, criando um elétron livre. Além desse elétron livre, cria-se uma lacuna (ou buraco) que representa um espaço onde há ausência de um elétron, a qual pode ser preenchida por outros elétrons livres. Temos aqui um comportamento extremamente interessante: ao mesmo tempo em que um elétron sai da posição A e vai para a posição

B, há também o movimento da lacuna da posição B para a posição A. Portanto, como o movimento do buraco foi contrário ao do elétron, concluímos que o buraco tem o comportamento de uma partícula carregada positivamente, com a mesma carga do elétron em módulo ($|e| = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$).

$$\sigma = n|e|\mu_e + p|e|\mu_b .$$

Figura 1.7 | a) Ligação eletrônica do Si; b) Criação de um elétron livre e um buraco; c) Elétron livre e buraco em movimento pela ação de um campo elétrico



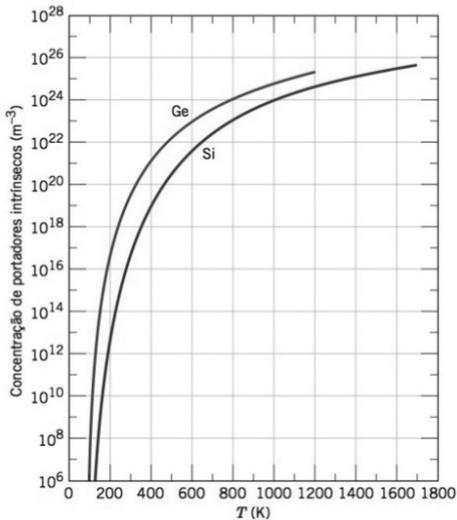
Fonte: adaptado de Callister (2016, p. 685).

Em que n e p são o número de elétrons livres e de buracos, respectivamente, μ_e e μ_b são as mobilidades eletrônicas dos elétrons e dos buracos, respectivamente. No caso dos semicondutores intrínsecos, n e p são aproximadamente iguais e, portanto, temos:

$$\sigma = n_i |e| (\mu_e + \mu_b) .$$

Em que n_i é a concentração de portadores intrínsecos. É importante conhecermos como a concentração de portadores intrínsecos varia com a temperatura. Conforme aumentamos a temperatura, há mais energia para excitar os elétrons e passá-los da banda de valência para a banda de condução. Dessa forma, a concentração de portadores intrínsecos (tanto para o germânio quanto para o silício) aumenta com o aumento da temperatura, conforme apresentado na Figura 1.8.

Figura 1.8 | Dependência da concentração de portadores intrínsecos com relação à temperatura



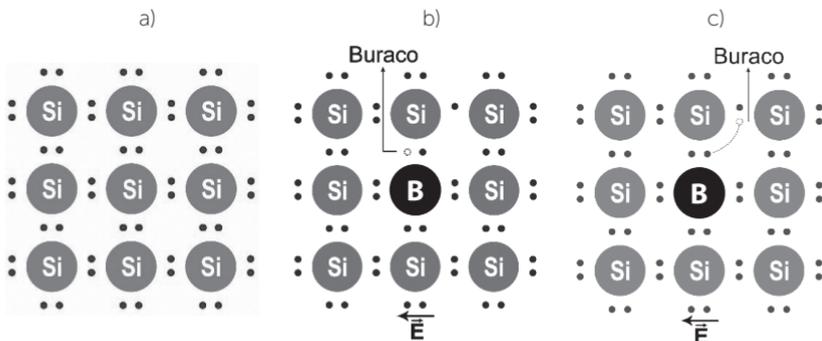
Fonte: adaptado de Callister e Rethwisch (2016, p. 685).

Semicondução extrínseca

Conforme vimos anteriormente, um semicondutor extrínseco é aquele material cujas propriedades elétricas dependem das impurezas inseridas nele. Há duas classificações para esses materiais: podem ser chamados de tipo n e tipo p, que estudaremos a seguir.

Nos materiais semicondutores extrínsecos tipo p, a impureza inserida é um elemento que possui três elétrons na camada de valência, como o Boro (B), localizado no grupo IIIA da tabela periódica. Conforme podemos verificar na Figura 1.9, há um elétron a menos do que os oito necessários para completar a camada de valência. Em outras palavras, há um buraco associado a esse átomo de impureza em vez de um elétron livre. Essa impureza, em específico, é classificada como receptora, uma vez que é capaz de aceitar um elétron livre na sua camada de valência e, portanto, cria-se um novo buraco.

Figura 1.9 | a) Ligação eletrônica do Si; b) Introdução de um átomo de Boro e criação de um buraco; c) Buraco em movimento pela ação de um campo elétrico (\vec{E})



Fonte: adaptado de Callister e Rethwisch (2016, p. 683).

O número de buracos é muito maior que o número de elétrons livres nesse tipo de material, que recebem a classificação de semicondutores tipo P. A condutividade para esse material é, portanto, consequência, praticamente, apenas dos buracos presentes, ou seja:

$$\sigma \approx p|e|\mu_b \cdot$$



Exemplificando

Vamos calcular a condutividade e a resistividade elétrica do silício à temperatura ambiente, quando este é dopado com 10^{20} átomos de fósforo por metro cúbico, considerando que a mobilidade dos elétrons é $0,14 \frac{m^2}{V \cdot s}$.

Resolução:

Sabemos que a condutividade para os materiais semicondutores extrínsecos tipo P é $\sigma \approx n|e|\mu_e$. Substituindo os valores indicados, calculamos a condutividade desse material:

$$\sigma \approx 10^{20} | -1,6 \times 10^{-19} | \cdot 0,14$$

$$\sigma = 2,24 (\Omega \cdot m)^{-1} \cdot$$

Sabemos que a resistividade é o inverso da condutividade. Dessa maneira, temos que:

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \rightarrow \rho = \frac{1}{2,24} = 0,446 \Omega \cdot m.$$



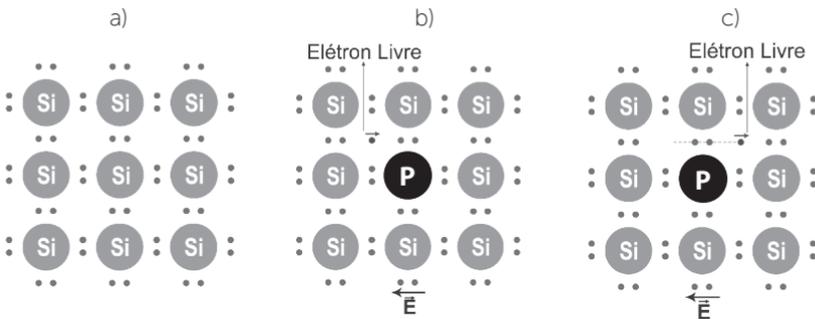
Refleta

Podemos controlar a condutividade e a resistividade dos materiais semicondutores a partir da dopagem. Seria possível diminuir mais a resistividade do Si no exemplo anterior? Caso seja possível, como poderíamos fazê-lo?

Semicondução extrínseca tipo N

De maneira contrária ao que vimos para os materiais semicondutores tipo P, nos materiais tipo N a impureza inserida é pentavalente, isto é, possui cinco elétrons na camada de valência (grupo VA da tabela periódica). Nesse caso, os átomos de Si ficarão com oito elétrons na camada de valência e ainda haverá um elétron livre, conforme apresentado na Figura 1.10.

Figura 1.10 | a) Ligação eletrônica do Si; b) Introdução de um átomo de fósforo (impureza pentavalente) com liberação de um elétron; c) Elétron livre em movimento pela ação de um campo elétrico (\vec{E})



Fonte: adaptado de Callister e Rethwisch (2016, p. 681).

O número de elétrons livres é muito maior que o número de buracos nesse tipo de material. A condutividade para esse material é, portanto,

consequência praticamente apenas dos elétrons livres presentes, ou seja:

$$\sigma \approx n|e|\mu_e.$$



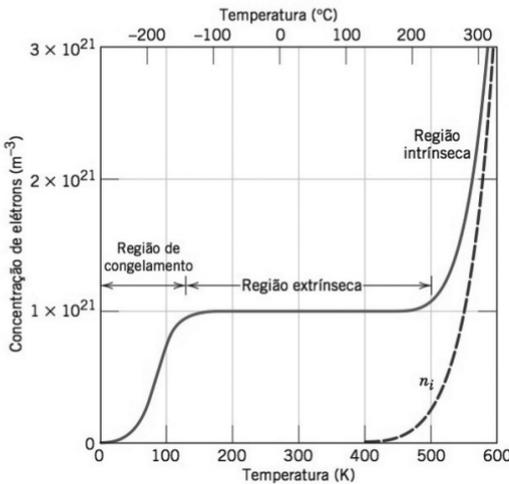
Assimile

É importante termos em mente que os materiais semicondutores tipos P ou N não estão carregados positivamente ou negativamente, respectivamente. Na verdade, esses materiais têm carga neutra, pois o número de prótons e de elétrons dos átomos de impureza são os mesmos. Portanto, os índices P e N remetem-se ao tipo de carga em movimento que temos no material, isto é, se são buracos ou se são elétrons que se movimentam.

A concentração de portadores extrínsecos e, conseqüentemente, a condutividade elétrica para os semicondutores extrínsecos, é dependente da temperatura, conforme apresentado na Figura 1.11 para silício dopado com $10^{21} m^{-3}$ átomos de fósforo. Há três regiões de interesse:

- Para temperaturas abaixo de 100 K, a concentração de elétrons cai drasticamente com a temperatura, chegando perto de zero em 0 K. Essa região é conhecida como **região de congelamento**.
- Para temperaturas entre 150 K e 475 K, a concentração de elétrons é praticamente constante e essa região é conhecida como **região extrínseca**. A largura dessa região depende da concentração de impurezas.

Figura 1.11 | Dependência da concentração de elétron em relação à temperatura



Fonte: adaptado de Callister e Rethwisch (2016, p. 685).

- Para temperaturas maiores que 475 K, a concentração de elétrons fica maior que o número de impurezas (no exemplo, fósforo) e aumenta da mesma maneira que ocorre no material intrínseco. Dessa forma, essa região é conhecida como **região intrínseca**.



Pesquise mais

Além da concentração de portadores, a mobilidade eletrônica também depende da temperatura e da quantidade de impurezas que, por sua vez, interferem na condutividade elétrica do material. Leia o item 18.7 do livro:

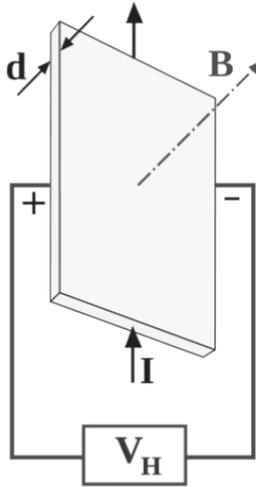
CALLISTER JR, W. D.; RETHWISCH, David G. Ciência e engenharia dos materiais: uma introdução. 9 ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 2016. 912 p.

Efeito Hall

Como temos dois tipos de materiais semicondutores extrínsecos (tipos P e N), surge uma dúvida: como podemos distingui-los sem conhecimento prévio da impureza inserida? Uma forma de fazê-lo é a partir do estudo do efeito Hall, nomeado em homenagem ao físico norte-

americano Edwin Herbert Hall (1855-1938). Ao aplicarmos um campo magnético perpendicularmente a uma corrente elétrica que atravessa um material semicondutor, teremos a deflexão lateral dos elétrons para um lado e dos buracos para outro. O resultado disso é uma diferença de potencial no material, como vemos na Figura 1.12.

Figura 1.12 | Efeito Hall



Fonte: <<https://goo.gl/0wfREB>>. Acesso em: 4 ago. 2016.

Essa diferença de potencial é conhecida como tensão Hall (V_H) e pode ser calculada por:

$$V_H = \frac{R_H I_x B_z}{d}$$

Em que R_H é o coeficiente de Hall e é constante para um material, I_x é a corrente elétrica que atravessa o material na direção x , B_z é o campo magnético (medido em Tesla – T) que atravessa o material na direção z , e d é a espessura do material (dada em m). Para os metais, o coeficiente de Hall é negativo e é assim calculado:

$$R_H = \frac{1}{n|e|}$$

Além disso, a mobilidade eletrônica pode ser calculada da seguinte forma:

$$\mu_e = |R_H| \sigma = \frac{\sigma}{n|e|} .$$

Quando os portadores em movimento são elétrons, como é o caso dos metais, tanto R_H quanto V_H serão negativos. Ademais, quando os portadores forem positivos (buracos), tanto R_H quanto V_H serão positivos. Podemos avaliar, portanto, quais são os portadores majoritários de um material a partir do sinal da tensão de Hall.

O efeito Hall pode acontecer tanto em materiais condutores quanto em semicondutores e o material escolhido precisa de alta mobilidade eletrônica para maior aplicabilidade industrial, como **GaAs**.

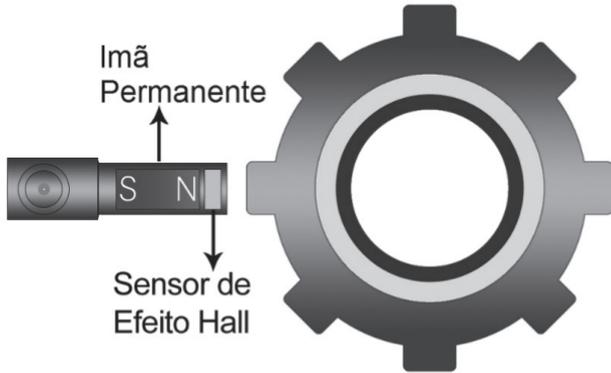
Diversos sensores usados na indústria são baseados no efeito Hall. Dentre os mais comuns, podemos citar sensores de deslocamento, indicadores de nível e sensor de corrente. Esses sensores podem ser acoplados a diversos circuitos eletrônicos e/ou digitais, como contadores e comparadores.

Sem medo de errar

Você, então, trabalha no departamento de desenvolvimento de uma multinacional que fornece insumos para produção de cabos para instalações elétricas industriais. Já discutimos anteriormente quais serão os materiais condutores fornecidos para o cliente. Precisamos também medir o número de rotações de uma máquina bobinadeira, utilizada para enrolar os cabos em um cilindro de madeira, para garantir que o comprimento de cabo fornecido é adequado.

Para essa medição, podemos usar um sensor de efeito Hall e um ímã acoplado na parte girante, como mostra a Figura 1.13. A cada rotação completa dessa roda, o ímã passará uma única vez pelo sensor Hall, alterando a tensão lida no sensor.

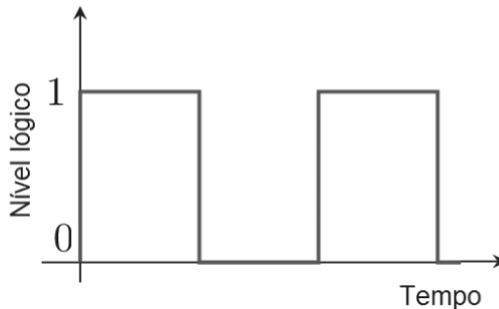
Figura 1.13 | Sensor de efeito Hall para medição de número de rotações



Fonte: elaborada pelo autor.

Podemos usar uma abordagem digital e dizer que, quando o ímã está próximo do sensor, teremos nível lógico 1 e, caso contrário, nível lógico 0. Dessa forma, a cada rotação completa, teremos um único nível lógico 1 e uma sequência de 0 até que o ímã passe novamente pelo sensor, formando uma onda quadrada (Figura 1.14). Usando-se um circuito contador, podemos utilizar a alteração do nível lógico do sensor Hall para incrementar o valor da contagem, até o número desejado.

Figura 1.14 | Onda quadrada com níveis lógicos 1 e 0



Fonte: elaborada pelo autor.

Avançando na prática

Medição de velocidade de rotação com sensor de efeito Hall

Descrição da situação-problema

O efeito Hall pode ser usado em diversas aplicações industriais. Imagine que você é um engenheiro que presta consultoria e que seu cliente solicitou a apresentação de uma maneira simples e automatizada de medir a velocidade de rotação de uma máquina. O que você indicaria para ele?

Resolução da situação-problema

Usando um sensor de efeito Hall, podemos medir a velocidade de rotação analisando a forma de onda quadrada gerada pelo sensor (similar à da Figura 1.14). Sabemos que o período da onda quadrada é exatamente o tempo necessário para uma rotação completa da roda. Dessa forma, medindo-se esse período, em segundos, podemos calcular a frequência de giro em hertz. Podemos ainda contar quantos períodos há em um segundo de onda e calcular a velocidade de giro em rotações por segundo (rps) ou em rotações por minuto (rpm), multiplicando a velocidade em rps por 60.

Faça valer a pena

1. Nos semicondutores intrínsecos, o comportamento elétrico depende apenas da estrutura eletrônica do material puro, não necessitando de impurezas.

À temperatura ambiente, a condutividade elétrica do silício é $4 \times 10^{-4} (\Omega \cdot m)^{-1}$ e as mobilidades dos elétrons e dos buracos são $0,14 \frac{m^2}{V \cdot s}$ e $0,05 \frac{m^2}{V \cdot s}$. Calcule o número de portadores intrínsecos para esse material.

- a) $n_i = 1,42 \times 10^{14} m^{-3}$.
- b) $n_i = 1,32 \times 10^{16} m^{-3}$.
- c) $n_i = 1,25 \times 10^{14} m^{-3}$.
- d) $n_i = -1,32 \times 10^{14} m^{-3}$.
- e) $n_i = 1,54 \times 10^{14} m^{-3}$.

2. A semicondução extrínseca é aquela na qual as propriedades elétricas do material dependem das impurezas inseridas nele, o que resulta em duas possibilidades de materiais chamados tipo N e tipo P. Para que isso aconteça, é necessário dopar o material semicondutor com uma impureza.

Calcule a condutividade elétrica à temperatura ambiente do germânio dopado com 10^{21} átomos de fósforo por metro cúbico. A mobilidade dos elétrons é $0,38 \frac{m^2}{V \cdot s}$.

a) $61,6 (\Omega \cdot m)^{-1}$.

b) $62,8 (\Omega \cdot m)^{-1}$.

c) $60,8 (\Omega \cdot m)^{-1}$.

d) $63,4 (\Omega \cdot m)^{-1}$.

e) $61,3 (\Omega \cdot m)^{-1}$.

3. Ao aplicarmos um campo magnético perpendicularmente a uma corrente elétrica que atravessa um material semicondutor, teremos a deflexão lateral dos elétrons para um lado e dos buracos para outro. O resultado disso é uma diferença de potencial no material conhecida como tensão Hall (V_H).

Considere uma chapa de germânio intrínseco de 25 mm de espessura, conduzindo uma corrente de 1 A. Calcule a tensão Hall se aproximarmos um ímã que produz um campo magnético de 0,6 T. A mobilidade eletrônica do silício é $0,38 \frac{m^2}{V \cdot s}$ e sua condutividade é $\sigma = 2,2 (\Omega \cdot m)^{-1}$

Assinale a alternativa com o valor correto.

a) $-3,6 V$.

b) $3,5 V$.

c) $3,45 V$.

d) $-3,45 V$.

e) $-3,5 V$.

Seção 1.3

Dispositivos semicondutores

Diálogo aberto

Diálogo aberto

Seja bem-vindo à Seção 1.3 do curso de Medidas e Materiais Elétricos. Até o momento, nós já estudamos as propriedades dos materiais condutores e semicondutores. Nesta seção, nós trataremos de algumas das aplicações mais importantes dos materiais semicondutores: os diodos e transistores, comumente chamados de dispositivos semicondutores.

Diodos são dispositivos usados em diversos sistemas eletrônicos quando precisamos alterar a forma de onda de tensão. Fontes de tensão contínua (CC) utilizam diodos como retificadores de onda completa, isto é, haverá apenas valores positivos de tensão em vez de parcelas positivas e negativas de tensão. Por fim, há uma conversão de um sinal de corrente alternada (CA) para um sinal CC.

Os dispositivos semicondutores, particularmente os transistores, foram um dos principais responsáveis pelo grande desenvolvimento da eletrônica que ocorreu no século passado. Transistores são utilizados geralmente como chaves eletrônicas controláveis e amplificadores de sinais. Ou seja, o transistor pode trabalhar como uma chave ora aberta, para passagem de um sinal, ora fechada, algo particularmente útil quando trabalhamos com sistemas digitais, que utilizam código binário (1 ou 0). O transistor bipolar de junção será o primeiro a ser estudado, e, logo em seguida, o transistor de efeito de campo, presente nos mais diversos equipamentos eletrônicos da atualidade. Dessa forma, o entendimento desses dispositivos é a porta de entrada para o mundo da eletrônica analógica.

Nesta unidade, você deve se colocar no lugar de um engenheiro que trabalha no departamento de desenvolvimento de uma multinacional que fornece insumos para produção de cabos para instalações elétricas industriais. Você e sua equipe são os responsáveis por esse projeto e ainda precisam apresentar um sistema para contar a quantidade de voltas completas da máquina bobinadeira, que são detectadas pelo sensor Hall. Com isso, vocês poderão enviar a proposta completa que o cliente está aguardando e ainda relatar a proposta de atualização tecnológica

da máquina bobinadeira para seu gestor. Com o trabalho em equipe e a divisão de tarefas, vocês estão prestes a finalizar ambas as demandas dentro dos prazos estabelecidos.

Bons estudos!

Não pode faltar

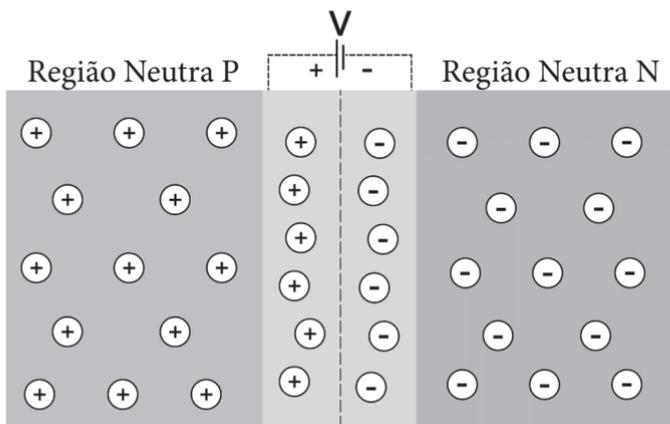
Na seção anterior, nós estudamos algumas propriedades dos materiais semicondutores intrínsecos e extrínsecos (tipos P e N). Dentre essas propriedades, vimos como um elétron livre e/ou um buraco são gerados e qual é a influência na condutividade do semicondutor. Nesta seção, nós estudaremos o princípio de funcionamento dos diodos e dos transistores e algumas aplicações de ambos os dispositivos.

Diodos

Os diodos são dispositivos semicondutores criados a partir de uma junção P-N, isto é, uma combinação entre materiais semicondutores extrínsecos tipo P e tipo N. Estudamos na seção anterior que esses materiais possuem buracos (ou lacunas) e elétrons livres, respectivamente. Vamos estudar agora o que acontece quando juntamos esses materiais?

Considere a junção P-N da Figura 1.15. Podemos ver que a porção de material tipo P tem um excesso de cargas positivas (buracos) e a porção tipo N tem excesso de elétrons livres (carga negativa). Quando juntamos os dois materiais ocorre uma recombinação de cargas na junção, isto é, parte dos elétrons livres flui para o lado tipo P e preenche alguns buracos, criando uma região neutra chamada de camada de depleção (ou zona de recombinação).

Figura 1.15 | Junção P-N

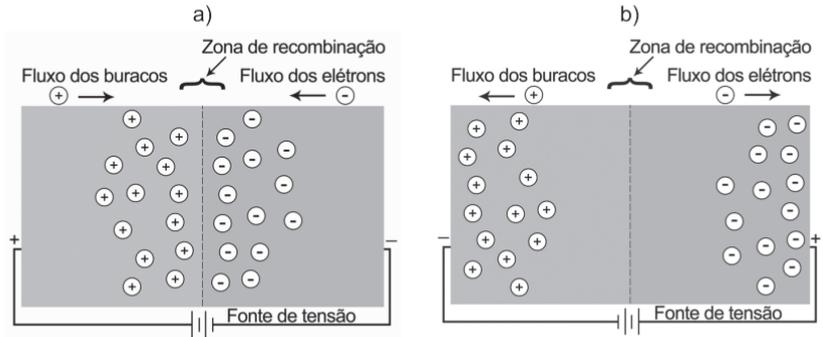


Fonte: elaborada pelo autor.

As cargas recombinadas geram ainda um campo elétrico que criará uma força de oposição ao movimento dos elétrons livres, chamada de barreira de potencial (apresentada como uma fonte de tensão na Figura 1.15). À temperatura ambiente, a barreira de potencial é de 0.3 V e 0.7 V para diodos construídos com germânio e silício, respectivamente. Para polarizarmos um diodo, devemos ligar uma bateria (fonte CC) nos seus terminais, existindo aqui duas possibilidades:

- Diodo diretamente polarizado (Figura 1.16a): os terminais positivo e negativo da bateria estão conectados aos lados P e N, respectivamente, de forma que os elétrons são repelidos do lado N e os buracos são repelidos do lado P em direção à junção e podem se recombinar. Com isso, a barreira de potencial é reduzida de forma que teremos fluxo de elétrons (corrente elétrica). É necessário fornecer uma tensão maior que aquela da barreira de potencial.
- Diodo inversamente polarizado (Figura 1.16b): os terminais positivo e negativo da bateria estão conectados ao lado N e P, respectivamente, de forma que os elétrons são atraídos do lado N e os buracos, do lado P, em direção aos terminais da bateria. Dessa forma, a barreira de potencial aumentará e não haverá fluxo de elétrons.

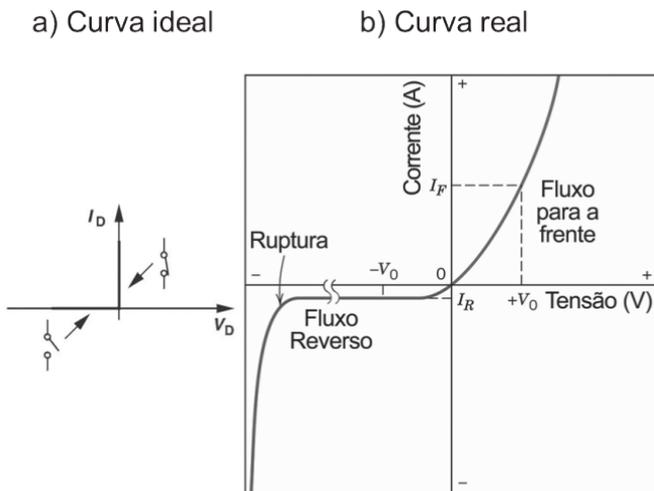
Figura 1.16 | Polarização direta e reversa do diodo



Fonte: adaptado de Callister e Rethwisch (2016, p. 691).

Quando um diodo estiver diretamente polarizado, haverá um fluxo direto para corrente, nesse caso, portanto, o diodo conduz. Do contrário, haverá um fluxo reverso de corrente, isto é, uma corrente tão pequena que diremos que o diodo parou de conduzir. Outra forma de analisarmos esse comportamento é considerar que o diodo é uma chave fechada quando diretamente polarizado e uma chave aberta quando inversamente polarizado (Figura 1.17a). O comportamento tensão-corrente do diodo real está apresentado na Figura 1.17b.

Figura 1.17 | Curva característica do diodo com comportamento tensão-corrente



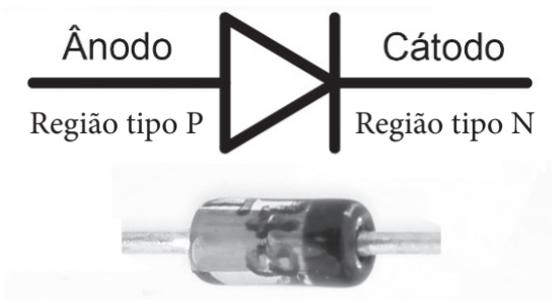
Fonte: adaptado de Razavi (p. 55, 2000) e de Callister e Rethwisch (p. 692, 2016).



Diodos conduzem quando polarizados diretamente (chave fechada) e bloqueiam quando polarizados inversamente (chave aberta).

O símbolo do diodo de junção P-N para circuitos eletrônicos está apresentado na Figura 1.18, em que o ânodo e o cátodo representam os materiais tipos P e N, respectivamente. Portanto, para polarizarmos diretamente esse diodo, basta ligarmos o terminal positivo da bateria no ânodo e o negativo no cátodo. Ademais, a Figura 1.18 apresenta um diodo comercial.

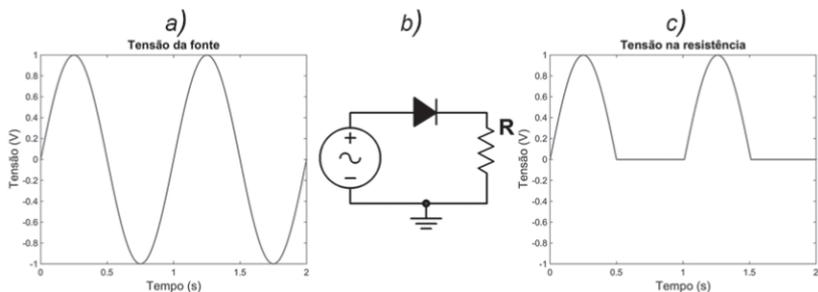
Figura 1.18 | Diodo de junção P-N e seu símbolo



Fonte: adaptado de <http://d1gsvnjtkwr6dd.cloudfront.net/large/SC-DI-1N4148_LRG.jpg>. Acesso em: 16 ago. 2016.

Uma das principais aplicações de diodos de junção P-N em circuitos eletrônicos é o retificador de meia onda (Figura 1.19b), no qual apenas a parte de um sinal que polariza diretamente o diodo é conduzida. Considere um sinal senoidal (Figura 1.19a) como sinal de entrada em um diodo. Durante o semiciclo positivo desse sinal, o diodo está diretamente polarizado, razão pela qual esse sinal é conduzido para a saída. Por sua vez, no caso do semiciclo negativo, o diodo está inversamente polarizado e, portanto, não há fluxo de corrente. Dessa forma, o sinal não é conduzido para a saída. O sinal retificado está apresentado na Figura 1.19c. Como apenas metade do sinal original permanece no circuito, este é um retificador de meia onda.

Figura 1.19 | Retificador de meia onda com diodo de junção P-N

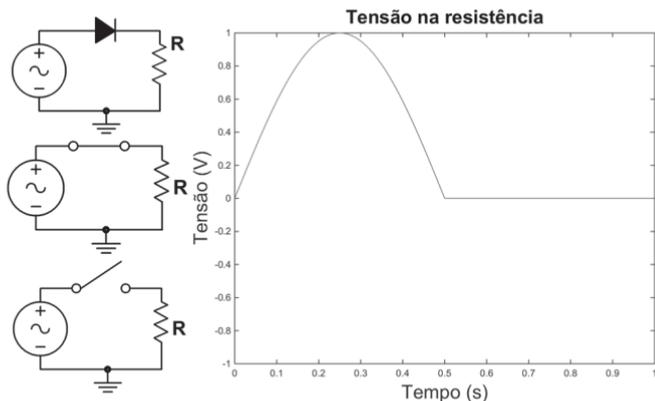


Fonte: elaborada pelo autor.



Exemplificando

Uma aplicação importante de diodos de junção P-N em circuitos eletrônicos é o retificador de meia onda, no qual apenas a parte de um sinal que polariza diretamente o diodo é conduzida. Precisamos analisar o circuito em dois momentos distintos: semiciclo positivo e semiciclo negativo. No semiciclo positivo, o diodo está diretamente polarizado e, portanto, conduz corrente normalmente (chave fechada). O circuito fica então resumido ao apresentado, e a tensão na resistência (de carga) é a tensão da fonte de alimentação. Por sua vez, no semiciclo negativo, está inversamente polarizado e não conduz corrente, funcionando como uma chave aberta. Nessa condição, o circuito está aberto e não há corrente pelo resistor, de forma que a tensão nos seus terminais é zero.



Fonte: elaborada pelo autor.



Diodos podem ser usados para controlar formas de onda de tensão. Conversores de tensão, por exemplo, podem usar quatro diodos em PONTE, de forma a converter uma tensão alternada (AC) para contínua (CC). Vimos no último exemplo que o diodo pode retificar metade de um ciclo de corrente alternada. Existe uma forma de retificar tanto o ciclo positivo quanto o negativo? Qual seria essa forma? Como transformar o ciclo negativo em positivo também?

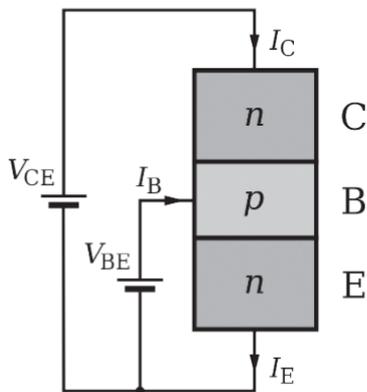
Transistor bipolar de junção (TBJ ou BJT)

Os transistores são dispositivos que possuem duas aplicações básicas: eles podem trabalhar como chaves eletrônicas e como amplificadores. Na primeira situação, os transistores permitem ou não a passagem de corrente em determinados momentos da operação de um circuito eletrônico. Esse chaveamento, por não ter contatos móveis, pode ocorrer a velocidades muito altas. Na segunda aplicação, o transistor pode amplificar um sinal elétrico.

O primeiro transistor que estudaremos é o bipolar de junção que possui duas junções P-N, configuráveis em P-N-P ou N-P-N, além de três regiões distintas conhecidas como emissor, base e coletor, conforme Figura 1.20.

Analisaremos o funcionamento do transistor tipo N-P-N de maneira similar ao caso do diodo. Ao fazermos as junções N-P e P-N, teremos duas camadas de depleção resultantes da recombinação de elétrons e buracos. A junção emissor-base é diretamente polarizada, ao passo que a junção coletor-base é inversamente polarizada (Figura 1.20). Dessa forma, o emissor (material tipo N) injetará uma grande quantidade de elétrons na base (material tipo P). Apesar de ocorrer recombinação com os buracos, a maioria dos elétrons atravessará a base em direção ao coletor (material tipo n), onde serão atraídos pelo terminal positivo da fonte. Como resultado, há o fluxo de elétrons vindos tanto do emissor quanto do coletor, o que representa um aumento na quantidade de portadores de carga e, portanto, na corrente elétrica (amplificação).

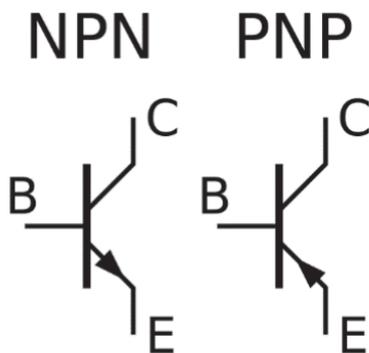
Figura 1.20 | Transistor bipolar de junção do tipo N-P-N como amplificador de tensão



Fonte: <<https://goo.gl/7UNyPT>>. Acesso em: 23 ago. 2016.

O símbolo usado para o BJT depende do seu tipo (P-N-P ou N-P-N). Ambos estão apresentados na Figura 1.21.

Figura 1.21 | Símbolos utilizados para transistores N-P-N e P-N-P



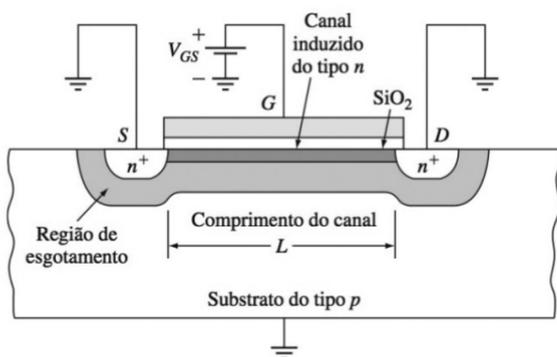
Fonte: adaptado de <<https://goo.gl/JvwJGs>>. Acesso em: 23 ago. 2016.

Transistor de Efeito de Campo (FET)

Em transistores de efeito de campo, a passagem de portadores de carga está condicionada à presença de um campo elétrico produzido por uma tensão. Vamos estudar agora o funcionamento de um dos

transistores de efeito de campo mais comum na indústria, o MOSFET (transistor de efeito de campo de semiconductor de óxido metálico, em inglês) do tipo N (NMOS). Nesse dispositivo, duas regiões de silício extrínseco do tipo N são depositadas em um substrato de silício tipo P. Há três terminais no dispositivo NMOS: fonte (*source*), por onde entram os elétrons; dreno (*drain*), por onde saem os elétrons; e porta (*gate*), que servirá para controlarmos o NMOS (Figura 1.22). Quando aplicamos uma tensão positiva à porta, o campo elétrico produzido atrairá elétrons da fonte e criará um caminho de condução entre fonte e dreno. Conseqüentemente, haverá fluxo de elétrons da fonte para o dreno quando houver tensão positiva na porta do NMOS (SMITH, HASHEMI, 2013). Há ainda o dispositivo PMOS, cuja diferença construtiva é o substrato do tipo P e duas regiões de silício do tipo N depositadas nele.

Figura 1.22 | Seção transversal do NMOS



Fonte: adaptado de Smith e Hashemi (2013, p. 561).



Pesquise mais

A Lei de Moore, em homenagem ao então presidente da Intel, Gordon Moore, nos diz que a quantidade de transistores dentro de um mesmo *chip* dobra a cada 18 meses. Isso implica que a capacidade de processamento dobra nesse mesmo período. Para ler mais sobre a Lei de Moore, acesse o *link*: <<http://www.intel.com.br/content/www/br/pt/silicon-innovations/moores-law-technology.html>>. Acesso em: 24 ago. 2016.



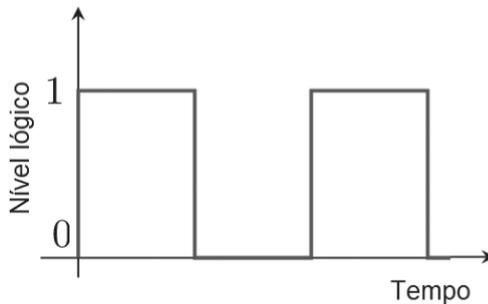
O transistor foi um dispositivo semicondutor que revolucionou a indústria eletrônica. A miniaturização de circuitos eletrônicos em circuitos integrados fez que se ocupassem espaços cada vez menores, diminuindo, conseqüentemente, as dimensões de equipamentos eletrônicos. Faça *login* na área do estudante e clique no *link* seguinte para descobrir mais sobre o processo de fabricação de circuitos integrados microeletrônicos:

SMITH, W. F.; HASHEMI, J. Fundamentos de engenharia e ciência dos materiais. 5 ed. Porto Alegre: AMGH Editora, 2013. 734 p.

Sem medo de errar

Lembre-se de que você trabalha no departamento de desenvolvimento de uma multinacional que fornece insumos para produção de cabos para instalações elétricas industriais. Já discutimos anteriormente quais serão os materiais condutores fornecidos para o cliente e como poderemos utilizar um sensor de efeito Hall para controlar o número de rotações de uma máquina bobinadeira. Vamos mostrar agora como um transistor pode ser usado para auxiliar a contagem de rotações. Nós vimos que, a cada rotação completa da bobinadeira, nós teríamos um período de sinal elétrico correspondente à forma de uma onda quadrada (Figura 1.23).

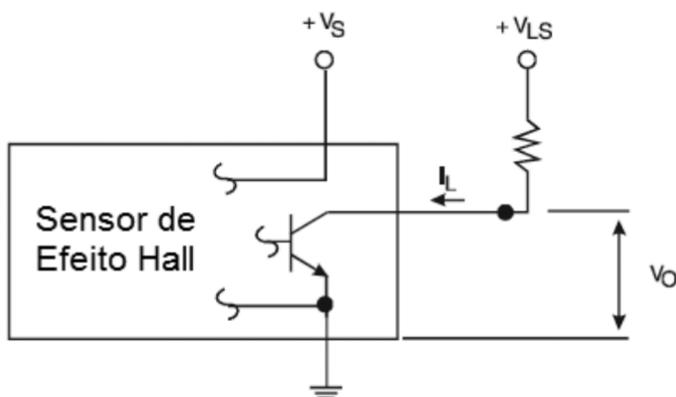
Figura 1.23 | Onda quadrada com níveis lógicos 1 e 0



Fonte: elaborada pelo autor.

Para conseguirmos essa forma de onda, nós precisamos ter um transistor atuando junto com o sensor de efeito Hall. Na Figura 1.24, temos um sensor de efeito Hall ligado à base de um transistor NPN. A tensão V_0 é a tensão de saída desse sistema, medida entre o coletor e a terra. Quando o sensor estiver ligado, haverá fluxo de corrente da fonte de alimentação para terra, e a tensão V_0 será igual a zero. Caso contrário, a tensão V_0 será a tensão da fonte de alimentação V_{LS} . Portanto, quando o sensor estiver ligado, teremos nível lógico 0 na saída e, conseqüentemente, teremos nível lógico 1 quando estiver desligado.

Figura 1.24 | Saída digital de sensor de efeito Hall



Fonte: adaptada de Honeywell ([s.d.], p. 19).

Agora temos todas as informações necessárias para elaborar o projeto completo de atualização tecnológica da máquina bobinadeira e ainda enviar ao cliente uma proposta finalizada.

! Atenção

É importante destacar que grande parte dos sensores de efeito Hall vem encapsulada na forma de circuitos integrados (CI), inclusive com um transistor implementado internamente. Dessa forma, não precisamos necessariamente de um transistor externo para ter o sinal digital, mas sim de um CI que já possui essa saída. Verifique o link para acessar a folha de dados (*datasheet*) de um sensor de efeito Hall com saída digital. (Obs.: É

importante notar que as folhas de dados de componentes eletrônicos costumam ser escritas em inglês).

Disponível em: <<https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/General/Hall-US1881EUA.pdf>>. Acesso em: 24 ago. 2016

Avançando na prática

Controle de um LED

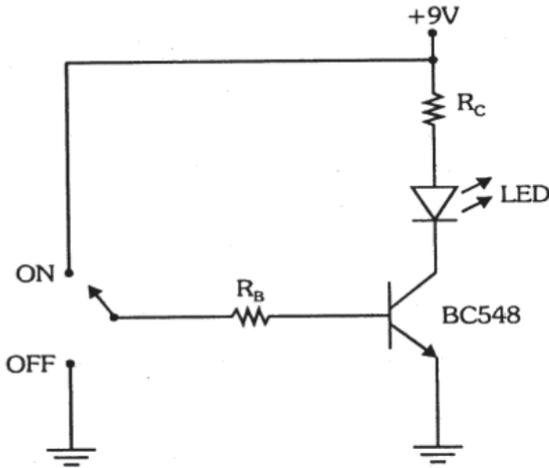
Descrição da situação-problema

Você é um engenheiro eletricitista trabalhando para uma empresa e precisa encontrar uma solução para sinalização em um circuito eletrônico. Um LED (diodo emissor de luz) é um diodo que emite luz ao ser diretamente polarizado. Vamos apresentar uma solução para acionamento de um LED usando um transistor bipolar de junção.

Resolução da situação-problema

O circuito apresentado na Figura 1.25 apresenta uma possível aplicação do TBJ para acionamento de um LED. Quando a chave está na posição ON (ligado), a tensão na base do transistor será igual à fonte de alimentação (+9 V). Assim, o transistor começará a conduzir corrente do coletor para o emissor, acendendo o LED. Quando a chave está na posição OFF (desligado), a base do transistor ficará com o mesmo potencial do terra (0 V). Assim, este funcionará como uma chave aberta, e o LED apagará.

Figura 1.25 | Controle do acionamento de um LED com BJT



Fonte: adaptada de Honeywell ([s.d.], p. 19).

Faça valer a pena

1. Quando um diodo estiver diretamente polarizado, haverá um fluxo direto para corrente; nesse caso, portanto, o diodo conduz. Do contrário, teremos um fluxo reverso de corrente, isto é, uma corrente tão pequena que diremos que o diodo parou de conduzir. Uma outra forma de analisarmos esse comportamento é considerar que o diodo é uma chave fechada quando diretamente polarizado e uma chave aberta quando inversamente polarizado.

Complete as lacunas seguintes e depois escolha a alternativa que apresenta a sequência de palavras corretas.

“Diodos são dispositivos _____ que podem ser usados em diversos circuitos eletrônicos. Dentre as aplicações mais frequentes dos diodos, temos _____ que conduzem em apenas um sentido”.

- a) Semicondutores e amplificadores.
- b) Semicondutores e chaves eletrônicas.
- c) Elétricos e amplificadores.
- d) Passivos e chaves.
- e) Ativos e amplificadores.

2. Os transistores são dispositivos que possuem duas aplicações básicas: eles podem trabalhar como chaves eletrônicas e amplificadores. Na primeira situação, os transistores permitem ou não a passagem de corrente em determinados momentos da operação de um circuito eletrônico. Esse chaveamento, por não ter contatos móveis, pode ocorrer a velocidades muito altas. Na segunda aplicação, o transistor pode amplificar um sinal elétrico (o transistor bipolar de junção que possui duas junções P-N). Avalie as afirmações seguintes sobre os transistores bipolares de junção (TBJ).

I. São diretamente polarizados quando o cátodo e o ânodo estão ligados nos terminais negativo e positivo da fonte, respectivamente.

II. São construídos com duas junções P-N e podem ser de dois tipos: N-P-N e P-N-P.

III. A condução de corrente está relacionada com o campo elétrico formado quando um potencial positivo é aplicado ao terminal porta (*gate*).

É correto o que se afirma apenas em:

- a) I.
- b) I e II.
- c) III.
- d) II.
- e) I e III.

3. Os transistores são dispositivos que possuem duas aplicações básicas: eles podem trabalhar como chaves eletrônicas e amplificadores. Na primeira situação, os transistores permitem ou não a passagem de corrente em determinados momentos da operação de um circuito eletrônico. Esse chaveamento, por não ter contatos móveis, pode ocorrer a velocidades muito altas. Na segunda aplicação, o transistor pode amplificar um sinal elétrico. Em transistores de efeito de campo, a passagem de portadores de carga está condicionada à presença de um campo elétrico produzido por uma tensão.

Avalie as afirmações a seguir sobre o transistor de efeito de campo (FET).

I. Podem ser usados como amplificadores de corrente.

II. Podemos controlar a corrente de saída a partir da tensão aplicada ao terminal base.

III. A condução de corrente está relacionada com o campo elétrico formado quando um potencial é aplicado ao terminal porta (*gate*).

É correto apenas o que se afirma em:

a) I e III.

b) II.

c) III.

d) I e II.

e) II e III.

Referências

ATKINS, P. W.; JONES, L. **Princípios de química**: questionando a vida moderna e o meio ambiente. Porto Alegre: Bookman, 2009.

CALLISTER JR, W. D.; RETHWISCH, David G. **Ciência e engenharia dos materiais: uma introdução**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 2016.

HONEYWELL. **Hall effect sensing and application**. Disponível em: <<http://sensing.honeywell.com/honeywell-sensing-sensors-magnetoresistive-hall-effect-applications-005715-2-en.pdf>>. Acesso em: 24 ago. 2016.

PAULO, J. J. A. de. Condutor de alumínio ou cobre. **O setor elétrico**, fev. 2013. Disponível em: <<http://www.allcab.com.br/condutor-de-aluminio-ou-de-cobre/>>. Acesso em: 28 jul. 2016.

PORTAL O SETOR ELÉTRICO. Por que o cobre é amplamente utilizado em sistemas elétricos? Disponível em: <<http://www.osetoelettrico.com.br/web/a-revista/edicoes/315-por-que-o-cobre-e-amplamente-utilizado-em-sistemas-eletricos.html>>. Acesso em: 28 jul. 2016.

RAZAVI, B. **Fundamentos de microeletrônica**. São Paulo: GEN/LTC, 2000.

SMITH, W. F.; HASHEMI, J. **Fundamentos de engenharia e ciência dos materiais**. Porto Alegre: AMGH Editora, 2013.

Materiais dielétricos, propriedades mecânicas e térmicas

Convite ao estudo

Seja bem-vindo à Unidade 2 do curso de Medidas e Materiais Elétricos. Nesta unidade, você estudará os materiais dielétricos (isolantes), além de algumas propriedades mecânicas e térmicas dos materiais. Na Unidade 1, vimos que há três classificações básicas para materiais elétricos: condutores, semicondutores e isolantes. Os dois primeiros já foram estudados, de forma que finalizaremos as propriedades básicas de materiais elétricos na presente unidade.

Na Seção 2.1, verificaremos que os materiais dielétricos estão presentes em grande parte dos equipamentos elétricos, quando algum tipo de isolamento é desejado. O óleo isolante dentro de transformadores, o gás hexafluoreto de enxofre (SF₆) como isolante em subestações isoladas a gás e a camada dielétrica que envolve um condutor são alguns exemplos de equipamentos que utilizam dielétricos. Desta forma, vamos desenvolver os conhecimentos necessários para compreender a utilização de materiais dielétricos na indústria.

Na Seção 2.2, estudaremos o efeito piezoelétrico, os materiais que o apresentam e como podemos usá-lo em sensores. Piezoelectricidade é a eletricidade gerada a partir de uma pressão mecânica, que nos fornece uma possibilidade de interface eletromecânica extremamente importante. Diversos sistemas de medição, como acelerômetros e aparelhos de ultrassom, utilizam materiais piezoelétricos.

Na Seção 2.3, estudaremos algumas propriedades mecânicas e térmicas que devem ser de conhecimento do engenheiro electricista. Por exemplo, você já parou para

pensar se a temperatura pode influenciar a operação de transformadores, ou até mesmo linhas de transmissão? Estudamos os condutores elétricos na unidade anterior sem entrar em detalhes da mecânica envolvida. Podemos tracionar (puxar) um condutor sem danificá-lo? Estudaremos os tipos básicos de deformações que podemos encontrar em materiais metálicos e como isso deve ser levado em consideração durante a fase de projeto.

Nesta unidade, você ocupará o lugar de um engenheiro que trabalha em uma fábrica de equipamentos de alta tensão e que procura fazer melhorias nos seus transformadores. A rigidez dielétrica do óleo isolante, o nível de vibração do tanque do transformador e a temperatura máxima do óleo precisam estar adequados e dentro das normas vigentes. Você é o responsável pela equipe de engenheiros e deve, juntamente com sua equipe, verificar se há falhas no projeto dos transformadores, além de propor soluções. Os resultados deverão ser compilados em um relatório técnico.

Com os conhecimentos adquiridos nesta unidade você poderá realizar essas importantes tarefas.

Seção 2.1

Materiais dielétricos

Diálogo aberto

Nesta seção, estudaremos as principais propriedades dos materiais dielétricos, como a rigidez dielétrica, a polarização e o fator de perdas. Estas propriedades são fundamentais e indicam, por exemplo, quais são os limites operativos de um determinado dielétrico.

Conforme veremos mais adiante, a rigidez dielétrica representa a diferença de potencial máxima que um dielétrico suporta sem que ocorra ruptura do meio. Em outras palavras, se passarmos deste limite, o dielétrico passará a se comportar como condutor. Vamos tomar o ar como exemplo de material dielétrico. Para uma diferença de potencial superior a 30 kV para cada centímetro, o ar torna-se condutor elétrico.

Esta propriedade é necessária para verificar se determinado dielétrico ainda está dentro dos limites operativos determinados pelas normas técnicas. Também podemos avaliar a qualidade de um material dielétrico pela análise do fator de perdas, que está diretamente relacionado com imperfeições dos materiais dielétricos. Como exemplo de imperfeições, podemos citar a resistência de fuga em para-raios de distribuição, que gera uma corrente de fuga e, conseqüentemente, aquecimento e aceleração da taxa de envelhecimento do equipamento.

Foi solicitado a você e sua equipe verificar se há necessidade de substituição do óleo isolante por outro com melhores características. É preciso analisar se o óleo isolante usado nos transformadores da sua empresa está de acordo com o especificado pelas normas técnicas vigentes. Você deverá utilizar os conceitos apresentados aqui para verificar se há necessidade de melhorar o projeto do equipamento.'

Não pode faltar

Materiais dielétricos (ou isolantes) são aqueles que não são bons condutores de eletricidade. Conforme estudamos na unidade anterior, estes materiais possuem um grande espaçamento entre

a banda de condução e banda de valência, sendo necessária uma grande quantidade de energia para fazer um elétron atravessar este espaçamento. Além disso, há poucos elétrons livres para condução nos materiais dielétricos.

Estudamos que, quando aplicamos um campo elétrico externo em um material condutor, os elétrons livres sofrerão uma força e, portanto, começarão a se deslocar. Nos materiais dielétricos, temos um comportamento diferente, chamado polarização, visto que não há grande quantidade de elétrons livres.

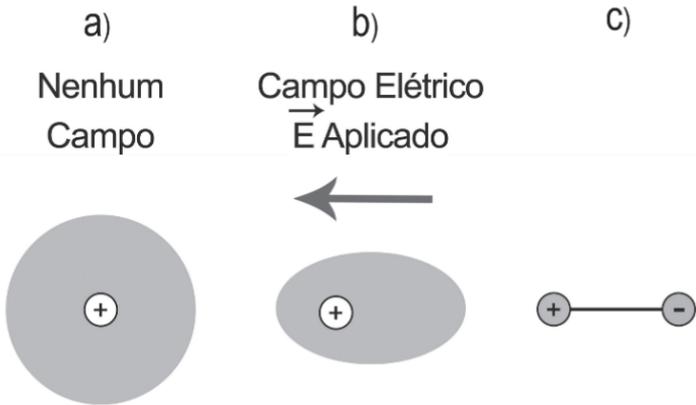


Refleta

O ar é um bom ou mau condutor de eletricidade? Será que o que estamos aprendendo aqui pode ajudar a explicar o mecanismo por trás da formação dos raios durante uma tempestade?

Vamos estudar o caso de polarização eletrônica, que ocorre em todos os materiais dielétricos. Considere uma molécula com simetria esférica de um material dielétrico (Figura 2.1a). Se aplicarmos um campo elétrico externo a este material, observaremos forças elétricas de sentido contrário no núcleo (representado por uma carga positiva) e nos elétrons (cargas negativas). Consequentemente, teremos uma deformação na molécula (Figura 2.1b). Se cessarmos o campo externo, a molécula voltará à sua forma original. Analisando a distribuição das cargas na Figura 2.1b, concluímos que as cargas positivas e negativas estão separadas por uma distância, formando um dipolo elétrico (Figura 2.1c). É importante notar que esta polarização diminui com o aumento da temperatura, uma vez que a dilatação do dielétrico acaba diminuindo o número de partículas por unidade de volume (ROLIM, 2007).

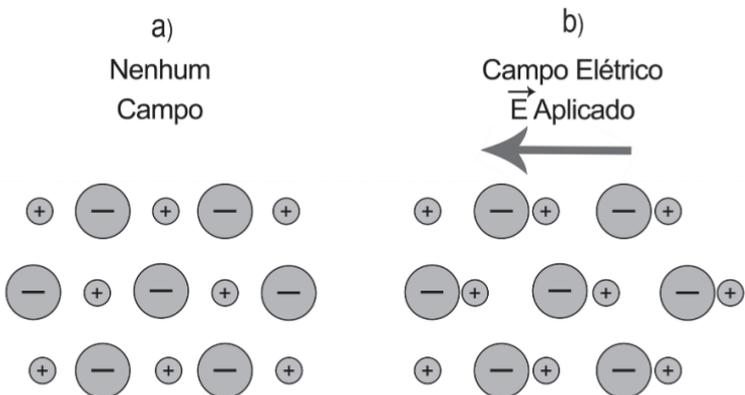
Figura 2.1 | Polarização eletrônica resultante da distorção da nuvem



Fonte: adaptada de Callister e Rethwisch (2016, p. 705).

O segundo caso de polarização é a iônica (Figura 2.2) e acontece apenas nos materiais que possuem ligações iônicas. Neste caso, o campo elétrico externo causará um deslocamento dos cátions e ânions em sentidos contrários, gerando um momento de dipolo resultante. Diferentemente da polarização eletrônica, o aumento da temperatura intensifica a polarização iônica, visto que com o aumento da distância entre os íons, por causa da dilatação térmica do material, as forças elásticas interiônicas diminuem (ROLIM, 2007).

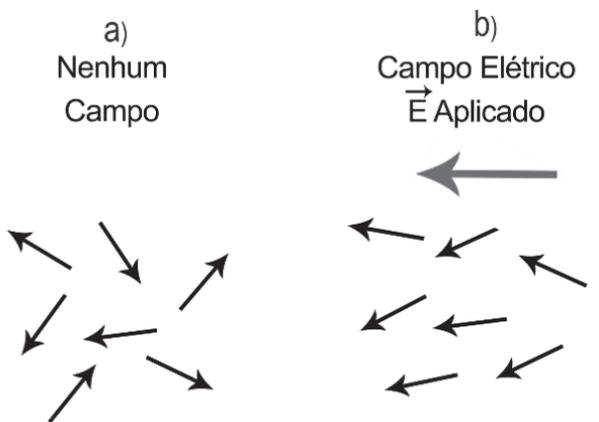
Figura 2.2 | Polarização iônica



Fonte: adaptada de Callister e Rethwisch (2016, p. 705).

O terceiro tipo é a polarização de orientação, encontrada em materiais que possuem momentos de dipolo permanentes. Inicialmente, os momentos de dipolo possuem orientação aleatória. Entretanto, quando aplicamos um campo elétrico no material, os momentos de dipolo tentarão se alinhar na direção deste campo.

Figura 2.3 | Polarização de orientação



Fonte: adaptada de Callister e Rethwisch (2016, p. 705).



Assimile

A polarização total de um material será, portanto, a soma de cada uma das polarizações apresentadas (eletrônica, iônica e de orientação).



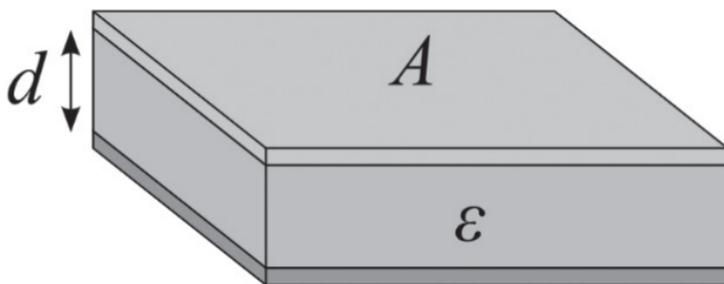
Pesquise mais

A polarização de um material dielétrico está relacionada com o campo elétrico aplicado \vec{E} . O caso apresentado aqui considerou \vec{E} sempre em um mesmo sentido, pois era gerado a partir de uma fonte de tensão contínua. O que aconteceria se a tensão aplicada e, conseqüentemente, o campo elétrico fossem alternados? A polarização é dependente da frequência? Leia o item 18.19 do livro:

CALLISTER JR, W. D.; RETHWISCH, David G. Ciência e engenharia dos materiais: uma introdução. 9 ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 2016. 912 p.

Uma das aplicações mais recorrentes de materiais dielétricos são os capacitores, um dos dispositivos básicos de circuitos elétricos. Considere duas placas condutoras paralelas (com área A) separadas por uma distância (d). Ao aplicarmos uma diferença de potencial entre as placas (usando, por exemplo, uma bateria), cada placa começará a armazenar cargas de sinais contrários na sua superfície. Essas cargas produzirão um campo elétrico interno direcionado da carga positiva para a negativa.

Figura 2.4 | Capacitor de placas paralelas



Fonte: adaptada de: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/2/20/Plate_CapacitorII.svg/1000px-Plate_CapacitorII.svg.png>. Acesso em: 8 set. 2016.

Dizemos que este material possui uma capacitância, isto é, capacidade de armazenar cargas em cada uma das placas ao aplicarmos uma diferença de potencial, calculada de acordo com:

$$C = \frac{Q}{V}.$$

Em que: Q é a carga armazenada em cada placa em coulombs (C) e V é a tensão aplicada em volts (V). A capacitância de um determinado material é medida em Farad (F). No caso apresentado (placas planas e paralelas), a capacitância é calculada de acordo com:

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{d}.$$

Em que: A é a área da placa (m^2), d é a distância entre as placas em metros (m) e ϵ_0 é uma constante chamada de permissividade elétrica do vácuo, que vale $8,852 \times 10^{-12} \frac{F}{m}$. Todo material dielétrico possui um valor próprio de permissividade elétrica, sendo que este valor é comumente apresentado como um valor múltiplo da permissividade elétrica do vácuo, tida como referência, da seguinte forma:

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0 .$$

Em que: ϵ_r é conhecida como a permissividade relativa ou constante dielétrica do material.



Exemplificando

Considere um capacitor de placas paralelas cujas áreas são 1 cm^2 e estão separadas por 2 mm de vácuo. Calcule a capacitância deste capacitor.

Solução:

A capacitância de um capacitor de placas paralelas é calculada pela equação $C = \epsilon_0 \frac{A}{d}$. Substituindo os valores dados no enunciado, temos que a capacitância é:

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{d} \rightarrow C = 8,852 \times 10^{-12} \frac{(10^{-2})^2}{2 \times 10^{-3}}$$

$$C = 0,443 \times 10^{-12} \text{ F} .$$

Portanto, a capacitância deste capacitor é $0,44310^{-12} \text{ F}$ ou $0,44 \text{ pF}$.

A densidade de fluxo elétrico \vec{D} (ou deslocamento elétrico, medido em $\frac{C}{m^2}$) indica-nos a densidade de cargas na superfície do capacitor e está relacionada com o campo elétrico interno, como podemos ver a seguir:

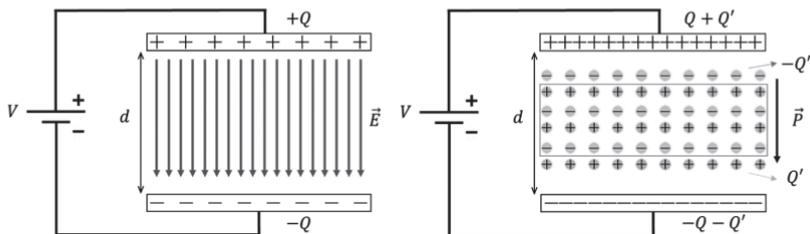
$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} .$$

Quando colocamos um material dielétrico dentro de um capacitor, precisamos considerar os efeitos da polarização do material. Diferentemente de quando temos vácuo (ou ar) no interior do capacitor, os materiais dielétricos possuem dipolos elétricos que, ao aplicarmos uma tensão nos terminais do capacitor, ficarão alinhados com o campo elétrico dentro do capacitor. Os dipolos elétricos produzem seu próprio campo elétrico, chamado de vetor polarização \vec{P} , que está na mesma direção e no mesmo sentido do campo elétrico. Portanto, estes vetores somam-se e aumentam a densidade de fluxo no capacitor de forma que:

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}.$$

Podemos concluir, portanto, que o material dielétrico aumenta a capacitância e, conseqüentemente, a quantidade de cargas armazenadas nas placas do capacitor, conforme indicado na Figura 2.5.

Figura 2.5 | Capacitor de placas paralelas e polarização



Fonte: adaptada de Callister e Rethwisch (2016, p. 702).



Exemplificando

Considere o capacitor de placas paralelas apresentado no exemplo anterior. Calcule a capacitância deste capacitor se o material dielétrico for porcelana, cuja permissividade relativa é $\epsilon_r = 6$, em vez de vácuo.

Solução: Substituindo o material dielétrico desse capacitor, a sua capacitância será calculada pela equação $C = \epsilon \frac{A}{d}$, em que $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$. Substituindo os valores dados no enunciado, temos que a capacitância é:

$$C = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{A}{d} \rightarrow C = 6 \times 8,852 \times 10^{-12} \frac{(10^{-2})^2}{2 \times 10^{-3}}$$

$$C = 2,658 \times 10^{-12} \text{ F.}$$

Portanto, a capacitância desse capacitor é $2,658 \times 10^{-12} \text{ F}$ ou $2,658 \text{ pF}$.

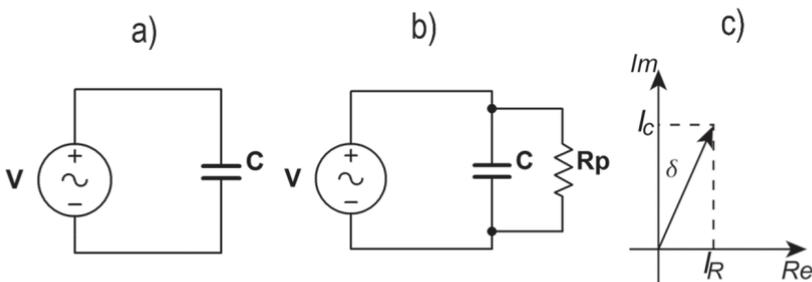


Assimile

Ao colocarmos um material dielétrico (diferente do ar/vácuo) dentro do capacitor, aumentaremos a quantidade de carga que ele consegue armazenar nas suas placas.

Além da capacitância (capacidade de armazenar cargas em cada uma das placas ao aplicarmos uma diferença de potencial), temos duas propriedades dos materiais dielétricos de destaque: o fator (ou ângulo) de perdas dielétricas e a rigidez dielétrica. As perdas dielétricas estão relacionadas com imperfeições nos materiais dielétricos. Vamos considerar um capacitor ideal (Figura 2.6a). Se analisarmos este elemento usando a teoria de circuitos elétricos, verificaremos que a corrente está adiantada 90° em relação à tensão e que não há perdas por efeito Joule (dissipação de energia na forma de calor). Entretanto, o capacitor real possui uma pequena resistência parasita responsável por dissipar parte da energia fornecida (aquecimento). Desta forma, o ângulo de defasagem não é 90° , mas sim $90^\circ - \delta$, em que δ é o ângulo de perda dielétrica (Figura 2.6c). As perdas dielétricas são calculadas pelo produto de $\varepsilon \cdot \tan(\delta)$.

Figura 2.6 | a) Capacitor ideal alimentado por uma fonte de tensão alternada. b) Capacitor real (com resistência parasita) alimentado por uma fonte de tensão. c) Fator de perdas dielétricas



Fonte: elaborada pelo autor.

Quando temos um campo elétrico muito intenso, podemos fornecer energia suficiente para remover elétrons da banda de valência para a banda de condução, tornando-os elétrons livres e criando, portanto, uma corrente elétrica. Isto pode causar danos ao material, por exemplo: queima de parte do material de maneira irreversível. A rigidez dielétrica de um material dielétrico indica qual é o campo elétrico necessário que deve ser aplicado para produzir uma ruptura em um dielétrico. Esse campo elétrico intenso pode ser criado, por exemplo, por conta de falha no projeto de um determinado equipamento, no qual não houve cuidado para limitar a intensidade desses campos. O Quadro 2.1 apresenta a rigidez dielétrica de alguns materiais. É importante ressaltar que estes valores dependem de variáveis como temperatura, pressão, umidade, impurezas no dielétrico, entre outros.

Quadro 2.1 | Rigidez dielétrica de alguns materiais

Material	Rigidez dielétrica $\left(\frac{kV}{mm}\right)$
Ar	3
Óleo de silicone	10 – 15
Óleo mineral	11,8
Polietileno	18,9

Fonte: Berger (2006).

Um dos resultados da falha (parcial) de um dielétrico é o efeito corona. Por exemplo, no caso das linhas de transmissão ou subestações de energia elétrica, que trabalham em altas tensões, é normal ouvir um barulho característico por conta do efeito corona. Ademais, em ambientes escuros, é possível ver a cintilação decorrente do efeito corona (apresentado na Figura 2.7).

Figura 2.7 | Efeito corona em isolador de subestação de energia elétrica



Fonte: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/bc/Corona_discharge_1.JPG>. Acesso em: 7 set. 2016.



Pesquise mais

As descargas atmosféricas (raios) acontecem quando o campo elétrico produzido por um grande acúmulo de cargas nas nuvens supera a rigidez dielétrica do ar (por volta de $30 \frac{kV}{cm}$). Por serem potencialmente prejudiciais a sistemas elétricos em geral, devemos projetar um Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA) quando solicitado em norma. Para ler mais sobre a formação das descargas atmosféricas e projetos de SPDA, para isso leia o Capítulo 8 do livro:

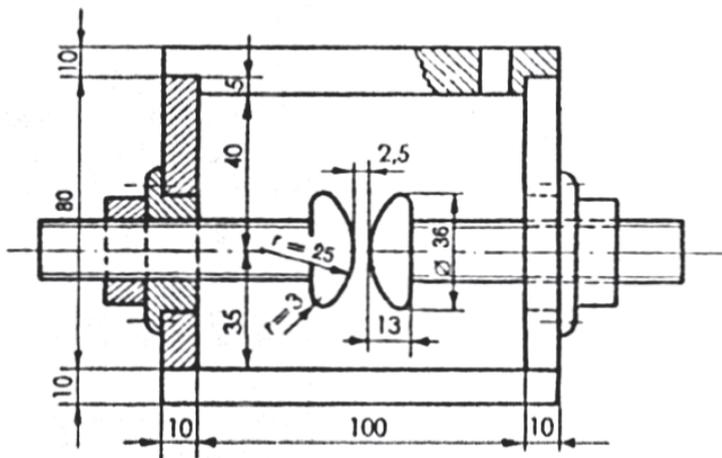
CREDER, Hélio. Instalações elétricas. 16. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016. 494 p.

Sem medo de errar

Como deve se lembrar, você tomará o lugar de um engenheiro que trabalha em uma fábrica de equipamentos de alta tensão e que procura fazer melhorias nos seus transformadores. Foi solicitado a você verificar se há necessidade de substituição do óleo isolante por outro com melhores características.

Para verificar se o óleo utilizado pelo fabricante está dentro do especificado, você deverá preparar um ensaio de rigidez dielétrica desse óleo, regido pela NBR IEC 60156. Esta norma pede que você colha uma amostra de um litro de óleo e coloque dois eletrodos (do tipo calota) dentro dele, de acordo com a Figura 2.8. A diferença de potencial entre os eletrodos será aumentada até que ocorra ruptura dielétrica do óleo.

Figura 2.8 | Ensaio de rigidez dielétrica em óleo de transformador



Fonte: adaptada de NBR IEC 60156 (2004).

De acordo com a NBR 10576:2016, os valores de referência de rigidez dielétrica para controle de óleos isolantes em equipamentos vigentes considerado para equipamentos que operam em tensões abaixo de 69 kV, é de 60 kV. Com o auxílio de um sistema de medição, você verificou que houve ruptura quando a tensão aplicada foi de 70 kV. Portanto, como foi necessário aplicar uma tensão maior que a rigidez dielétrica mínima, o óleo está adequado para uso.

Esta é uma das informações que devem constar em seu relatório técnico.

Atenção

Há vários ensaios que podem ser realizados para verificar se determinada amostra de óleo isolante está em boas condições de uso, como o fator de perdas dielétricas, a determinação do teor de água, a determinação da

cor, entre outros. Cada ensaio possui uma norma técnica correspondente que deve ser seguida.

Avançando na prática

Projetando um capacitor

Descrição da situação-problema

Você trabalha em uma empresa de desenvolvimento de materiais e seu grupo fabricou um novo dielétrico que tem uma permissividade relativa igual a 30 e rigidez dielétrica de $5 \times 10^8 \frac{V}{m}$. Vamos usar este novo material para construir um capacitor de placas paralelas de $0,2 \mu F$ e que suporte com segurança até 3 kV de tensão aplicada nos seus terminais. Qual é a distância mínima entre as placas para que isso seja possível? Qual será a área de cada placa?

Resolução da situação-problema

Como o campo elétrico produzido dentro do capacitor de placas paralelas é uniforme, podemos calcular a distância mínima para suportar até 3 kV de tensão fazendo uma simples regra de três, de forma que:

$$d_{\min} = \frac{3 \times 10^3}{5 \times 10^8} \times 1m \rightarrow d_{\min} = 6 \times 10^{-6} m = 6 \mu m .$$

Para calcularmos a área de cada placa, precisamos usar a equação da capacitância do capacitor de placas paralelas e resolvê-la para a área, como podemos ver a seguir:

$$C = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{A}{d} \rightarrow A = \frac{dC}{\epsilon_r \epsilon_0} \rightarrow A = \frac{6 \times 10^{-6} \times 0,2 \times 10^{-6}}{30 \times 8,852 \times 10^{-12}} \rightarrow A = 0,00452 m^2 .$$

Portanto, para construir este capacitor, serão necessárias duas placas paralelas de área $A = 45,2 cm^2$ separadas por $6 \mu m$ deste novo dielétrico.

Faça valer a pena

1. Capacitância é a capacidade de armazenar cargas em cada uma das placas ao aplicarmos uma diferença de potencial. Em um capacitor de placas paralelas, a capacitância é diretamente proporcional à área das placas e à permissividade elétrica e inversamente proporcional à distância entre as placas.

Considere um capacitor de placas paralelas em que as áreas são 1 mm^2 e que usa polietileno ($\epsilon_r = 2,3$) como material dielétrico. Calcule a distância entre as placas para que o capacitor tenha uma capacitância de 1 pF .

a) $d \approx 15 \mu\text{m}$.

b) $d \approx 30 \mu\text{m}$.

c) $d \approx 18 \mu\text{m}$.

d) $d \approx 23 \mu\text{m}$.

e) $d \approx 20 \mu\text{m}$.

2. Capacitância é a capacidade de armazenar cargas em cada uma das placas ao aplicarmos uma diferença de potencial. Em um capacitor de placas paralelas, a capacitância é diretamente proporcional à área das placas e à permissividade elétrica e inversamente proporcional à distância entre as placas.

Calcule a quantidade de cargas armazenadas em um capacitor de placas paralelas, cujas áreas são 5 mm^2 , quando estão separadas por 1 mm de mica ($\epsilon_r = 5,4$) e uma tensão de 15 V é aplicada em seus terminais.

a) $Q = 3,853 \times 10^{-12} \text{ C}$.

b) $Q = 3,585 \times 10^{-12} \text{ C}$.

c) $Q = 5,124 \times 10^{-12} \text{ C}$.

d) $Q = 4,754 \times 10^{-12} \text{ C}$.

e) $Q = 2,956 \times 10^{-12} \text{ C}$.

3. Quando temos um campo elétrico muito intenso, podemos fornecer energia suficiente para remover elétrons da banda de valência para a banda de condução, tornando-os elétrons livres e criando, portanto, uma corrente elétrica. Isto pode causar danos ao material, por exemplo: queima de parte do material de maneira irreversível. A rigidez dielétrica de um material indica qual é o campo elétrico necessário que deve ser aplicado para produzir uma

ruptura em um dielétrico. Esse campo elétrico intenso pode ser criado, por exemplo, por conta de falha no projeto de um determinado equipamento, no qual não houve cuidado para limitar a intensidade desses campos.

Qual dos materiais a seguir suporta um campo elétrico mais intenso?

- a) Ar, cuja rigidez dielétrica é $30 \frac{kV}{cm}$.
- b) Vidro, cuja rigidez dielétrica é $75 - 300 \frac{kV}{cm}$.
- c) Borracha, cuja rigidez dielétrica é $330 \frac{kV}{cm}$.
- d) Cera de abelha, cuja rigidez dielétrica é $1100 \frac{kV}{cm}$.
- e) Mica, cuja rigidez dielétrica é $600 - 750 \frac{kV}{cm}$.

Seção 2.2

Piezoelasticidade

Diálogo aberto

Seja bem-vindo à Seção 2.2 do curso de Medidas e Materiais Elétricos. Nesta seção, você estudará o fenômeno físico da piezoelasticidade e como ele é usado em diversos sensores e transdutores.

A piezoelasticidade é a eletricidade gerada por uma pressão mecânica em um material. Significa, por exemplo, que se pressionarmos um material piezoelétrico, poderemos medir uma tensão elétrica entre seus terminais. Este efeito, chamado de piezoelétrico direto, possui diversas aplicações práticas diretas em sensores e transdutores como acelerômetros, medidores de nível, microfones, entre outros. Diremos que o efeito piezoelétrico direto é uma conversão de um sinal mecânico em elétrico. Quando tivermos o contrário, isto é, uma deformação mecânica de um material submetido a sinais elétricos, classificaremos o efeito como piezoelétrico inverso (conversão de sinal elétrico em mecânico).

Você deve lembrar que nesta unidade ocupará o lugar de um engenheiro que trabalha em uma fábrica de equipamentos de alta tensão, que procura fazer melhorias nos seus transformadores. Você e sua equipe já verificaram se o óleo isolante possuía propriedades dielétricas adequadas e de acordo com as normas vigentes. Agora, foi solicitado que você verifique o nível de vibrações do tanque do transformador. Esta é uma medida importante, que pode ser usada para verificar a condição de operação dos enrolamentos, isto é, se estão adequados ou não. As medições e conclusões deverão ser apresentadas na forma de relatório técnico aos gestores da sua área.

Quais equipamentos são necessários para esta medição? Vamos estudar como sensores piezoelétricos podem ser usados para solucionar este problema.

Não pode faltar

O prefixo (grego) *piezo* da palavra “piezoelectricidade” significa pressão. A piezoelectricidade é, portanto, a eletricidade gerada a partir de uma pressão mecânica, isto é, uma conversão de energia mecânica em elétrica. Este fenômeno foi descoberto em 1880 pelos irmãos Jacques e Pierre Curie, quando perceberam que alguns cristais, como o quartzo, quando pressionados, apresentavam uma carga elétrica em sua superfície (TICHÝ et al., 2010). Podemos classificar o efeito piezoelétrico em:

- Direto: quando há conversão de energia mecânica em elétrica.
- Inverso: quando há conversão de energia elétrica em mecânica.

O efeito piezoelétrico é muito utilizado na engenharia, em sensores e transdutores. Alguns exemplos de aplicações são microfones, sonar, transdutores de ultrassom para imagem médica e alarmes em circuitos eletrônicos (*buzzer*). Alguns materiais piezoelétricos importantes são o titanato de bário ($BaTiO_3$), titanato de chumbo ($PbTiO_3$), zirconato de chumbo ($PbZrO_3$) e o quartzo. As cerâmicas PZT, que utilizam zirconato de chumbo e titanato de bário na sua fabricação, são bastante utilizadas em sensores.



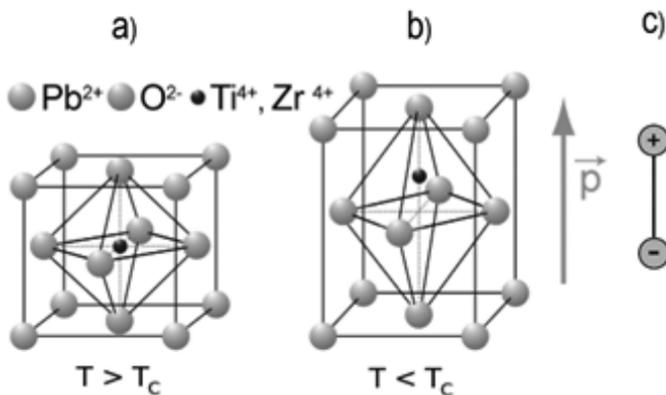
Assimile

Um sensor é um elemento que converte um tipo de energia em outro. No caso de sensores piezoelétricos, a conversão pode ser de energia mecânica para elétrica (efeito piezoelétrico direto) ou de energia elétrica para mecânica (efeito piezoelétrico inverso). Transdutores são sistemas de medição completos que utilizam sensores, amplificadores, circuitos para condicionamento de sinais etc.

Estudamos a polarização dielétrica na Seção 2.1 e vimos que esta pode ser eletrônica, iônica e de orientação. No caso da piezoelectricidade, a polarização ocorre quando pressionamos o material. Mas por que isto acontece? Vamos estudar o caso da estrutura

cristalina do $PbTiO_3$, apresentado na Figura 2.9a em perspectiva e na Figura 2.9b em vista lateral. No primeiro caso, o íon de Ti^{4+} está no centro da estrutura cúbica, tornando-a simétrica. Já no segundo caso, fica claro que esta não é uma estrutura simétrica, uma vez que o íon de Ti^{4+} não está centralizado e, portanto, as distâncias entre este íon e os demais são diferentes. Existe, portanto, uma distância entre os íons de Ti^{4+} e O^{2-} , gerando um dipolo elétrico. Materiais que possuem esta estrutura são classificados como ferroelétricos (SMITH; HASHEMI, 2013). Ademais, estes materiais possuem um momento de dipolo elétrico resultante não nulo e divididos em estruturas chamadas de domínios ferroelétricos.

Figura 2.9 | a) Estrutura cúbica do $PbTiO_3$. b) Separação entre íons de Ti^{4+} e de O^{2-} , criando um dipolo elétrico. c) Dipolo elétrico



Fonte: adaptada de <<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/9/9a/Perovskite.svg/440px-Perovskite.svg.png>>. Acesso em: 13 out. 2016.

Um dipolo elétrico, conforme estudado na seção anterior, é formado por suas cargas de mesmo módulo, mas sinais contrários, separadas por uma pequena distância (Figura 2.9c). O momento de dipolo é o produto da carga pela distância de separação ($\vec{p} = q\vec{d}$) e possui orientação de carga negativa para a positiva. Na situação apresentada na Figura 2.9a, o material possui momento de dipolo resultante nulo por causa da simetria da estrutura cúbica. Entretanto, na Figura 2.9b, o momento de dipolo resultante é diferente de zero.

As propriedades piezoelétricas dependem da temperatura, particularmente da temperatura Curie do material, pois a desta temperatura, ele perde as suas propriedades piezoelétricas, tornando-se, assim, um limite operacional do material. Na Figura 2.9a, o material está acima de sua temperatura Curie (entre $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $130\text{ }^{\circ}\text{C}$) e o íon de Ti^{4+} está no centro da estrutura cúbica, de forma que não há mais o dipolo elétrico apresentado na Figura 2.9b.

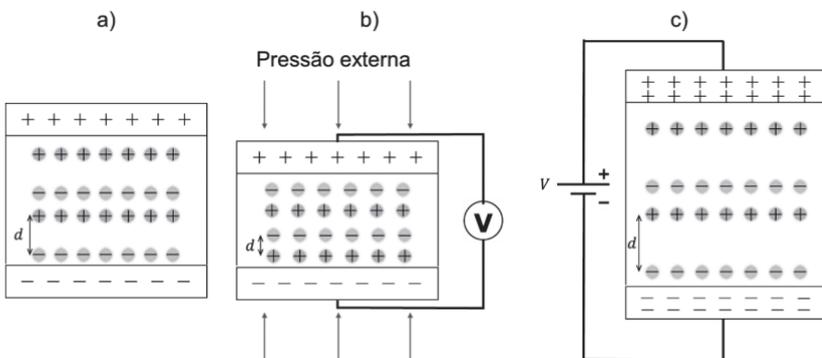
Quadro 2.2 | Temperatura Curie para alguns materiais piezoelétricos

Material	Temperatura Curie
PbTiO_3	$120\text{ }^{\circ}\text{C}$
BaTiO_3	$120\text{ }^{\circ}\text{C}$
PZT	$360\text{ }^{\circ}\text{C}$
PVDF	$150\text{ }^{\circ}\text{C}$

Fonte: elaborado pelo autor.

Considere agora o material cerâmico ferroelétrico apresentado na Figura 2.10a. Há um excesso de cargas positivas na superfície superior e de cargas negativas na superfície inferior. Os dipolos elétricos estão representados pelas cargas de sinais opostos separados por uma distância d . Quando aplicamos uma pressão externa (de compressão) a este material (Figura 2.10b), a distância entre os dipolos será reduzida. Como consequência, teremos a diminuição do momento de dipolo total do material e uma alteração na densidade de cargas nas suas superfícies, criando uma diferença de potencial. Já no caso apresentado na Figura 2.10c, se aplicarmos uma diferença de potencial neste material, causaremos novamente uma mudança na densidade de cargas nas superfícies, mas aumentaremos a distância entre os dipolos. Ou seja, a amostra será alongada (deformada). Temos, portanto, os efeitos piezoelétricos direto e inverso representados nas figuras 2.10b e 2.10c, respectivamente.

Figura 2.10 | a) Dipolos no interior de uma material piezoelétrico. b) Geração de uma diferença de potencial (medida com um voltímetro) após pressionar o material. c) Deformação do material após aplicar uma diferença de potencial nos seus terminais

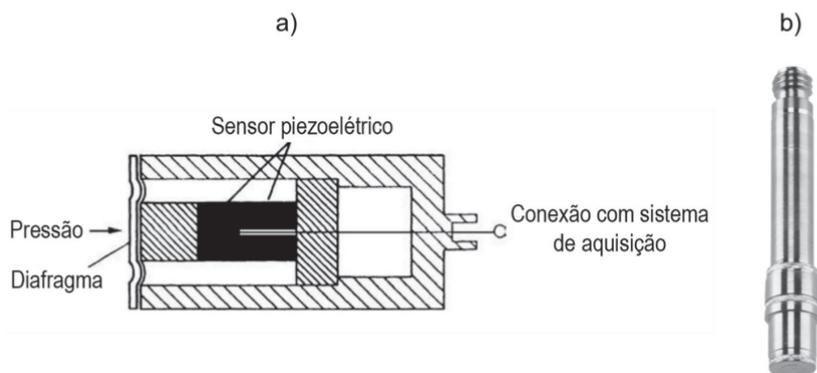


Fonte: adaptada de Smith; Hashemi (2013, p. 574).

Vamos estudar agora algumas das principais aplicações industriais de materiais piezoelétricos.

I. Medidores de pressão piezoelétricos: a partir de uma pressão aplicada ao sensor, mediremos uma diferença de potencial proporcional. A Figura 2.11a apresenta um diagrama esquemático do sensor piezoelétrico usado, a pressão a ser medida e a conexão com um sistema de aquisição de dados. Amplificadores são necessários para conseguirmos uma leitura de sinal elétrico e, depois, processá-lo. Um exemplo de sensor comercial está apresentado na Figura 2.11b.

Figura 2.11 | a) Medidor de pressão com sensor piezoelétrico. b) Medidor de pressão comercial



Fonte: adaptada de Soloman (2007, p. 296) e sensor comercial real. Disponível em: <https://www.kistler.com/fileadmin/user_upload/products/media/935-746_web.png>. Acesso em: 17 out. 2016.



Refleta

Os sinais produzidos por sensores piezoelétricos costumam ser de amplitudes pequenas (da ordem de mV). Circuitos amplificadores são usados para podermos fazer uma leitura adequada deste sinal. Podemos fazer estes circuitos amplificadores com transistores (dispositivos semicondutores estudados na unidade anterior).

II. Acelerômetros: são sensores que fornecem um sinal elétrico proporcional à aceleração do sistema. Em outras palavras, o sensor converterá a aceleração em uma diferença de potencial mensurável. O acelerômetro mede a força que uma massa exerce no sensor, que está relacionada com a Segunda Lei de Newton (matematicamente indicada pela expressão $\vec{F} = m\vec{a}$), sendo necessário um processo de calibração para indicar aceleração (THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2005). A Figura 2.12a apresenta um diagrama esquemático de um acelerômetro piezoelétrico. Aplicando-se uma força normal ao sensor piezoelétrico, as superfícies adquirem uma carga diretamente proporcional a ela. Portanto:

$$Q = kF = kAp$$

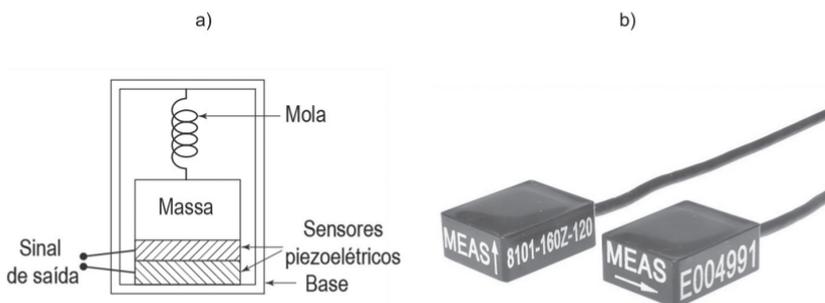
Em que: K é a constante piezoelétrica no sensor onde será aplicada uma força (F), relacionada a uma pressão (P) aplicada sobre sua área (A).

A tensão de saída V do sensor é dada por:

$$V = S_v d p.$$

Em que S_v é definida como sensibilidade à tensão $\left(\frac{V \cdot m}{N}\right)$ e d é a espessura do material piezoelétrico (m). A Figura 2.12b mostra um acelerômetro comercial.

Figura 2.12 | a) Acelerômetro piezoelétrico. b) Acelerômetro comercial



Fonte: adaptada de RAO (2009, p. 346) e sensor comercial. Disponível em: <[https://unisens.pl/upload/cache/\[Measurement_Specialties\]-Model_8101.jpg](https://unisens.pl/upload/cache/[Measurement_Specialties]-Model_8101.jpg)>. Acesso em: 17 out. 2016.



Exemplificando

Vamos calcular a tensão de saída quando aplicamos uma pressão de 10 psi a um cristal de quartzo com os seguintes dados: $d = 1$ mm e

$$S_v = 0,055 \frac{V \cdot m}{N}.$$

Solução: Precisamos converter a pressão de psi para a unidade usada no SI (1 psi = 6894,8 Pa). Para calcular a tensão em volts:

$$V = S_v d p$$

$$V = 0,055 \frac{V \cdot m}{N} \times 10^{-3} m \times \left(10 \times 6894,8 \frac{N}{m^2}\right)$$

$$V = 3,79V.$$

III. Medidores de nível por ultrassom: neste caso, um sensor emite ondas de ultrassom na direção do nível e mede o tempo que elas levam para percorrer este espaço. No caso, consideramos ida e volta, portanto duas vezes a distância desejada. O nível é calculado como apresentado a seguir:

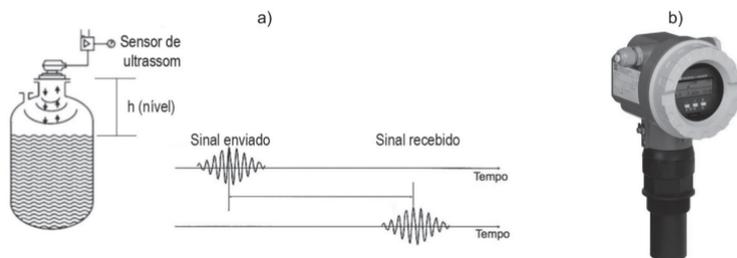
$$vt = 2h,$$

portanto:

$$h = \frac{vt}{2}.$$

Em que: h é o nível (m), t é o tempo (s) e v é a velocidade do som no meio (m/s). Um diagrama simplificado e um medidor comercial são apresentados nas Figura 2.13a e b.

Figura 2.13 | a) Aplicação de medidor de nível. b) Medidor de nível comercial



Fonte: adaptada de Franchi (2015, p. 163) e medidor comercial. Disponível em: <<http://www.bergengg.com/MediaFiles/Products/8f828aa7-37ce-48c0-ba52-dd1675fc69df.jpg>>. Acesso em: 17 out. 2016.

IV. Microfones: microfones são dispositivos que convertem o som (onda mecânica) em um sinal elétrico correspondente. Assim, temos aqui um exemplo de aplicação do efeito piezoelétrico direto (conversão de energia mecânica em elétrica). São comumente usadas algumas cerâmicas PZT e o polímero fluoreto de polivinilideno (PDVF), dada a possibilidade de serem feitos em películas finas e flexíveis.



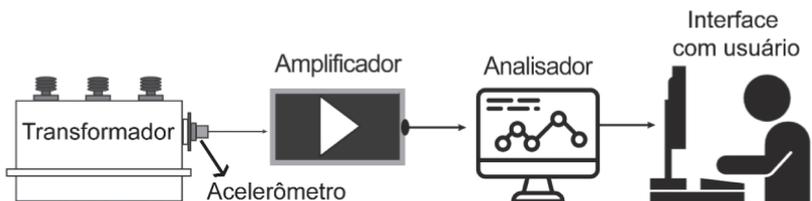
Leia mais sobre aplicações de materiais piezoelétricos no artigo disponível em: <<http://revistapesquisa.fapesp.br/2010/05/31/eletricidade-do-aperto/>>. Acesso em: 23 set. 2016.

Sem medo de errar

Na fábrica de equipamentos de alta tensão, você e sua equipe já verificaram se o óleo isolante possuía propriedades dielétricas adequadas e de acordo com as normas vigentes. Agora, você deve verificar o nível de vibrações do tanque do transformador. Mas, afinal, por que um transformador vibra? Essas vibrações são o resultado de forças entre as chapas justapostas, isto é, uma vibração no núcleo que é transmitida ao tanque (FILIPPIN et al., 2003). Se acoplarmos uma cerâmica piezoelétrica ao tanque, teremos um sinal elétrico proporcional à vibração mecânica.

Nesta seção, estudamos que os sensores piezoelétricos convertem uma deformação mecânica em um sinal elétrico correspondente. Para medir vibrações, vimos que podemos usar um acelerômetro piezoelétrico, conforme apresentado na Figura 2.14. Para realizar a interface com o usuário, será necessário um sistema de condicionamento de sinais (possivelmente um amplificador) e um sistema de aquisição e processamento de sinais (analisador).

Figura 2.14 | Medição de vibrações em transformador com acelerômetro



Fonte: adaptada de Nafar, Bahmnifirouzi e Zabbari (2011, p. 4).

Durante a realização do teste, você encontrou um nível de vibrações mecânicas um pouco superior ao considerado normal. Você aproveitou

para marcar uma reunião com a equipe de desenvolvimento, para discutir as possíveis soluções para o problema, que devem constar no relatório para os seus gestores.

! Atenção

Vibrações mecânicas no transformador podem ser indicativo de problemas com o equipamento. Leia o artigo de Filippin et al. (2003) para estudar uma solução para diminuição das vibrações. Disponível em: <<http://www.cgti.org.br/publicacoes/wp-content/uploads/2016/03/Medic%CC%A7a%CC%83o-e-Controle-de-Vibrac%CC%A7a%CC%83o-e-Rui%CC%81do-em-Transformadores-de-Subestac%CC%A7o%CC%83es.pdf>>. Acesso em: 24 set. 2016.

Avançando na prática

Medidor de pressão de baixo custo

Descrição da situação-problema

Você trabalha em uma empresa de equipamentos eletrônicos e sua equipe está desenvolvendo um medidor de pressão de baixo custo para ser usado em laboratórios didáticos. Você definiu que a pressão máxima que o sistema poderá medir é 15 psi. Vamos analisar a aplicação de materiais piezoelétricos para este medidor.

Resolução da situação-problema

Vamos utilizar um *buzzer* circular de área 4 cm^2 , espessura $d = 2 \text{ mm}$ e sensibilidade a tensão $s = 0,011 \frac{\text{V} \cdot \text{m}}{\text{N}}$.

Fazendo a conversão para as unidades do SI, temos que a pressão máxima será:

$$p_{\max} = 15 \times 6894,8 \rightarrow p_{\max} = 103422 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

Qual será a tensão de saída do sensor para esta pressão? Podemos calcular essa tensão da como a seguir:

$$V = S_v d p$$

$$V = 0,011 \frac{V \cdot m}{N} \times 2 \times 10^{-3} m \times 103422$$

$$V \approx 2,275 V$$

Portanto, quando a pressão aplicada no material for $103422 \frac{N}{m^2}$, a tensão de saída será 2,275 V.

Note que para este medidor ser funcional, devemos ter uma escala calibrada entre pressão e tensão. Uma possibilidade é usar um microprocessador para fazer esta conversão e mostrar a pressão aplicada em um display.

Faça valer a pena

1. A piezoelectricidade é a eletricidade gerada a partir de uma _____, isto é, uma conversão de _____ em energia elétrica. Podemos classificar o efeito piezoelétrico em direto e inverso, sendo que as aplicações de cada um serão distintas.

Marque a alternativa que preenche corretamente as lacunas da afirmativa apresentada anteriormente:

- a) Pressão mecânica; energia química.
- b) Pressão mecânica; energia mecânica.
- c) Reação química; energia térmica.
- d) Reação química; energia térmica.
- e) Reação química; energia mecânica.

2. Materiais piezoelétricos são usados em diversos sensores comerciais, como acelerômetros e medidores de nível por ultrassom. Analise os materiais listados a seguir:

- I. Titanato de bário ($BaTiO_3$).
- II. Titanato de chumbo ($PbTiO_3$).
- III. Zirconato de chumbo ($PbZrO_3$).

IV. Germânio.

V. Silício.

Assinale a alternativa que apresenta as opções corretas de materiais piezoelétricos.

a) I, IV e V.

b) I e IV.

c) II e V.

d) I, II e III.

e) I e III.

3. A piezoelectricidade é muito utilizada na produção de sensores comerciais e no interior de diversas aplicações tecnológicas. Podemos classificar o efeito piezoelétrico em direto, quando há conversão de energia mecânica em elétrica, e inverso, quando há conversão de energia elétrica em mecânica. Calcule a tensão de saída de um cristal de quartzo $d = 1 \text{ mm}$ e $S_v = 0,055 \frac{\text{V} \cdot \text{m}}{\text{N}}$, quando uma pressão de 20 psi é aplicada na sua superfície.

a) $V = 5,73 \text{ V}$.

b) $V = 3,41 \text{ V}$.

c) $V = 7,80 \text{ V}$.

d) $V = 6,28 \text{ V}$.

e) $V = 7,80 \text{ V}$.

Seção 2.3

Propriedades mecânicas e térmicas

Diálogo aberto

Seja bem-vindo à última seção da presente unidade do curso de Medidas e Materiais Elétricos. Nesta seção, vamos estudar as propriedades mecânicas e térmicas dos materiais.

Propriedades mecânicas são extremamente importantes para saber, por exemplo, quais são os limites operacionais de determinado material. Por exemplo, qual é a massa máxima que uma corda de aço pode levantar? Em outras palavras, qual é a tensão (força) máxima que podemos aplicar sem rompê-la? O que acontece quando tracionamos um material? Ele voltará às suas características iniciais ou as mudaremos?

As propriedades térmicas dos materiais devem ser estudadas pelos engenheiros e tecnólogos, pois também influenciam o comportamento de diversos materiais e equipamentos. Por exemplo, uma elevação na temperatura pode fazer que um condutor alongue-se, aumentando seu comprimento efetivo. Vimos que isto também pode causar mudanças na resistência de condutores, mas passamos agora para uma visão maior, não restrita apenas para as propriedades elétricas. Por fim, ambas as classes de propriedades são fundamentais para o desenvolvimento de equipamentos e análise de falhas.

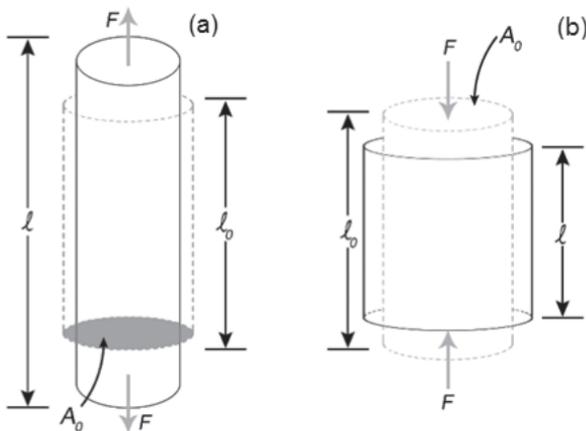
Nesta unidade, colocamo-nos no lugar de um engenheiro que trabalha em uma fábrica de equipamentos de alta tensão. Você e sua equipe já verificaram a rigidez dielétrica do óleo isolante e o nível de vibrações do tanque do transformador. Vamos finalizar o serviço solicitado verificando se o transformador que testamos até o momento opera abaixo da temperatura limite definida em norma. Depois, você terá todos os dados necessários para elaborar seu relatório técnico de avaliação do transformador.

Para isso, você precisará dos conceitos apresentados nesta seção. Bons estudos!

Não pode faltar

Vamos começar essa seção estudando os principais tipos de solicitações mecânicas. Considere o corpo de prova apresentado na Figura 2.15. Se aplicarmos uma carga de tração, isto é, uma força de tração no sentido apresentado, causaremos uma deformação nele. Esta deformação será linear e positiva, uma vez que aumenta o comprimento do corpo de prova (Figura 2.15a). Se invertermos o sentido de aplicação da carga, teremos uma carga de compressão e, de maneira análoga, uma deformação linear negativa, uma vez que o comprimento do corpo de prova diminuiu (Figura 2.15b).

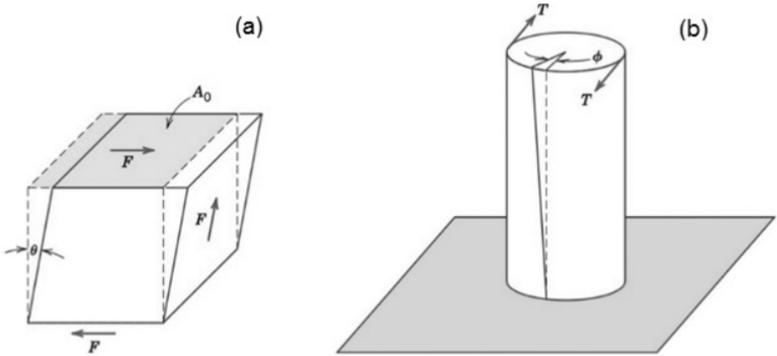
Figura 2.15 | Cargas de tração (a) e compressão (b)



Fonte: adaptada de Callister e Rethwisch (2016, p. 157).

Na Figura 2.16 temos outros dois tipos de carga: cisalhamento e torção. A carga de cisalhamento é quando temos cargas aplicadas em direções opostas, conforme Figura 2.16a. Por fim, a carga de torção (Figura 2.16b) é quando temos um torque (equivalente angular da força) em um corpo de prova.

Figura 2.16 | Cargas de cisalhamento (a) e torção (b)

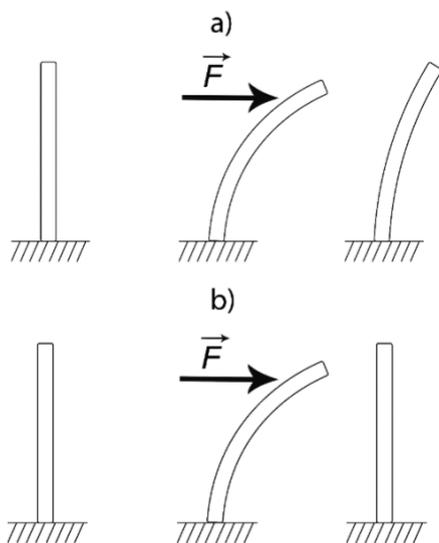


Fonte: adaptada de Callister e Rethwisch (2016, p. 157).

Assim, as maneiras básicas de aplicação de carga mecânica são: tração, compressão, cisalhamento e torção. Quando aplicamos cargas mecânicas em materiais, criaremos uma deformação (da mesma forma que a apresentada na Figura 2.17). Temos aqui dois tipos importantes de deformações a serem estudadas: elástica e plástica.

Por exemplo, quando aplicamos uma carga de tração em um corpo de prova, teremos a deformação deste. Se após retirarmos a carga de tração o corpo não voltar a ter as mesmas dimensões iniciais, diremos que a deformação foi plástica. Caso o corpo volte às dimensões iniciais, classificaremos a deformação como elástica.

Figura 2.17 | Deformação plástica (a) e elástica (b)



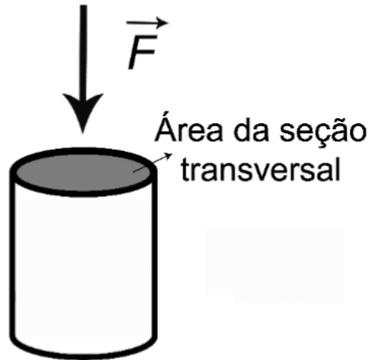
Fonte: elaborada pelo autor.

As deformações mecânicas podem ser estudadas a partir da análise do comportamento tensão-deformação do material. Para isso, precisamos definir estas duas grandezas. A tensão de engenharia é definida como a relação entre a carga instantânea aplicada perpendicularmente à seção transversal do corpo de provas pela área da mesma seção transversal (Figura 2.18), isto é:

$$\sigma = \frac{F}{A_0},$$

Em que: F é medida em Newtons (N) ou libras-força (lb_f) e A_0 é medida em metros quadrados (m^2) ou polegadas quadradas (in^2). As unidades da tensão de engenharia são, portanto, $\frac{\text{N}}{\text{m}^2}$ (ou pascal - Pa) ou $\frac{\text{lb}_f}{\text{in}^2}$ (ou psi).

Figura 2.18 | Tensão de engenharia



Fonte: elaborada pelo autor.



Assimile

A tensão de engenharia é a pressão em um material quando aplicamos uma carga. As unidades podem ser do SI $\left(\frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right)$ ou das unidades inglesas $\left(\frac{\text{lb}_f}{\text{in}^2}\right)$. Trabalharemos neste material apenas com as unidades do SI, sendo necessário realizar uma conversão. Aqui utilizaremos $1 \text{ psi} = 6894,8 \text{ Pa}$.

A deformação de engenharia é definida pela relação entre a variação de dimensão do material após aplicação de uma carga e de sua dimensão inicial, como a seguir:

$$\varepsilon = \frac{l_i - l_o}{l_o}$$

Em que: l_o é o comprimento inicial do corpo de prova e l_i é o comprimento após aplicar uma carga mecânica. Analisando esta equação, notamos que a deformação de engenharia é adimensional (não possui unidades) e representa, portanto, uma variação percentual da dimensão do corpo de prova.



Um pilar cilíndrico de diâmetro 20 cm suporta uma massa de 1000 kg. Calcule a tensão de engenharia neste pilar. Considere $g = 9,81 \frac{m}{s^2}$.

Solução: A massa aplica uma carga de 1000 kg no pilar. Para calcular a força sobre o pilar, devemos usar a Segunda Lei de Newton, como podemos ver a seguir:

$$F = mg \rightarrow F = 1000 \times 9,81 \rightarrow F = 9810 N.$$

A tensão de engenharia é a razão entre a força aplicada e a área da seção transversal do pilar, isto é, a área de uma circunferência:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \rightarrow \sigma = \frac{F}{\pi r^2} = \frac{F}{\pi \left(\frac{d}{2}\right)^2}.$$

Substituindo os valores na equação apresentada anteriormente:

$$\sigma = \frac{F}{\pi \left(\frac{d}{2}\right)^2} = \frac{9810}{\pi \left(0,2/\frac{2}\right)^2} = 31,24 \times 10^4 \frac{N}{m^2}$$

Finalmente, temos que a tensão de engenharia é $\sigma = 31,24 \times 10^4 \frac{N}{m^2}$ ou $\sigma = 312,4 KPa$.

A deformação elástica longitudinal de um material inclui também uma variação das dimensões transversais (SMITH; HASHEMI, 2013). A relação entre as deformações lateral e longitudinal é chamada de coeficiente de Poisson e é descrita matematicamente como:

$$\nu = -\frac{\epsilon_{lateral}}{\epsilon_{longitudinal}} = -\frac{\epsilon_x}{\epsilon_z} = -\frac{\epsilon_y}{\epsilon_z}.$$

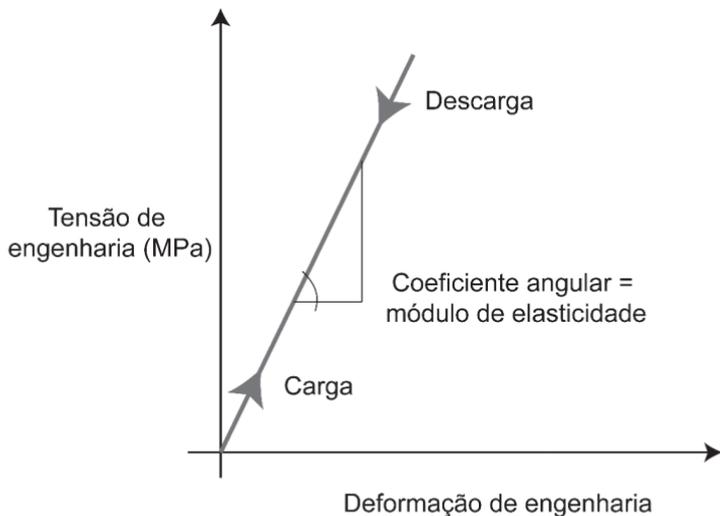
Em que: cada ϵ representa uma deformação no sentido do eixo descrito no seu subscrito.

O comportamento tensão-deformação para materiais metálicos submetidos a baixas trações é linear e pode ser representado pela seguinte equação, conhecida como Lei de Hooke (CALLISTER; RETHWISCH, 2016):

$$\sigma = E\varepsilon .$$

Em que: E é o módulo de Young, medido em GPa ou em psi. Quando a tensão e a deformação de engenharia são proporcionais, a deformação é dita elástica. A Figura 2.19 apresenta os sentidos de crescimento da relação tensão-deformação para carga e descarga, isto é, quando aplicamos tensão e quando a removemos.

Figura 2.19 | Deformação elástica



Fonte: adaptada de Callister e Rethwisch (2016, p. 160).



Pesquise mais

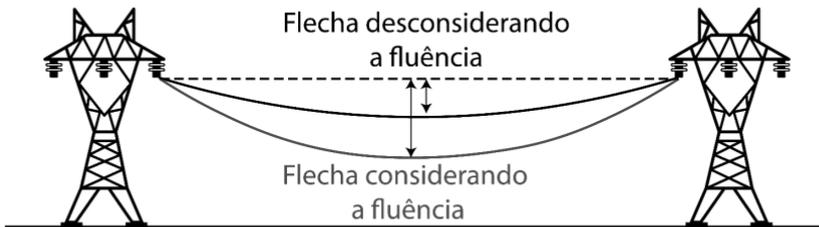
Alguns materiais possuem característica tensão-deformação não linear. Neste caso, não conseguimos definir o módulo de elasticidade e precisamos recorrer ao módulo tangente ou secante. Acesse a biblioteca virtual com seu login e senha e leia mais sobre o comportamento tensão-

deformação dos metais, no item 6.3 do livro:

CALLISTER JR, W. D.; RETHWISCH, David G. Ciência e engenharia dos materiais: uma introdução. 9 ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 2016. 912 p.

A deformação elástica acontece para pequenas deformações, da ordem de 0,005 (CALLISTER; RETHWISCH, 2016). Quando a deformação supera este valor, ao pararmos de aplicar tensão, o material não voltará mais às características iniciais de comprimento, sofrendo uma deformação plástica. Um exemplo prático deste fenômeno é a fluência em linhas de transmissão, que é o alongamento permanente da linha, de modo a aumentar seu comprimento efetivo. Mas qual seria o problema disso? Um aumento no comprimento efetivo do cabo pode aumentar a flecha (diferença entre o ponto mais elevado da linha, onde ela está presa à estrutura, e o seu vértice, ou o ponto mais inferior) e, conseqüentemente, diminuir a altura de segurança exigida pelas normas técnicas (Figura 2.20).

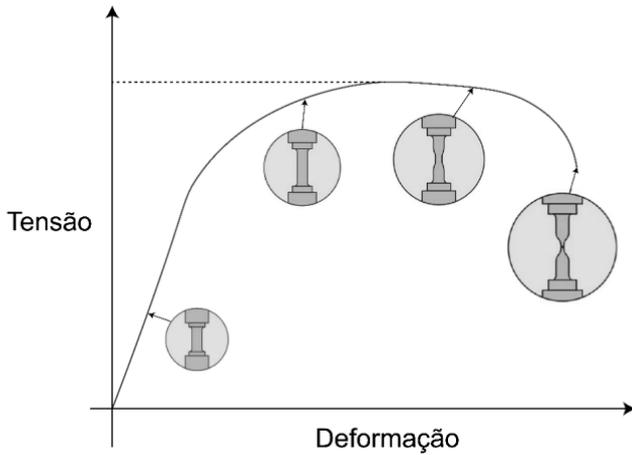
Figura 2.20 | Aumento da flecha de uma linha de transmissão



Fonte: adaptada de: <http://www.flaticon.com/free-icon/power-line-with-three-insulators_34511>. Acesso em: 19 set. 2016.

Outra característica importante do comportamento tensão-deformação é o limite de resistência à tração, que representa a tensão máxima que um determinado material suporta. Se esta tensão for aplicada e mantida por tempo suficiente, ocorrerá fratura no material, conforme apresentado na Figura 2.21.

Figura 2.21 | Comportamento tensão-deformação até a fratura do material



Fonte: adaptada de Callister e Rethwisch (2016, p. 166).

Propriedades térmicas

Quando aquecemos um material há transferência de energia para as moléculas da sua composição, o que acaba aumentando o seu grau de agitação. Assim, podemos dizer que a temperatura é reflexo do grau de agitação das moléculas de determinado material. A capacidade de um material de absorver calor de sua vizinhança é conhecida como capacidade calorífica e é calculada da seguinte maneira:

$$C = \frac{dQ}{dT}$$

Em que: dQ é a energia necessária para produzir uma variação de temperatura (dT), cujas unidades podem ser, por exemplo, $\frac{J}{mol \cdot K}$ ou $\frac{cal}{mol \cdot K}$ (CALLISTER; RETHWISCH, 2016).



Refleta

A temperatura também é um parâmetro importante para estudar a deformação dos materiais metálicos? Voltando ao caso da linha de transmissão, a flecha poderia aumentar com a temperatura?

Quando aumentamos a temperatura de materiais sólidos, verificamos que ocorre uma expansão nas suas dimensões. Caso contrário, isto é, se abaixarmos a temperatura, o material pode se contrair. Para o caso do comprimento, a sua variação com a temperatura pode ser equacionada da seguinte maneira:

$$\frac{l_f - l_0}{l_0} = \alpha(T_f - T_0).$$

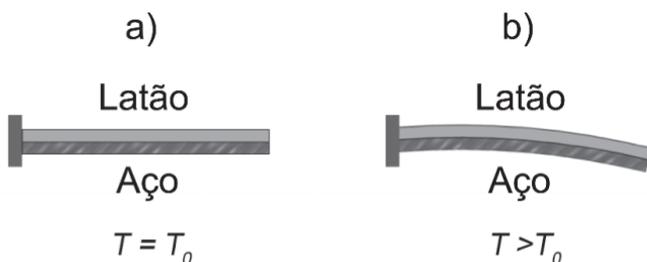
Em que: l_0 e l_f são os comprimentos, inicial e final, respectivamente; T_0 e T_f são as temperaturas inicial e final; e, por fim, α é o coeficiente linear de expansão térmica, cuja unidade é o inverso da temperatura ($^{\circ}\text{C}^{-1}$).



Pesquise mais

Materiais com diferentes coeficientes lineares de expansão térmica são usados em relés de sobrecarga térmico, como dispositivo de proteção em circuitos de acionamentos de motores elétricos (Figura 2.22a). Por terem coeficientes diferentes, a expansão de ambos também será diferente (Figura 2.22b).

Figura 2.22 | Tira bimetálica de latão e aço em temperatura inicial (a); e em temperatura final (b), em que é possível verificar um crescimento maior da tira de latão



Fonte: adaptada de Halliday, Resnick e Walker (2012, p. 190).

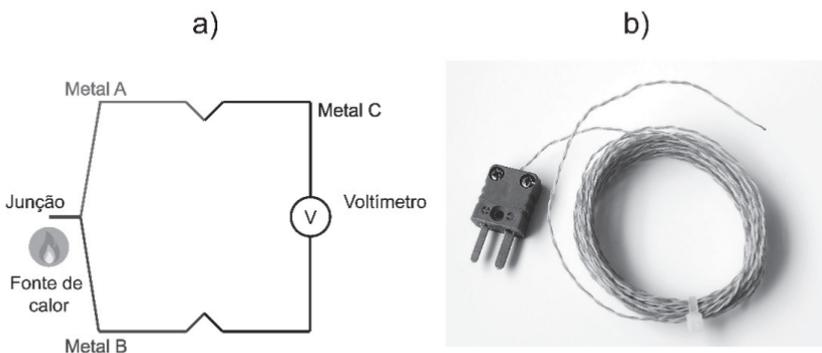
Acesse no link disponível a seguir o catálogo de relés térmicos da Weg. Disponível em: <<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-reles-de-sobrecarga-termico-linha-rw-50042397-catalogo-portugues-br.pdf>>. Acesso em: 1 out. 2016.

O que acontece com um material cuja expansão está restrita por agentes externos? Considere uma barra metálica dentro de uma estrutura. Considerando apenas a expansão linear, teremos uma força (de tração ou de compressão) entre a barra e a estrutura chamada de tensão térmica. Esta tensão deve ser levada em consideração em projetos de engenharia, pois pode levar alguns materiais à fratura.

Efeito termoelétrico e sensores

Quando aquecemos apenas uma extremidade de um condutor metálico, os elétrons desta região ganham energia cinética e tendem a ocupar a outra extremidade do condutor, gerando uma diferença de potencial. Este efeito é conhecido como Efeito *Seebeck* e é o princípio físico de funcionamento dos termopares, que são sensores de temperatura cuja saída é uma tensão elétrica proporcional à temperatura do meio, formado por uma junção de metais distintos unidos em uma extremidade (Figura 2.23).

Figura 2.23 | a) Junção de condutores metálicos; b) Termopar do tipo K



Fonte: adaptada de: <<http://en.academic.ru/dic.nsf/enwiki/19021>>; <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/4/49/Thermocouple_K_%282%29.jpg/1280px-Thermocouple_K_%282%29.jpg>. Acesso em: 1 out. 2016.

Sem medo de errar

Lembre-se de que você é um profissional que trabalha em uma fábrica de equipamentos de alta tensão. Você e sua equipe já verificaram a rigidez dielétricas do óleo isolante e o nível de vibrações do tanque do transformador. Para completarmos a tarefa solicitada, você deve atestar se o transformador opera abaixo da temperatura limite definida em norma.

A norma ABNT NBR 5416 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997) estabelece os limites apresentados para temperatura do óleo e ponto mais quente do transformador. É importante notarmos que há três tipos de carregamento de transformadores: normal, emergencial de longa duração e emergencial de curta duração. Nos dois últimos casos, o transformador alimentará uma carga superior à sua capacidade nominal, o que resultará em maior aquecimento. As temperaturas apresentadas no Quadro 2.3 servem, portanto, para verificarmos quais são as temperaturas-limite que o equipamento pode operar sem falhar. Entretanto, é importante destacar que as situações emergenciais ajudam a acelerar a taxa de envelhecimento do transformador e devem ser evitadas sempre que possível.

Quadro 2.3 | Temperaturas-limite para transformadores de potência

Tipo de Carregamento	Classe			
	55 °C		65 °C	
	Temperatura (°C)			
	Óleo	Ponto mais quente	Óleo	Ponto mais quente
Normal	95 °C	105 °C	105 °C	120 °C
Emergencial de longa duração	105 °C	120 °C	110 °C	130 °C
Emergencial de curta duração	105 °C	130 °C	110 °C	140 °C

Fonte: adaptado de ABNT NBR 5416 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997).

Com o auxílio de um termopar, você consegue verificar que as temperaturas máximas do óleo e do ponto mais quente do transformador foram 80 °C e 100 °C, respectivamente, enquanto ele alimentava uma carga de 95% da sua capacidade nominal. Portanto, como estes valores estão abaixo do especificado em norma, concluímos que não há problema de aquecimento do transformador em carregamento normal.

Agora, você tem todas as informações necessárias para concluir o relatório técnico a ser apresentado aos gestores da fábrica.

Temperatura de uma placa de circuito eletrônico

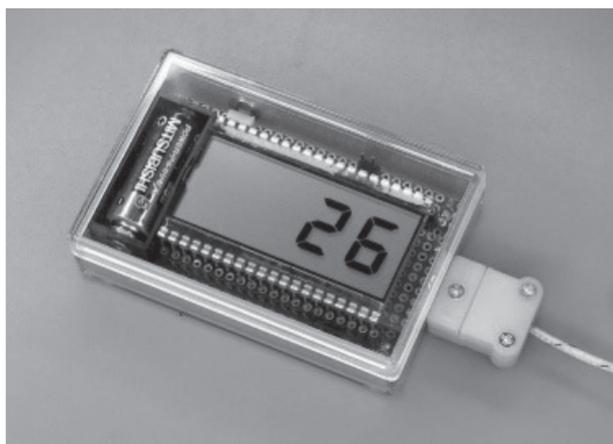
Descrição da situação-problema

Você participou do desenvolvimento de um novo inversor de frequência, particularmente no desenvolvimento das placas de circuito eletrônico. Por usar dispositivos eletrônicos de potência, a temperatura de placa deve ser observada para evitar danos aos dispositivos. Como você poderia medi-la?

Resolução da situação-problema

Uma solução em potencial seria medir a temperatura com um termopar usando um conector especial para ligá-lo à placa. Algumas soluções comerciais incluem um circuito de condicionamento de sinais e display para indicar a temperatura. Você verificou, com o auxílio do termopar, que a temperatura máxima da placa foi 40 °C, valor considerado normal para a grande maioria das aplicações. Portanto, não há problemas de aquecimento na placa do circuito que você colaborou para desenvolver.

Figura 2.24 | Termopar com display de LCD



Fonte: adaptada de: <<http://elm-chan.org/works/tctm/tm1.jpeg>>. Acesso em: 1 out. 2016

Faça valer a pena

1. As maneiras básicas de aplicação de carga mecânica são: tração, compressão, cisalhamento e torção. Por exemplo, quando aplicamos uma carga de tração em um corpo de prova teremos a deformação deste. Se após retirarmos a carga de tração, o corpo voltar a ter as mesmas dimensões iniciais, diremos que a deformação foi elástica. Caso o corpo não volte às dimensões iniciais, classificaremos a deformação como plástica.

Um prisma quadrangular de lado 3 cm e 10 metros de altura suporta uma massa de 4200 kg. Calcule a tensão de engenharia em MPa nesta estrutura.

Considere $g = 9,81 \frac{m}{s^2}$.

- a) $\sigma = 4,12 MPa$.
- b) $\sigma = 4,36 MPa$.
- c) $\sigma = 4,93 MPa$.
- d) $\sigma = 4,58 MPa$.
- e) $\sigma = 4,71 MPa$.

2. Quando aplicamos uma carga sobre um corpo de prova, ele deverá sofrer uma deformação, que pode ser elástica ou plástica. A deformação de engenharia é definida pela relação entre a variação de dimensão do material após aplicação de uma carga e a sua dimensão inicial.

Uma barra de cobre de 10 m de comprimento foi tracionada de modo que seu comprimento real passou a ser 10,003 m. Calcule a deformação percentual sofrida pela barra.

- a) $\varepsilon_{\%} = 0,05\%$.
- b) $\varepsilon_{\%} = 0,01\%$.
- c) $\varepsilon_{\%} = 0,06\%$.
- d) $\varepsilon_{\%} = 0,03\%$.
- e) $\varepsilon_{\%} = 0,07\%$.

3. A temperatura é o reflexo do grau de agitação das moléculas de determinado material. Quando a aumentamos em materiais sólidos, verificamos que ocorre uma expansão nas suas dimensões. Caso contrário, isto é, se abaixarmos a temperatura, o material pode contrair-se.

Um fio de cobre de 4 m de comprimento inicialmente a 23°C é aquecido até 75°C . Calcule o comprimento final desse fio. Considere que o coeficiente linear de expansão térmica do cobre é $17 \times 10^{-6} \text{C}^{-1}$.

a) $l_f \approx 4,004\text{ m}$.

b) $l_f \approx 4,001\text{ m}$.

c) $l_f \approx 4,036\text{ m}$.

d) $l_f \approx 3,961\text{ m}$.

e) $l_f \approx 4,010\text{ m}$.

Referências

- ABNT NBR IEC 60156. **Líquidos isolantes**: determinação da rigidez dielétrica à frequência industrial - Método de ensaio, 2004.
- ABNT NBR IEC 10576. **Guia para acompanhamento do óleo mineral isolante de equipamentos elétricos**, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Aplicação de cargas em transformadores de potência**: procedimento. Rio de Janeiro, 1997.
- BERGER, L. I. Dielectric strength of insulating materials. **Carbon**, v. 1, p. 2, 2006.
- CALLISTER JR., W. D.; RETHWISCH, David G. **Ciência e engenharia de materiais**: uma introdução. Rio de Janeiro: LTC, 2016.
- CAVALCANTI, Paulo João Mendes. **Fundamentos de eletrotécnica**. 22. ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos Editora, 2015.
- CREDER, Hélio. **Instalações elétricas**. 16. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.
- FILIPPIN, C. G. et al. Medição e controle de vibrações e ruído em transformadores de subestações. **II Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica**, p. 1106-1112, 2003.
- FRANCHI, C. M. **Instrumentação de processos industriais**: princípios e aplicações. São Paulo: Érica, 2015.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de física**: gravitação, ondas e termodinâmica. 9. ed. v. 2. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- NAFAR, M.; BAHMANIFIROUZI, B.; JABBARI, M. Transformer monitoring by using vibration analysis. **Aust. J. Basic Appl. Sci.**, v. 5, p. 984-990, 2011.
- RAO, S. S. **Vibrações mecânicas**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.
- RILEY, W. F.; STURGES, L.; MORRIS, D. **Mecânica dos materiais**. 5 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003. 616 p.
- ROLIM, Jacqueline Gisele. **Materiais elétricos**. Notas de Aula. 2007.
- SILVEIRA, E. da. Eletricidade do aperto. **Pesquisa FAPESP**, n. 171, p. 72, 2010. Disponível em: <<http://revistapesquisa.fapesp.br/2010/05/31/eletricidade-do-aperto/>>. Acesso em: 23 set. 2016.
- SOLOMAN, S. **Sensores e sistemas de controle na indústria**. Rio de Janeiro: LTC, 2007.
- THOMAZINI, D.; ALBUQUERQUE, P. U. B. de. **Sensores industriais**: fundamentos e aplicações. Érica, São Paulo, v. 3, p. 32, 2005.
- TICHÝ, J. et al. **Fundamentals of piezoelectric sensorics**. Berlin: Springer, 2010.

TIPLER, Paul Allen; MOSCA, Gene. **Física para cientistas e engenheiros**: eletricidade e magnetismo, óptica. v. 2. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

SMITH, William F.; HASHEMI, Javad. **Fundamentos de engenharia e ciência dos materiais**. Porto Alegre: AMGH Editora, 2013.

WEG. **Relés de sobrecarga térmico linha RW**. Disponível em: <<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-reles-de-sobrecarga-termico-linha-rw-50042397-catalogo-portugues-br.pdf>>. Acesso em: 1 out. 2016.

Materiais magnéticos

Convite ao estudo

Seja bem-vindo à Unidade 3 do curso de Medidas e Materiais Elétricos. Até agora você já estudou os materiais condutores, semicondutores, isolantes, piezoelétricos e algumas propriedades mecânicas e térmicas deles. Nesta unidade, estudaremos e conheceremos os materiais magnéticos, fundamentais para diversas máquinas elétricas e equipamentos de medidas. Alguns exemplos de máquinas que utilizam materiais magnéticos são: transformadores, motores e geradores elétricos, instrumentos eletromecânicos de medidas, entre outros. O estudo desses materiais torna-se importante porque esses equipamentos estão presentes em larga escala em indústrias.

Começaremos a estudar, na Seção 3.1, as formas de produzir campos magnéticos e o funcionamento básico deles. Na Seção 3.2, estudaremos os domínios magnéticos, a histerese e os materiais magnéticos duros e moles. O entendimento da histerese é particularmente útil para analisar, por exemplo, as perdas magnéticas de máquinas elétricas. Na Seção 3.3, revisaremos a Lei de Faraday para estudarmos o princípio de funcionamento dos transformadores, bem como os principais materiais utilizados e suas aplicações.

Nesta unidade, você ocupará o lugar de um profissional que trabalha em uma empresa que fornece insumos para a produção de equipamentos de alta tensão, principalmente transformadores. Um cliente quer projetar um novo transformador para acrescentar um produto em seu portfólio. Nesse contexto, solicitou-se que você verificasse quais materiais podem ser usados para construir o núcleo do transformador. Uma vez que faz parte da equipe de engenheiros, você deve verificar o tipo de material mais

adequado para esse projeto, com base em suas características magnéticas, assim como possíveis técnicas de construção que permitam aumentar a eficiência do equipamento. As possíveis soluções deverão ser compiladas em um relatório técnico, explicando detalhadamente o princípio do funcionamento dos transformadores.

Seção 3.1

Fundamentos de materiais magnéticos

Diálogo aberto

Nesta seção, estudaremos as formas de produção de um campo magnético e o modo como este se manifesta em materiais de interesse em engenharia, tais como ligas de aço elétrico. O conhecimento de algumas propriedades, por exemplo, a permeabilidade magnética, é útil para avaliarmos o comportamento de determinado material sob ação de um campo magnético. No caso das máquinas elétricas, os materiais magnéticos funcionam como um caminho para a passagem do campo magnético. Dessa forma, materiais de alta permeabilidade são aqueles que oferecem uma menor resistência à passagem desse campo, que será usado posteriormente em uma conversão eletromecânica de energia.

Imagine que você trabalha em uma empresa que fornece consultoria para projetos de engenharia. Uma vez que um cliente quer projetar um novo transformador, foi solicitado a você que verificasse quais materiais podem ser usados para construir o núcleo de um transformador e de que maneira ele deve ser construído. Com apoio de uma equipe de engenheiros, você deve começar verificando o tipo de material mais adequado para esse projeto. O núcleo de um transformador tem a função de transportar de maneira eficiente o fluxo magnético. Qual característica esse material deve possuir para cumprir essa tarefa? Quais materiais podem ser utilizados? As possíveis soluções farão parte do relatório técnico que deve ser produzido.

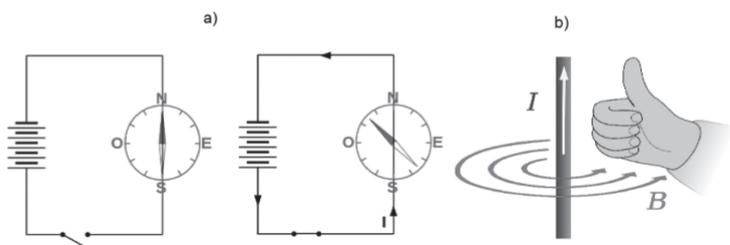
Para escolher o material, você precisa estudar a permeabilidade magnética.

Não pode faltar

Vamos iniciar nossos estudos dos materiais magnéticos com a forma de geração de campos magnéticos. A primeira forma ocorre a partir de uma corrente elétrica, fato verificado pelo físico dinamarquês

Hanz Oersted, que observou que o compasso de uma bússola se movimentava quando um circuito próximo a este conduzia uma corrente (Figura 3.1a). A direção da corrente em relação ao campo magnético é dada pela regra da mão direita (Figura 3.1b).

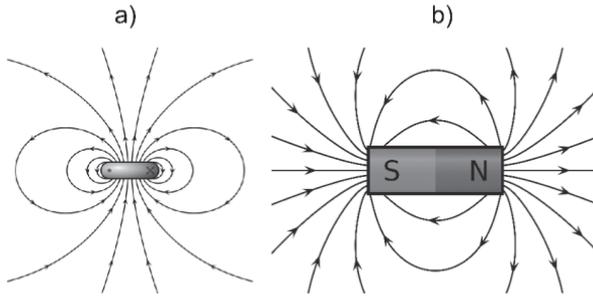
Figura 3.1 | a) Experimento de Oersted. Quando a chave é fechada, a corrente cria um campo magnético que deflete a agulha da bússola. b) A direção da corrente em relação ao campo magnético é dada pela regra da mão direita



Fonte: adaptada de <<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b7/Oersted1.png>> e <http://masimoes.pro.br/fisica_el/campos-magneticos-produzido.html>. Acesso em: 27 ago. 2016.

Uma segunda forma de produzir campos magnéticos é mediante materiais que produzem um campo magnético próprio naturalmente, isto é, um campo magnético intrínseco. Esses materiais são usados na construção de ímãs permanentes (Figura 3.2b). O campo magnético produzido por um ímã permanente é similar àquele produzido por uma corrente em um anel circular (solenóide), situações representadas na Figura 3.2 ("a" e "b"). O anel circular está representado na Figura 3.2a, na qual o "x" e o ponto representam a saída e entrada de corrente, respectivamente.

Figura 3. 2 | Campos magnéticos produzidos por a) uma corrente em um anel circular e b) por um ímã permanente



Fonte: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/5/56/VFPT_dipole_magnetic3.svg/480px-VFPT_dipole_magnetic3.svg.png> e <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/0/0c/VFPT_cylindrical_magnet_thumb.svg/2000px-VFPT_cylindrical_magnet_thumb.svg.png>. Acesso em: 29 mar. 2017.

As linhas de campo desenhadas nos ajudam a visualizar a direção da força magnética ao redor da fonte de campo. Para calcular a intensidade desse campo magnético, devemos aplicar a Lei de Ampère em um caminho fechado, podendo ser, neste caso, o comprimento do fio condutor:

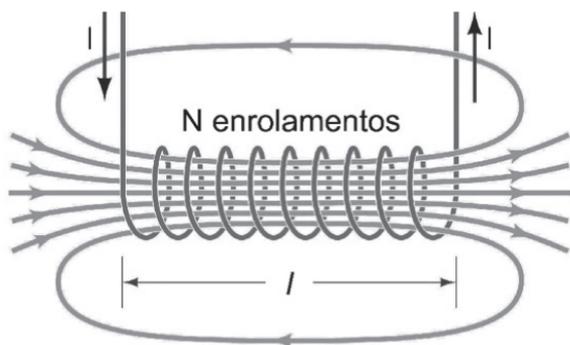
$$\int \vec{H} \cdot \vec{dl} = I_{env}$$

Veja que \vec{H} é a intensidade de campo magnético (medido em A/m), \vec{dl} é um diferencial de comprimento e I_{env} é a corrente envolvida pelo caminho fechado. Tomando o caminho fechado como uma circunferência de raio r , a Lei de Ampère será:

$$\int \vec{H} \cdot \vec{dl} = I_{env} \rightarrow H = \frac{I_{env}}{2\pi r}$$

Quando fazemos vários enrolamentos com a utilização de fios condutores, criamos uma bobina (Figura 3.3). Para uma bobina com N enrolamentos, o campo magnético produzido será calculado como $H = \frac{NI_{env}}{2\pi r}$.

Figura 3.3 | Bobina com N enrolamentos alimentada por corrente contínua



Fonte: adaptada de <http://alpcentauri.info/20_26.jpg>. Acesso em: 25 nov. 2016.



Refleta

Falamos sobre a produção de campo magnético no caso de uma corrente contínua, certo?

Se a corrente fosse alternada, o campo magnético também seria alternado?

Repare que em nenhum momento nos preocupamos em saber qual material foi utilizado para construir a bobina. Se quisermos avaliar o campo magnético no interior de algum material, normalmente usaremos outra grandeza, chamada densidade de fluxo magnético (\vec{B}), medida em tesla (T), ou Wb/m^2 , e relacionada com a intensidade de campo magnético de acordo com: $\vec{B} = \mu \cdot \vec{H}$, em que: μ é a permeabilidade magnética do material (medida em Henry por metro H/m). De maneira similar à permissividade elétrica ϵ (estudada na Seção 2.1), tomamos como referência a permeabilidade magnética do vácuo como uma constante que vale $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}}$. Para algum material específico, a sua permeabilidade será múltipla dessa constante, de acordo com:

$\mu = \mu_r \mu_0$ (em que: μ_r é a permeabilidade relativa do material e é adimensional.)

O Quadro 3.1 apresenta alguns valores de μ_r para materiais de interesse prático.

Quadro 3.1 | Permeabilidade relativa de alguns materiais

Material	Permeabilidade relativa μ_r
Ar	1
Níquel	50
Ferro	4000
Alumínio	1
Aço	500 a 5000

Fonte: Coey (2010, p. 134).

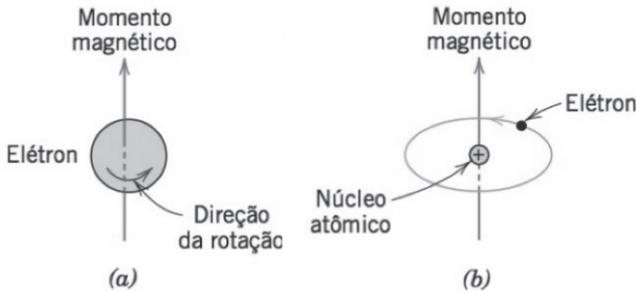


Assimile

Podemos calcular a intensidade de um campo magnético (\vec{H}) a partir da Lei de Ampère, independentemente do material usado. Entretanto, caso seja de interesse conhecer o comportamento desse campo em um material específico, passaremos a utilizar a densidade de fluxo magnético (\vec{B}).

Para estudarmos o magnetismo nos materiais, precisamos compreender como são formados os campos magnéticos internos a eles. Se analisarmos um átomo usando o modelo atômico de Bohr, isto é, um núcleo pequeno carregado positivamente com elétrons orbitando ao seu redor, teremos dois movimentos distintos: o de rotação do elétron no próprio eixo e aquele ao redor do núcleo. Sendo o elétron uma carga elétrica em movimento, podemos considerá-lo um circuito circular de corrente (CALLISTER; RETHWISCH, 2016). Dessa forma, esse movimento do elétron no seu próprio eixo cria um campo magnético e, conseqüentemente, um momento magnético. Além desse campo, temos um segundo campo e momento magnético, criado pelo movimento orbital do elétron, conforme apresentado na Figura 3.4. É importante ressaltar que o modelo de Bohr, apesar de apresentar boa aproximação para cálculos, não é realista. Para um tratamento mais adequado, precisaríamos do conceito de *spin* da mecânica quântica, que está fora do escopo deste livro.

Figura 3.4 | Momento magnético associado ao movimento: a) de um elétron em torno do seu eixo; e b) de um elétron orbitando o núcleo



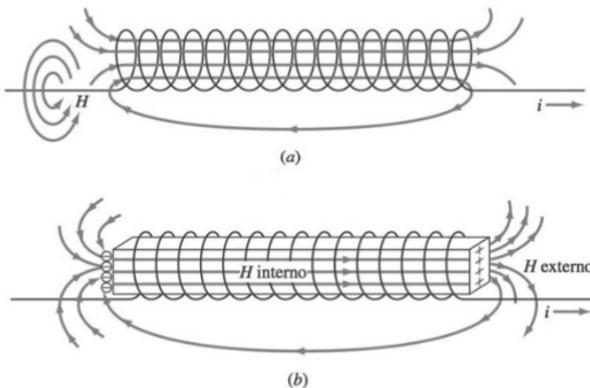
Fonte: adaptada de Callister e Rethwisch (2016, p. 686).

Voltando ao caso da bobina, o que acontecerá se fizermos o enrolamento em um material em vez de no ar? Nesse caso, precisaremos considerar os momentos magnéticos do material, que contribuirão juntamente com o campo externo aplicado para aumentar a densidade de fluxo, de acordo com:

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M})$$

(em que: \vec{M} é o vetor de magnetização do material). Veja a Figura 3.5.

Figura 3.5 | Densidade de fluxo magnético \vec{B} quando a) o enrolamento é feito no ar e b) o enrolamento é feito em outro material. No segundo caso, a magnetização interna pode contribuir para o aumento de \vec{B}

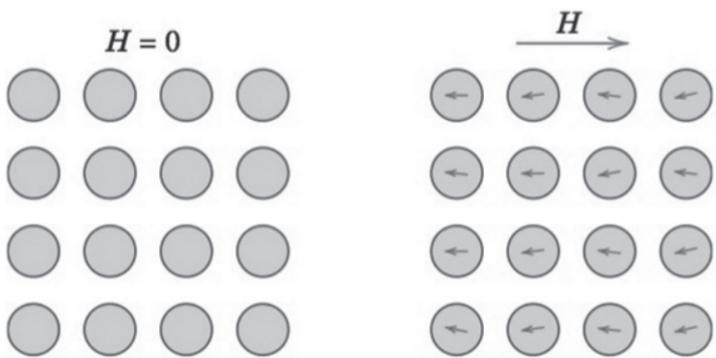


Fonte: adaptada de Smith e Hashemi (2012, p. 605).

O magnetismo em materiais é classificado em três categorias: diamagnetismo, paramagnetismo e ferromagnetismo.

Materiais diamagnéticos não possuem campo magnético permanente, de forma que é necessário haver um campo externo aplicado para que haja algum efeito magnético. Exemplos desse tipo de material são: bismuto, cobre, prata, chumbo etc. Podemos avaliar esse comportamento a partir dos momentos magnéticos, conforme Figura 3.6.

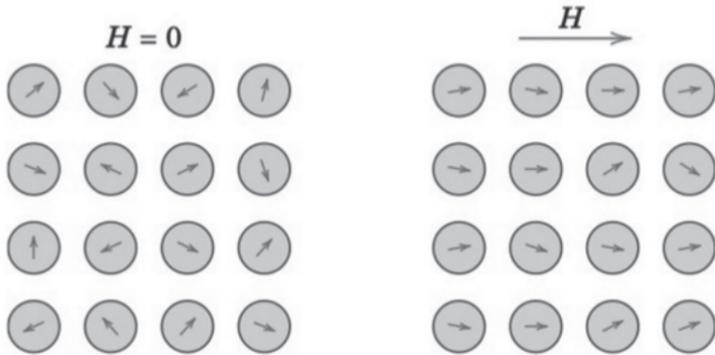
Figura 3.6 | Momentos magnéticos de um material diamagnético a) sem campo magnético externo e b) com campo externo



Fonte: adaptada de Callister e Rethwisch (2016, p. 687).

Materiais paramagnéticos possuem um campo magnético fraco. Ademais, quando aplicamos a um campo externo, ocorrerá com este o alinhamento parcial dos momentos magnéticos, aumentando a densidade de fluxo resultante (Figura 3.7). O alumínio, o magnésio e o sulfato de cobre são exemplos de materiais paramagnéticos.

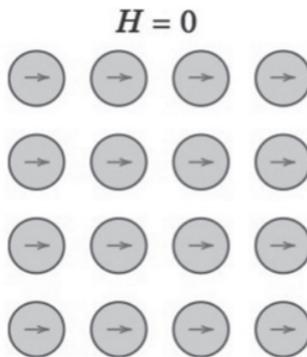
Figura 3.7 | Momentos magnéticos de um material paramagnético a) sem campo magnético externo e b) com campo externo



Fonte: adaptada de Callister e Rethwisch (2016, p. 687).

Como os materiais diamagnéticos e paramagnéticos exibem magnetização apenas quando um campo externo é aplicado, ambos são considerados não magnéticos (CALLISTER; RETHWISCH, 2016). Por fim, materiais ferromagnéticos possuem campo magnético permanente sem necessidade de um campo externo aplicado (Figura 3.8). O ferro, o cobalto, o níquel e as ligas que são formadas por essas substâncias são exemplos de materiais ferromagnéticos.

Figura 3.8 | Momentos magnéticos de um material ferromagnético sem campo magnético externo



Fonte: adaptada de Callister e Rethwisch (2016, p. 689).

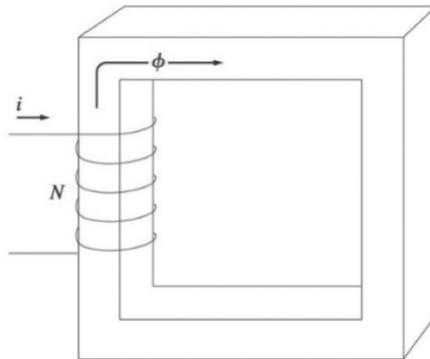


Além das categorias de magnetismo nos materiais listados, há também o antiferromagnetismo e o ferromagnetismo. Entre com seu login e sua senha na biblioteca virtual e leia mais sobre esses fenômenos nos itens 20.4 e 20.5 do livro:

CALLISTER JR, W. D.; RETHWISCH, David G. Ciência e engenharia dos materiais: uma introdução. 9 ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 2016. 912 p.

Agora que conhecemos um pouco mais sobre os materiais magnéticos, vamos estudar os circuitos magnéticos e a forma como podemos fazer uma analogia entre estes e os circuitos elétricos convencionais. Considere um material ferromagnético que possui uma bobina com N enrolamentos em seu lado esquerdo (Figura 3.9). Ao alimentarmos essa bobina com uma fonte de tensão, uma corrente elétrica circulará pelo enrolamento produzindo um campo magnético. Como estamos usando um material ferromagnético, podemos considerar que há neste uma densidade de fluxo magnético.

Figura 3.9 | Circuito magnético



Fonte: adaptada de Chapman (2013, p. 27).

Ademais, também haverá o fluxo magnético (medido em Wb) calculado de acordo com:

$$\Phi = \int_s \vec{B} \cdot d\vec{S} \text{ (em que: } d\vec{S} \text{ é um diferencial de superfície).}$$

Podemos fazer uma analogia entre circuitos elétricos e circuitos magnéticos, a fim de facilitar a análise destes últimos. Por exemplo, fontes usadas em circuitos elétricos possuem força eletromotriz (diferença de potencial), ao passo que, em circuitos magnéticos, à fonte de campo magnético damos o nome de força magnetomotriz (F_{mm} ou \mathfrak{F}) medida em A . A corrente elétrica, que representa fluxo de cargas em um condutor, será o equivalente elétrico do fluxo magnético (Φ). Por fim, a resistência à passagem desse fluxo magnético é conhecida como relutância (\mathfrak{R}) e é medida em $\frac{A \cdot esp}{Wb}$. A partir do momento em que convertemos o circuito magnético em elétrico, todos os teoremas usados em circuitos elétricos tornam-se válidos, desde que adequadamente convertidos. Por exemplo, a Lei de Ohm para circuitos elétricos é $V = RI$, em circuitos magnéticos ela se torna $F_{mm} = \Phi \mathfrak{R}$. O Quadro 3.2 apresenta as grandezas magnéticas e seus equivalentes elétricos.

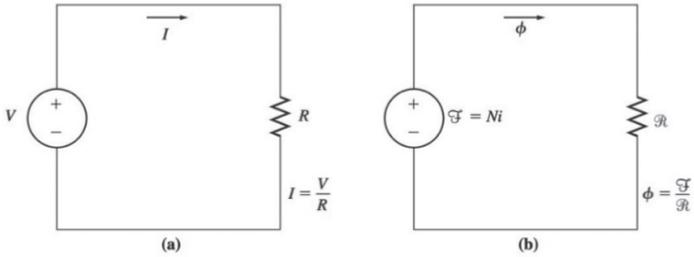
Quadro 3.2 | Analogia entre circuitos elétricos e magnéticos

Circuito elétrico	Circuito magnético
Fonte de tensão (força eletromotriz), V	Força magnetomotriz, F_{mm}
Corrente elétrica, I	Fluxo magnético, Φ
Resistência, $R = \frac{l}{\sigma A}$	Relutância, $\mathfrak{R} = \frac{l}{\mu A}$
Lei de Ohm: $V = RI$	$F_{mm} = \Phi \mathfrak{R}$
Condutividade, σ	Permeabilidade magnética, μ

Fonte: Nasar (1995).

A Figura 3.10 apresenta um circuito elétrico de uma malha e seu equivalente magnético.

Figura 3.10 | Analogia entre circuito a) elétrico e b) magnético



Fonte: adaptada de Chapman (2013, p. 27).



Exemplificando

Vamos calcular o fluxo magnético no sistema apresentado na Figura 3.9, considerando que o material ferromagnético possui permissividade relativa de 100 e que o enrolamento conduz 2 A e possui 50 voltas. As dimensões do material ferromagnético são: comprimento médio de 20 cm e área da seção transversal igual a 4 cm^2 . Qual é o fluxo magnético desse circuito?

Solução:

Vamos começar calculando a relutância desse material ferromagnético de acordo com $\mathfrak{R} = \frac{l}{\mu A}$, em que: l é o comprimento do caminho médio do material e A é a área da seção transversal. Substituindo os valores fornecidos, temos que a relutância do material é:

$$\mathfrak{R} = \frac{l}{\mu_r \mu_0 A} \rightarrow \mathfrak{R} = \frac{0,2}{100 \times 4\pi \times 10^{-7} \times 4 \times 10^{-4}} = 3,98 \times 10^6 \frac{\text{A} \cdot \text{esp}}{\text{Wb}}$$

A força magnetomotriz será o equivalente da fonte de tensão e é calculada como:

$$F_{mm} = Ni = 50 \times 2 = 100 \text{ A} \cdot \text{esp}$$

Por fim, o fluxo magnético (análogo à corrente elétrica) pode ser calculado a partir da Lei de Ohm para circuitos magnéticos, como:

$$F_{mm} = \Phi \mathfrak{R} \rightarrow \Phi = \frac{F_{mm}}{\mathfrak{R}} = \frac{100}{3,98 \times 10^6} \approx 25 \mu \text{Wb}$$

Sem medo de errar

Lembre-se de que você trabalha em uma empresa que fornece consultoria para projetos de engenharia e um cliente o contratou para verificar quais materiais podem ser usados para construir o núcleo de um transformador.

Sabemos que a permeabilidade magnética é diretamente proporcional à densidade de fluxo elétrico em um material ferromagnético. Em outras palavras, quanto maior for μ_r , mais facilmente o campo magnético atravessará o material.

As opções de materiais a serem usados estão apresentadas no Quadro 3.1. Após analisar as permeabilidades relativas apresentadas, você escolhe o aço porque é o material que possui maior μ_r e, conseqüentemente, terá o maior fluxo magnético dentre as opções. Esse resultado deverá ser explicado no relatório técnico. Vale destacar que, uma vez que a permeabilidade relativa do aço não é constante, você precisará consultar um fabricante para escolher o aço com maior μ_r .

Avançando na prática

Relutância de um material ferromagnético

Descrição da situação-problema

Você trabalha para um fabricante de materiais magnéticos e, juntamente com a sua equipe, ajudou no desenvolvimento de um aço elétrico com permeabilidade relativa de 70.000. Vocês querem comparar a relutância de um circuito magnético usando esse novo material em vez do ferro ($\mu_r = 4.000$). Ambos os circuitos magnéticos possuem o mesmo comprimento de caminho médio, mas a seção transversal do circuito de Fe é um terço do material novo.

Resolução da situação-problema

A relutância de um circuito magnético é calculada de acordo com $\mathfrak{R} = \frac{l}{\mu A}$, em que: l é o comprimento do caminho médio do material e A é a área da seção transversal. Assim, temos as seguintes relutâncias:

- Relutância do novo material: $\mathfrak{R}_{\text{novo}} = \frac{l_{\text{novo}}}{\mu_{\text{novo}} A_{\text{novo}}}$

- Relutância do ferro: $\mathfrak{R}_{\text{Fe}} = \frac{l_{\text{Fe}}}{\mu_{\text{Fe}} A_{\text{Fe}}}$

Como os comprimentos são iguais, a relação entre as relutâncias será:

$$\frac{\mathfrak{R}_{\text{novo}}}{\mathfrak{R}_{\text{Fe}}} = \frac{\frac{l_{\text{novo}}}{\mu_{\text{novo}} A_{\text{novo}}}}{\frac{l_{\text{Fe}}}{\mu_{\text{Fe}} A_{\text{Fe}}}} \rightarrow \frac{\mathfrak{R}_{\text{novo}}}{\mathfrak{R}_{\text{Fe}}} = \frac{\frac{l_{\text{novo}}}{\mu_{\text{novo}} A_{\text{novo}}}}{\frac{l_{\text{Fe}}}{\mu_{\text{Fe}} A_{\text{Fe}}}} \rightarrow \frac{\mathfrak{R}_{\text{novo}}}{\mathfrak{R}_{\text{Fe}}} = \frac{\mu_{\text{Fe}} A_{\text{Fe}}}{\mu_{\text{novo}} A_{\text{novo}}}$$

Como a área da seção transversal do material novo é um terço da do ferro ($A_{\text{novo}} = \frac{1}{3} A_{\text{Fe}}$), temos:

$$\frac{\mathfrak{R}_{\text{novo}}}{\mathfrak{R}_{\text{Fe}}} = \frac{\mu_{\text{Fe}} A_{\text{Fe}}}{\mu_{\text{novo}} \frac{1}{3} A_{\text{Fe}}} \rightarrow \frac{\mathfrak{R}_{\text{novo}}}{\mathfrak{R}_{\text{Fe}}} = 3 \times \frac{4000}{70000} \rightarrow \frac{\mathfrak{R}_{\text{novo}}}{\mathfrak{R}_{\text{Fe}}} = 0,17$$

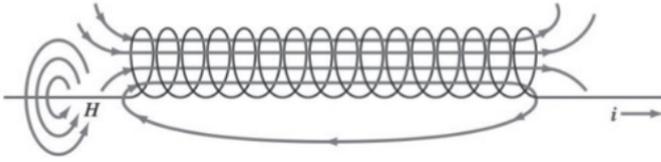
Portanto, a relutância do novo material para as condições informadas é aproximadamente 17% da relutância do ferro.

Faça valer a pena

1. Campos magnéticos podem ser produzidos por correntes elétricas em circuitos ou por um magnetismo intrínseco do próprio material. A intensidade de campo magnético \vec{H} não depende do material. Caso seja de interesse avaliar o campo magnético no interior de materiais, passaremos a analisar a densidade de fluxo magnético (\vec{B}).

Você preparou uma bobina de 50 cm de comprimento usando 300 espiras. Se essa bobina conduzir uma corrente de 5 A, qual será a intensidade do campo magnético produzido (em $\frac{\text{A} \cdot \text{esp}}{\text{m}}$)?

Bobina



Fonte: adaptada de Smith e Hashemi (2012, p. 605).

- a) 500.
- b) 1.000.
- c) 2.000.
- d) 3.000.
- e) 5.000.

2. Campos magnéticos podem ser produzidos por correntes elétricas em circuitos ou por um magnetismo intrínseco do próprio material. A densidade de fluxo magnético depende do material utilizado, de forma que maiores permeabilidades relativas implicam maiores densidades de fluxo.

Você preparou uma bobina de 1 m de comprimento usando 100 espiras em uma barra de ferro ($\mu_r = 4000$), conforme Figura do exercício anterior. Se essa bobina conduzir uma corrente de 2 A, qual será a densidade de fluxo magnético em T?

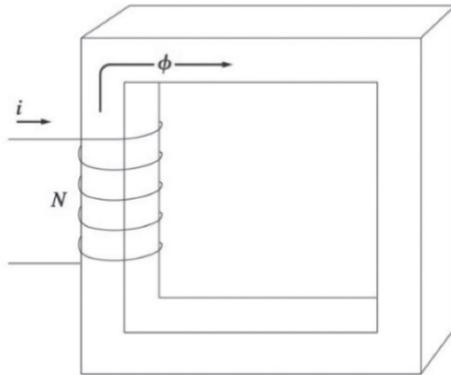
- a) 2.
- b) 1.
- c) 0,5.
- d) 4.
- e) 0,75.

3. Circuitos magnéticos podem ser facilmente analisados se fizermos um análogo elétrico da seguinte maneira: a fonte de tensão se tornará uma força magnetomotriz ($F_{mm} = Ni$), medida em Ampère-Espira ($A \cdot \text{esp}$); a corrente elétrica se tornará um fluxo magnético ($\Phi = \int_s \vec{B} \cdot d\vec{S}$), medido em Weber; a resistência se tornará uma relutância ($\mathfrak{R} = \frac{l}{\mu A}$), em que l e A são o comprimento médio e área da seção transversal do material ferromagnético, respectivamente. A relutância é medida em $\frac{A \cdot \text{esp}}{Wb}$. A partir do momento em que convertemos o circuito

magnético em elétrico, todos os teoremas usados em circuitos elétricos tornam-se válidos, desde que adequadamente convertidos. Por exemplo, a Lei de Ohm para circuitos magnéticos é $Fmm = \Phi \mathcal{R}$.

Considere a estrutura apresentada na figura seguinte, na qual o material ferromagnético possui permissividade de 1000, em que o enrolamento conduz 5 A e possui 120 voltas. As dimensões do material ferromagnético são: comprimento médio de 30 cm e área da seção transversal igual a 8cm^2 . Qual é o fluxo magnético desse circuito?

Circuito magnético



Fonte: adaptada de Chapman (2013, p. 27).

- a) $\Phi \approx 2\text{mWb}$.
- b) $\Phi \approx 4\text{mWb}$.
- c) $\Phi \approx 5\text{mWb}$.
- d) $\Phi \approx 1\text{mWb}$.
- e) $\Phi \approx 3\text{mWb}$.

Seção 3.2

Magnetização e histerese

Diálogo aberto

Seja bem-vindo à Seção 3.2 do curso de Medidas e Materiais Elétricos. Começamos esta unidade estudando as formas de produzir um campo magnético, além dos materiais diamagnéticos, paramagnéticos e ferromagnéticos. Vamos continuar nossos estudos sobre as propriedades magnéticas dos materiais estudando a magnetização, a histerese e as classificações derivadas desta última.

O comportamento de magnetização dos materiais nos mostra como a densidade de fluxo (\vec{B}) varia conforme aplicamos um campo magnético externo (\vec{H}). Esse comportamento depende da facilidade com os vetores de magnetização (\vec{M} , estudados na Seção 3.1) que tendem a se alinhar com o campo externo quando este é alternado; ora o alinhamento é em um sentido, ora é no sentido contrário. Esse comportamento recebe o nome de histerese e gera duas classes de materiais magnéticos: duros e moles. O conhecimento sobre a histerese de um material é importante para avaliarmos as perdas magnéticas neste, o que está relacionado com a eficiência de um equipamento, principalmente quando pensamos em máquinas elétricas e transformadores.

Como você deve se lembrar, nesta unidade você ocupa o lugar de um profissional que trabalha em uma empresa que presta consultoria em equipamentos de alta tensão, principalmente transformadores. Solicitou-se a você que verificasse quais materiais magnéticos podem ser usados para construir o núcleo de um transformador. Você e sua equipe já definiram que o núcleo deverá ser feito a partir de um material ferromagnético (aço-elétrico). Precisamos verificar agora quais são as perdas magnéticas do material escolhido, fator determinante para avaliarmos a eficiência global do equipamento.

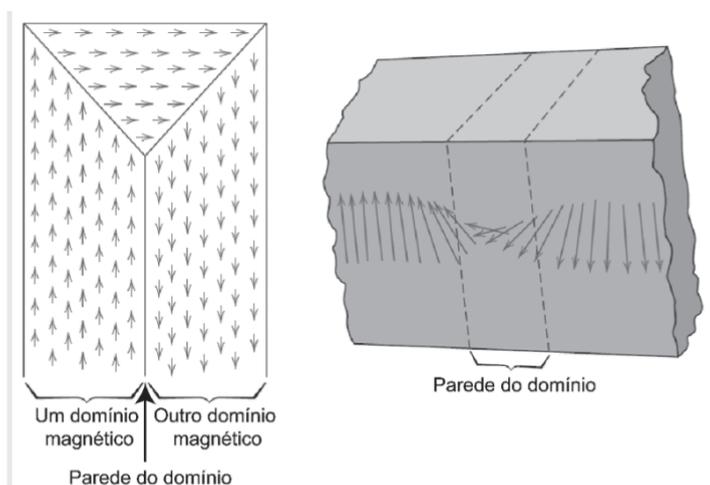
Para resolver o problema, você precisa compreender o fenômeno da histerese.

Não pode faltar

Algumas características de materiais magnéticos são extremamente importantes para definir qual deles será usado em um equipamento ou aplicação. Transformadores e máquinas elétricas, por exemplo, equipamentos que fazem conversão eletromecânica de energia precisam ter as menores perdas possíveis, a fim de melhorar a eficiência geral do equipamento.

Vamos começar esta seção estudando a característica de magnetização de materiais magnéticos. Para isso, precisamos conhecer um pouco mais a fundo o que acontece dentro do material. Você se lembra dos momentos magnéticos que estudamos na Seção 3.1, na qual mostramos que os materiais ferromagnéticos possuem magnetização própria? Considere agora vários vetores de magnetização (\vec{M}) em uma região microscópica do material (Figura 3.12a). A esta região damos o nome de domínio, isto é, uma região que possui um vetor de magnetização não nulo em uma mesma direção. A magnetização para o material como um todo é a soma vetorial da magnetização de todos os domínios (CALLISTER; RETHWISCH, 2016). Entre cada domínio há uma transição gradual do vetor magnetização através das chamadas paredes dos domínios (Figura 3.12b).

Figura 3.12 | a) Domínios e b) parede do domínio que indica a transição do vetor magnetização



Fonte: adaptada de Callister e Rethwisch (2016, p. 752).

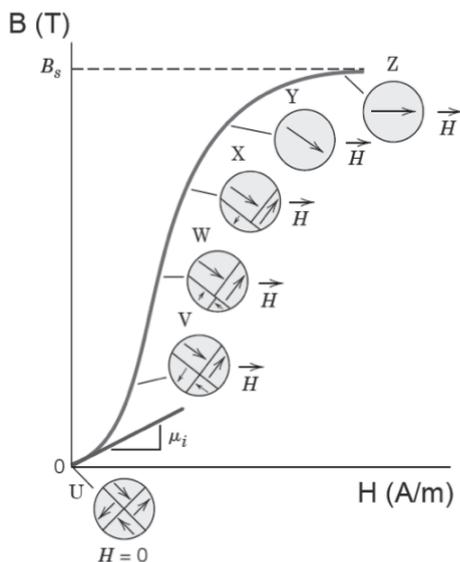
Um parâmetro importante para avaliar as características de um material magnético é a sua curva de magnetização. Estudamos na seção anterior que a densidade de fluxo magnético (\vec{B}) depende do campo magnético externo aplicado (\vec{H}) e da magnetização do material (\vec{M}), de acordo com a equação:

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M})$$

Em que: μ_0 é a permeabilidade magnética do vácuo, uma constante que vale $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \frac{H}{m}$.

Vamos avaliar a variação da densidade de fluxo magnético em relação ao campo magnético externo aplicado (curva B-H ou característica de magnetização) em um material inicialmente desmagnetizado. Dessa forma, para $\vec{H} = 0$, a curva começará na origem e o material apresentará uma permeabilidade inicial μ_i (Figura 3.13). Conforme o valor de \vec{H} aumenta, a densidade de fluxo magnético aumenta de maneira não linear, isto é, sem uma taxa de variação constante. Isso deve-se ao fato de que, para valores baixos de \vec{H} , há poucos domínios magnéticos alinhados com esse campo, e, conforme \vec{H} aumenta, o alinhamento tende a melhorar. Em outras palavras, o vetor de magnetização tende a se alinhar com o campo externo aplicado, alinhamento esse que melhora conforme aumentamos o valor do campo. Os valores máximos de \vec{B} (B_s) e \vec{M} (M_s) são conhecidos como densidade do fluxo de saturação e magnetização de saturação (Figura 3.13).

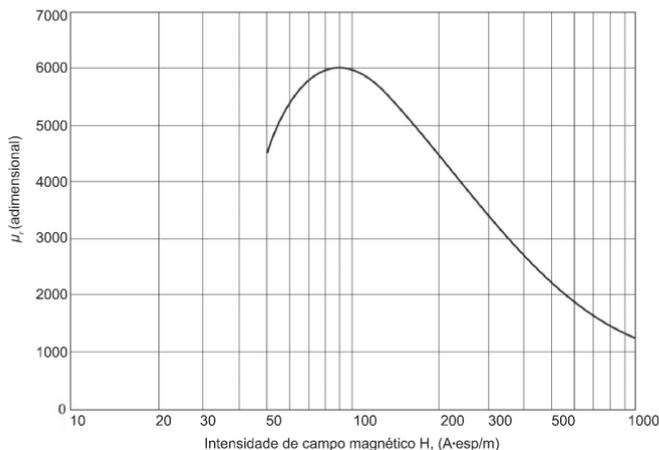
Figura 3.13 | Curva de magnetização (B-H) de um material inicialmente desmagnetizado



Fonte: adaptada de Callister e Rethwisch (2016, p. 752).

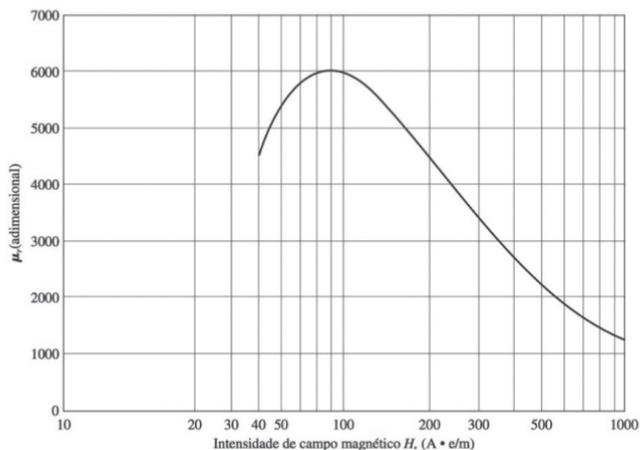
A Figura 3.14 mostra a curva de magnetização típica de uma peça de aço. É importante destacar neste momento que, uma vez que a curva de magnetização é não linear, a permeabilidade magnética não é constante (Figura 3.15), podendo ser calculada ao longo da curva B-H.

Figura 3.14 | Curva de magnetização de uma peça típica de aço



Fonte: adaptada de Chapman (2013, p. 22).

Figura 3.15 | Variação da permeabilidade relativa (μ_r) em função de H para uma peça típica de aço

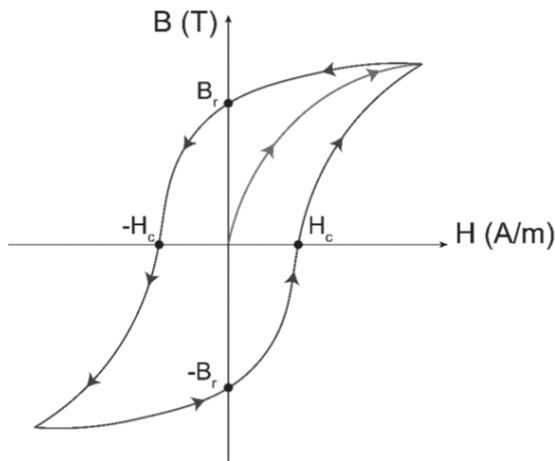


Fonte: adaptada de Chapman (2013, p. 23).

Até agora analisamos a curva B-H considerando apenas um campo externo crescente. Quando o diminuimos, verificamos experimentalmente que a curva não retorna pelo traçado original, efeito esse conhecido como histerese (Figura 3.16), no qual a taxa de diminuição de \vec{B} é menor. Se diminuirmos o campo externo até que este se torne nulo, verificaremos que \vec{B} não retorna a zero, indicando

que agora o material possui uma densidade de fluxo remanescente B_r (ou remanência) mesmo sem campo externo aplicado. Portanto, o material agora está magnetizado. Para desmagnetizar esse material, precisaremos inverter o sentido do campo externo e aumentá-lo novamente, a fim de movimentar novamente os domínios magnéticos. Assim, conseguiremos diminuir a densidade remanescente até zerá-la, sendo esse ponto conhecido como coercividade H_c (ou força coercitiva), que nada mais é do que a intensidade de campo externo necessária para desmagnetizar o material. Se continuarmos aumentando \vec{H} , verificaremos que \vec{B} também crescerá seguindo a curva da figura até chegar a uma nova condição de saturação ($-B_s$). Invertendo novamente o sentido do campo externo (de volta ao original) até o primeiro ponto de saturação, fecharemos o laço (ou ciclo) de histerese do material.

Figura 3.16 | Laço de histerese. A curva vermelha indica a curva de magnetização inicial



Fonte: elaborada pelo autor.



Reflita

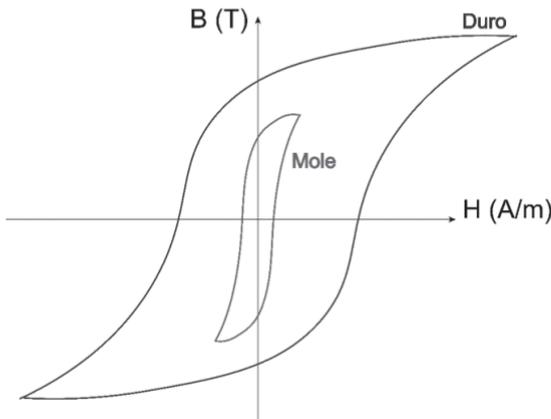
A curva de histerese é sempre única? Vamos supor que estamos em um laboratório para fazer um levantamento experimental da curva de histerese. Se refizermos esse experimento mais de uma vez, teremos sempre o mesmo resultado?



Materiais ferromagnéticos possuem a característica de magnetização e a histerese estudadas até o momento. Materiais paramagnéticos e diamagnéticos, por possuírem vetor de magnetização resultante nulo, dependem apenas do campo externo aplicado para apresentarem magnetização, de forma que a equação que rege essa curva é $\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$. Portanto, materiais paramagnéticos e diamagnéticos possuem relação B-H linear.

Podemos classificar os materiais magnéticos em duas grandes classes a partir do laço de histerese. Se um material possuir um laço de histerese estreito, isto é, se pode ser facilmente desmagnetizado, nós o classificaremos como **material magnético mole**. No caso em que o material não é desmagnetizado facilmente (laço de histerese mais largo), vamos classificá-lo como **material magnético duro**. Ambas as características são apresentadas na Figura 3.17.

Figura 3.17 | Laços de histerese de materiais magnéticos duros e moles



Fonte: elaborada pelo autor.

Materiais magnéticos moles são usados em equipamentos em que encontramos campos magnéticos alternados, como núcleos ferromagnéticos de transformadores e máquinas elétricas. Como eles possuem laço de histerese estreito, as perdas associadas à histerese são menores se comparadas às de um material magnético

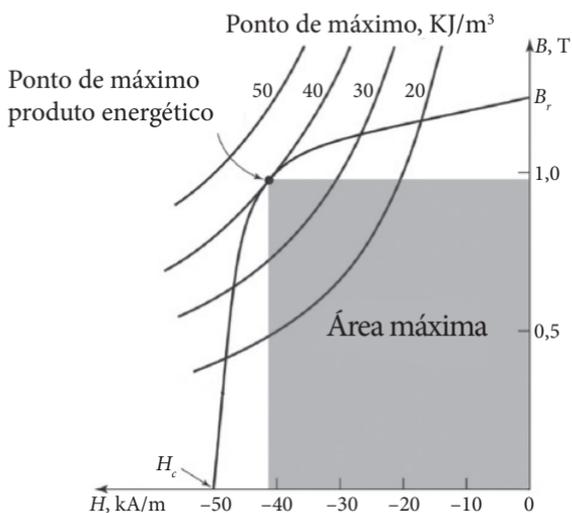
duro (CALLISTER; RETHWISCH, 2016). As perdas por histerese ocorrem por causa do movimento das paredes de domínios e são dependentes da frequência. Ademais, a permeabilidade magnética dos materiais magnéticos moles costuma ser muito elevada, o que facilita a produção de fluxo magnético em seu interior (SMITH; HASHEMI, 2013). Assim, materiais magnéticos moles possuem alta permeabilidade inicial e baixa coercividade.

Exemplos de materiais magnéticos moles de destaque na engenharia são as ligas de ferro-silício, nas quais este último é adicionado (por meio de um processo de dopagem) ao ferro e proporciona: diminuição das perdas por correntes parasitas (em razão do aumento da resistividade do material); diminuição das perdas por histerese (como resultado do aumento da permeabilidade magnética); diminuição das perdas por magnetostricção (ruídos no transformador) (SMITH; HASHEMI, 2013). A proporção de Si não pode ser superior a 4%.

Os materiais magnéticos duros, ao contrário, são de difícil desmagnetização, isto é, o material possui elevada densidade de fluxo magnético remanescente (B_r) e coercividade. Como o laço de histerese desses materiais é mais largo, as perdas por histerese são muito maiores quando comparadas com as dos materiais magnéticos moles. Assim, materiais magnéticos duros não são recomendados para aplicações em que encontramos campos magnéticos alternados, sendo comumente usados como ímãs permanentes.

Uma figura de mérito bastante utilizada para materiais magnéticos duros é o produto de energia (BH_{max} medido em $\frac{kJ}{m^3}$), que corresponde à energia necessária para desmagnetizar esse material por unidade de volume. Graficamente, podemos interpretar esse produto como o retângulo com a maior área possível de ser desenhado dentro do segundo quadrante do laço de histerese. A Figura 3.18 apresenta o segundo quadrante do laço de histerese da liga Alnico 5, na qual podemos ver o ponto do produto de energia. As ligas de Alnico (alumínio-níquel-cobalto) são de grande importância comercial e possuem alto produto de energia, remanência elevada e coercividade moderada. São muito usadas em sensores, motores elétricos e captadores de guitarras.

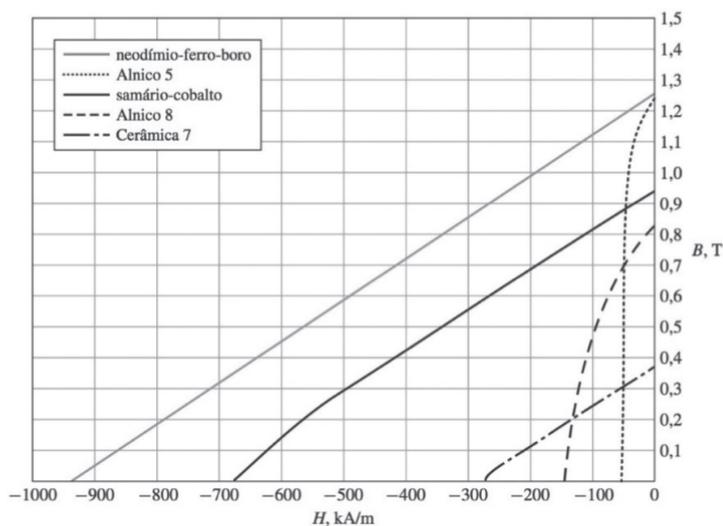
Figura 3.18 | Curvas de produto energético para a liga Alnico 5. O ponto de produto energético máximo corresponde a 40 kJ/m^3



Fonte: adaptada de Umans (2014, p. 30).

Dentre outros materiais magnéticos duros notáveis, estão o samário-cobalto e o neodímio-ferro-boro (SmCO_5 e $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$, respectivamente). A Figura 3.19 apresenta o segundo quadrante do laço de histerese de vários materiais magnéticos duros, com base no qual podemos comparar, por exemplo, os seus valores de remanência e coercividade.

Figura 3.19 | Segundo quadrante do laço de histerese de diversos materiais magnéticos duros



Fonte: adaptada de Umans (2014, p. 35).



Exemplificando

A partir dos materiais apresentados na Figura 3.18, qual você escolheria para construir um ímã permanente? Justifique sua resposta:

Solução:

Analizando a Figura 3.19, verificamos que há dois materiais com praticamente a mesma remanência: o próprio neodímio-ferro-boro e o Alnico 5. O ímã de neodímio-ferro-boro possui a maior coercividade, ou seja, é o material mais difícil de desmagnetizar que o de Alnico 5. Portanto, se a nossa aplicação demandar um ímã robusto, escolheremos o ímã de neodímio-boro-ferro.

É importante ressaltar que, apesar de alguns materiais apresentarem magnetismo naturalmente, essa propriedade é dependente da temperatura. Vimos na Seção 2.2 que as propriedades piezoelétricas dos materiais eram perdidas caso estes ultrapassassem a temperatura Curie. Isso também acontece para os

materiais magnéticos tornando-se, portanto, um limite operativo do material. O Quadro 3.3 apresenta os valores de temperatura Curie para alguns materiais.

Quadro 3.3 | Temperatura Curie de alguns materiais

Material	Temperatura Curie (K)	Temperatura Curie ($^{\circ}\text{C}$)
Ímãs de neodímio-ferro-boro	310 - 400	37 - 127
Ligas Alnico	810 - 900	537 - 627
Ímãs de samário-cobalto	700 - 750	427 - 477

Fonte: Furlani (2001).



Pesquise mais

Estude mais aplicações de ímãs permanentes na seção 2.6 do livro:

UMANS, S. D. Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7 ed. São Paulo: AMGH, 2014. 728 p.

Sem medo de errar

Na empresa de equipamentos de alta tensão, você já verificou anteriormente quais tipos de materiais podem ser usados para construir o núcleo de um transformador, a partir da permeabilidade magnética. Já está definido que o núcleo deverá ser feito com um material ferromagnético (aço-elétrico).

Você sabe que é extremamente importante nesse contexto conhecer as curvas de magnetização e histerese dos materiais magnéticos. Se nosso equipamento trabalhar com campos magnéticos alternados, a relação B-H criará um laço de histerese cuja área interna representa as perdas por histerese. Se esse laço for largo, o material será do tipo magnético duro e, portanto, de difícil desmagnetização, o que implicará perdas por histerese muito altas. Caso o laço de histerese seja mais estreito, o material será do tipo magnético mole, ou seja, de fácil desmagnetização, que apresenta baixas perdas por histerese.

Como o cliente solicitou um projeto de transformador que opera com campos magnéticos alternados, você apresenta em seu relatório que o material do núcleo necessita ser magnético mole.

! Atenção

As perdas nos transformadores devem ser sempre as menores possíveis para que tenham maior eficiência. A escolha de um material ferromagnético mole para construir o núcleo é uma forma de diminuir as perdas (em relação a um material duro).

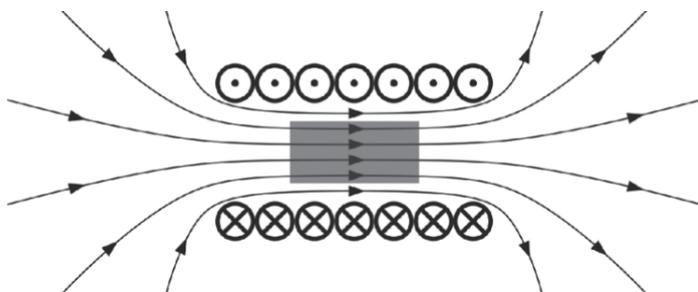
Avançando na prática

Desmagnetizando um ímã permanente

Descrição da situação-problema

Suponha que você é um engenheiro de uma empresa que trabalha com materiais magnéticos. Você precisa saber qual é a corrente necessária para desmagnetizar um ímã de neodímio-ferro-boro. Deve-se considerar que a coercividade deste é aproximadamente 955 kA/m se ele for colocado no interior de um solenoide de 20 cm de comprimento com 500 espiras, conforme Figura 3.20.

Figura 3.20 | Ímã inserido dentro de solenoide



Fonte: adaptada de <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/e/e2/VFPt_Solenoid_correct.svg/1280px-VFPt_Solenoid_correct.svg.png>. Acesso em: 27 nov. 2016.

Resolução da situação-problema

Podemos calcular a corrente elétrica que produzirá a força coercitiva dentro do solenoide com base na Lei de Ampère ($\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = I_{env}$

) em um caminho fechado, podendo ser, neste caso, o comprimento da bobina. Assim, a Lei de Ampère será:

$$\int \vec{H} \cdot d\vec{l} = Ni_{env} \rightarrow H \times l = Ni \rightarrow i = \frac{Hl}{N}$$

Em que: N é o número de espiras e i a corrente elétrica em uma bobina, cujo comprimento é l. Substituindo os valores informados, temos:

$$i = \frac{Hl}{N} \rightarrow i = \frac{955 \frac{kA}{m} \times 0,2m}{500} = 382 A$$

Uma segunda possibilidade de solução é a partir da remanência desse ímã, de aproximadamente 1,2 T. Assim, precisamos criar um campo magnético que gere 1,2 T. no sentido contrário da magnetização inicial. A densidade de fluxo magnético e a intensidade de campo magnético são relacionadas a partir da permeabilidade magnética do meio ($\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$).

Assim, temos que $\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \rightarrow B = \mu_0 \frac{Ni}{l}$. Resolvendo essa equação para a corrente, temos:

$$B = \frac{\mu_0 Ni}{l} \rightarrow i = \frac{lB}{\mu_0 N} = \frac{0,2 \times 1,2}{4\pi \times 10^{-7} \times 500} \approx 382 A$$

Concluimos, portanto, que é necessária uma corrente de aproximadamente 382 A para desmagnetizar esse ímã.

Faça valer a pena

1. Domínio magnético é uma região dentro de um material que possui vetor de magnetização (\vec{M}) não nulo em uma mesma direção. A magnetização para o material como um todo é a soma vetorial da magnetização de todos os domínios. Materiais ferromagnéticos possuem magnetização própria independentemente da aplicação de campo externo.

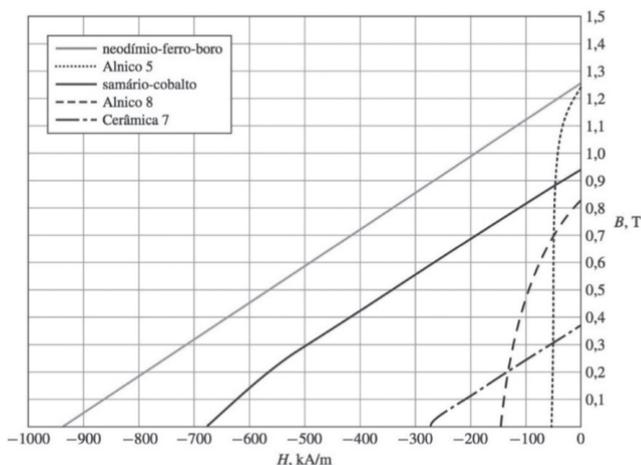
Complete as lacunas da seguinte frase:

Quando aplicamos um campo magnético externo a um material _____, os seus _____ tentarão se alinhar com esse campo. A variação da _____ magnético com o campo externo é conhecida como característica (ou curva) de _____ do material.

Escolha a alternativa que apresenta, na ordem apresentada, as opções corretas para cada lacuna.

- a) Ferromagnético, momentos magnéticos, densidade de campo, histerese.
- b) Ferromagnético, momentos magnéticos, densidade de fluxo, magnetização.
- c) Ferromagnético, momentos lineares, densidade de campo, magnetização.
- d) Paramagnético, momentos lineares, densidade de fluxo, magnetização.
- e) Diamagnético, momentos magnéticos, densidade de fluxo, histerese.

2. Materiais magnéticos duros, diferentemente dos moles, são de difícil desmagnetização. Como o laço de histerese desses materiais é mais largo, as perdas por histerese são muito maiores quando comparadas com os materiais magnéticos moles. Assim, materiais magnéticos duros não são recomendados para aplicações em que encontramos campos magnéticos alternados, sendo comumente usados como ímãs permanentes. A imagem seguinte (Figura 3.9 desta seção) apresenta o segundo quadrante da curva de magnetização de alguns materiais magnéticos usados para fazer ímãs permanentes. Qual dos materiais apresentados é o mais difícil de ser desmagnetizado?



Fonte: adaptada de Umans (2014, p. 35).

- a) Neodímio-ferro-boro.
- b) Alnico 5.
- c) Samário-cobalto.
- d) Alnico 8.
- e) Cerâmica 7.

3. Materiais magnéticos duros, diferentemente dos moles, são de difícil desmagnetização e possuem laço de histerese mais largo, o que implica perdas por histerese muito maiores quando comparadas com os materiais magnéticos moles. Materiais magnéticos duros são comumente usados como ímãs permanentes.

Um ímã permanente feito com um material hipotético possui coercividade de 4000 A/m . Qual será a corrente necessária para desmagnetizar esse ímã se você colocá-lo dentro de um solenoide de 30 cm e 300 espiras?

- a) $I = 1\text{A}$.
- b) $I = 2\text{A}$.
- c) $I = 3\text{A}$.
- d) $I = 4\text{A}$.
- e) $I = 5\text{A}$.

Seção 3.3

Transformadores

Diálogo aberto

Seja bem-vindo à última seção da Unidade 3 de Medidas e Materiais Elétricos. Evoluímos bastante até o momento e vamos encerrar esta unidade estudando o equipamento mais importante de todo Sistema Elétrico de Potência (SEP): o transformador.

Transformadores são equipamentos destinados a transmitir potência entre seus terminais fazendo, também, adequação dos níveis de tensão. Isso significa que podemos aumentar ou diminuir a tensão em um circuito ou sistema elétrico transmitindo a mesma potência (idealmente). Transformadores reais apresentam perdas por efeito Joule (aquecimento) nos enrolamentos e perdas magnéticas no seu núcleo.

Lembre-se: nesta unidade, você trabalha em uma empresa que fornece consultoria para equipamentos de alta tensão, principalmente transformadores. Pediram-lhe que verificasse quais materiais magnéticos e quais tipos podem ser usados para construir o núcleo de um transformador. Você e sua equipe já definiram que o núcleo deverá ser feito de um material ferromagnético (aço-elétrico) mole, que possui elevada permeabilidade magnética e ao mesmo tempo menores perdas por histerese. Agora, vocês precisam verificar se algo mais pode ser feito para reduzir eventuais perdas, tornando o transformador ainda mais eficiente. Depois, você terá condições de apresentar o relatório técnico ao seu gestor, que, além das conclusões obtidas, deve descrever o princípio de funcionamento do transformador.

Para resolver essa situação, precisaremos compreender bem o que são e como funcionam os transformadores. Vamos lá?

Não pode faltar

Um transformador é um equipamento que faz conversão dos níveis de tensão e corrente entre seus terminais de entrada e saída, conhecidos como primário e secundário, respectivamente. Podemos ampliar esse conceito e dizer que o transformador é um dispositivo que transmite potência entre seus terminais e faz adequação dos níveis de tensão.



Assimile

Transformadores são equipamentos que transmitem potência entre primário e secundário fazendo adequação dos níveis de tensão e corrente.

Vamos ver os tipos de transformadores que temos no Sistema Elétrico de Potência (SEP) e algumas de suas características. Para isso, precisamos definir as etapas principais do SEP, que são:

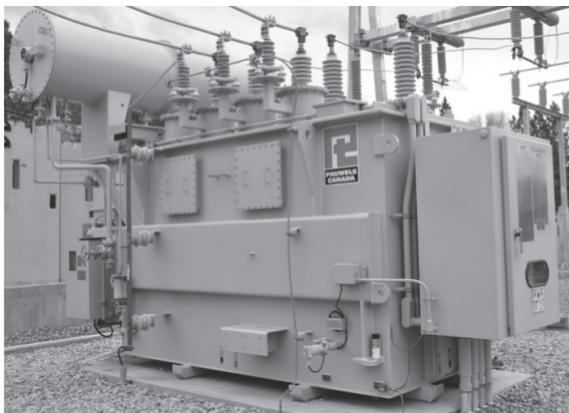
- **Geração:** consiste em todos os equipamentos que fazem parte dos sistemas de geração de energia elétrica, como usinas hidrelétricas e termoeletricas. As unidades geradoras trabalham geralmente na classe de 15 kV.
- **Transmissão:** corresponde a todos os equipamentos usados para transmitir a energia das unidades geradoras para os centros de carga. Alguns equipamentos/componentes de destaque são as linhas de transmissão (LT) de energia elétrica. No Brasil, consideram-se como parte do sistema de transmissão os equipamentos que operam acima de 138 kV.
- **Distribuição:** é a parte final da divisão clássica do SEP e consiste em todos os equipamentos destinados a fornecer energia elétrica para os consumidores finais (residências, comércio e algumas indústrias). Dentro da distribuição há a rede primária e secundária, que operam, normalmente, na classe 15 kV e em 127/220 V, respectivamente.

O transformador é tido como o equipamento mais importante do SEP, pois ele faz a conexão entre as diferentes etapas deste, visto que

cada um opera em uma classe de tensão diferente. A tensão da classe 15 kV das unidades geradoras é elevada para níveis de transmissão (acima de 138 kV) por meio de um transformador elevador de tensão, localizado na subestação elevadora de tensão. No sistema de transmissão, podemos encontrar subestações (de transmissão) com transformadores para adequar novamente os níveis de tensão e equipamentos para fazer manobra e proteção das LTs.

Entre os sistemas de transmissão e distribuição, há as subestações de distribuição com transformadores abaixadores de tensão (ou transformadores de potência, apresentado na Figura 3.21), que operam normalmente de 138 kV na entrada e 13,8 kV na saída, mas podem variar dependendo da região.

Figura 3.21 | Transformador de potência em subestação de distribuição



Fonte: <https://c1.staticflickr.com/3/2572/4099435263_7a7230851e_b.jpg>. Acesso em: 14 nov. 2016.

Entre as redes primárias e secundárias, há os transformadores de distribuição para fazer a última adequação de tensão para recebermos energia elétrica em nossas casas em 127/220 V (dependendo novamente da região). A Figura 3.22 apresenta um transformador de distribuição.

Figura 3.22 | Transformador de distribuição



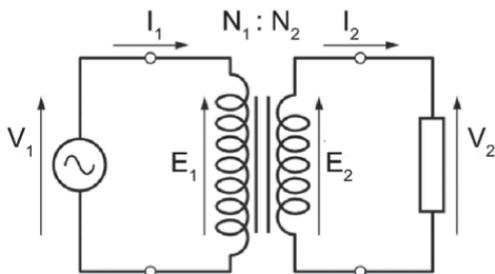
Fonte: <https://static.weg.net/medias/images/h4e/hbb/MKT_WTD_TEXT_IMAGE_SMALL_DISTRIBUTION_TRANSFORMERS_UP_TO_300KVA-01_1200Wx1200H.jpg>. Acesso em: 14 nov. 2016.

Tendo em vista a quantidade de transformadores no SEP, fica claro o porquê desse equipamento ser considerado um dos mais importantes de todos do SEP. Vale a pena ressaltar que, se um transformador sai de serviço por alguma falha, haverá uma desconexão no SEP, podendo levar à interrupção do fornecimento de energia.

Princípios de operação

Vamos começar revendo o princípio de operação dos transformadores ideais, isto é, que não possuem perdas. Para isso, considere a Figura 3.23, que apresenta um transformador e seus enrolamentos, primário e secundário, que formam duas bobinas com N_1 e N_2 enrolamentos no primário e secundário, respectivamente.

Figura 3.23 | Transformador ideal com carga ligada nos terminais do lado secundário



Fonte: <https://lh4.googleusercontent.com/-G8DCRyOJL_w/VCYsRheDekI/AAAAAAAAABF8/KznTycq7K7o/s560/ideal_transformer.png>. Acesso em: 8 nov. 2016.

Quando alimentamos o enrolamento primário com uma fonte de tensão alternada (AC), uma corrente alternada percorrerá a bobina e criará um campo magnético \vec{H} igualmente alternado (conforme estudamos na Seção 3.1). Esse campo magnético, por sua vez, criará um fluxo magnético que atravessa o material do núcleo e será enlaçado pelas bobinas do enrolamento secundário, tornando-se um fluxo concatenado. A partir desse último temos a tensão induzida (força eletromotriz) no enrolamento secundário, calculado pela Lei de Faraday como:

$$E_2 = -\frac{d\lambda}{dt} = -N_2 \frac{d\phi}{dt}$$
, em que: λ é o fluxo concatenado (enlaçado pela bobina), calculado como o produto do número de enrolamentos pelo fluxo magnético ($\lambda = N_2\phi$).

Dessa forma, precisamos ter um fluxo magnético variante no tempo para termos tensão induzida. Isso pode ser obtido a partir de uma excitação AC, o que já foi explicado anteriormente, a partir de um movimento relativo entre um fluxo estacionário e um caminho fechado ou uma combinação de ambos. O sinal negativo da Lei de Faraday indica que a tensão induzida está em uma polaridade que produzirá uma corrente induzida em um determinado sentido que, por sua vez, criará um fluxo magnético oposto à variação do fluxo concatenado original (HAYT; BUCK, 2013). Essa afirmação, conhecida como **Lei de Lenz**, é uma das mais importantes leis do eletromagnetismo e é fundamental para o entendimento do princípio de funcionamento do transformador.

No caso de um transformador ideal, isto é, sem que se considerem as perdas, a relação de transformação (a) é usada para calcular a tensão ou corrente em seus enrolamentos, com base na equação:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = a = \frac{I_2}{I_1}.$$

Exemplicando

Vamos calcular a tensão induzida e a corrente no enrolamento secundário de um transformador monofásico de 10 kVA (Figura 3.22) quando o primário está conectado a uma fonte de 220 V. Considere $N_p = 100$ e $N_s = 10$.

Resolução: Com a relação de transformação, a tensão no secundário será dada por:

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s} \rightarrow V_s = V_p \frac{N_s}{N_p}.$$

Substituindo os valores, temos:

$$V_s = V_p \frac{N_s}{N_p} \rightarrow V_s = 220 \frac{10}{100} = 22V.$$

Como a tensão no secundário é menor do que a do primário, esse transformador é do tipo abaixador de tensão.

A corrente do primário é calculada a partir da equação da potência para circuitos monofásicos, $S = VI$. Isolando a corrente nessa equação, temos que a corrente no primário será:

$$S = VI \rightarrow I = \frac{S}{V} = \frac{10000}{220} = 45,45A.$$

Assim, usando a relação de transformação, podemos calcular a corrente no secundário:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} \rightarrow I_2 = I_1 \frac{N_1}{N_2} \rightarrow I_2 = 45,45 \frac{100}{10} = 454,5 \text{ A} .$$

Repare como a corrente no secundário é mais alta que a do primário. Vamos verificar as potências em ambos os lados:

- Potência no primário:

$$S_1 = V_1 I_1 \rightarrow S_1 = 220 \times 45,45 \rightarrow S_1 = 10 \text{ kVA} .$$

- Potência no secundário:

$$S_2 = V_2 I_2 \rightarrow S_2 = 22 \times 454,5 \rightarrow S_2 = 10 \text{ kVA} .$$

Apesar dos valores de tensão e corrente serem alterados pela relação de transformação, as potências de entrada e saída permanecem inalteradas.



Refleta

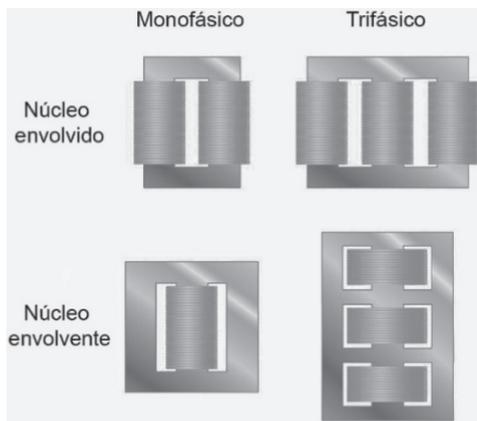
Uma vez que a potência de um transformador é constante, se diminuirmos a tensão do secundário em relação ao primário, a corrente de saída aumentará para manter a potência. Assim sendo, podemos usar fios de uma mesma bitola para ambos os enrolamentos?

Construção de transformadores

Os núcleos dos transformadores são construídos com base em materiais ferromagnéticos de alta permeabilidade, de modo que permitam a passagem do fluxo magnético mais facilmente (baixa relutância). Há dois tipos básicos de construção de transformadores: núcleo envolvente e núcleo envolvido, que indicam a forma como o enrolamento é feito em relação ao núcleo. No caso do transformador monofásico com núcleo envolvente, este possui três pernas com enrolamentos envolvendo a perna central. Por sua vez, no caso do transformador com núcleo envolvido, este é um único bloco de material ferromagnético com enrolamentos nas extremidades (CHAPMAN, 2013).

Transformadores de núcleo envolvido são mais fáceis de serem construídos do que os de núcleo envolvente. Este último, no entanto, é preferido em transformadores de altas tensões e altas potências. Ambos os tipos de construção são apresentados na Figura 3.24, juntamente com a construção de transformadores trifásicos.

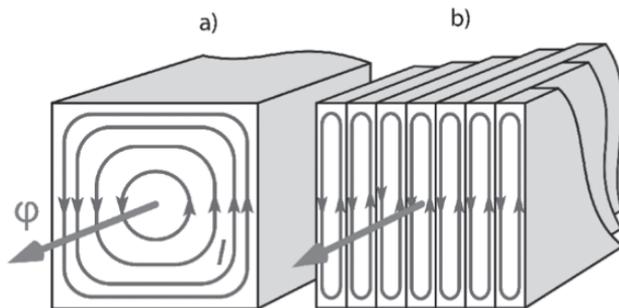
Figura 3.24 | Tipos de núcleos de transformadores monofásicos e trifásicos



Fonte: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/en/f/fe/Transformer_winding_formats.jpg>. Acesso em: 8 nov. 2016.

Os núcleos não são construídos como um bloco único. Na verdade, são compostos por associações de finas lâminas do material ferromagnético isoladas por papel isolante. Esse processo de laminação é necessário para diminuir as perdas por histerese e em razão da conhecida "corrente parasita de Foucault", que ocorre quando temos um fluxo magnético variante no tempo, gerando uma corrente elétrica que circula no interior do núcleo magnético, como observamos na Figura 3.25a. Com o núcleo laminado, a intensidade da corrente será reduzida (Figura 3.25b) e, conseqüentemente, serão também reduzidas as perdas associadas.

Figura 3.25 | Correntes parasitas de Foucault em a) núcleo feito com peça única e b) núcleo feito com lâminas de material ferromagnético



Fonte: adaptada de <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/e/ea/Laminated_core_eddy_currents_2.svg/310px-Laminated_core_eddy_currents_2.svg.png> Acesso em: 5 nov. 2016.

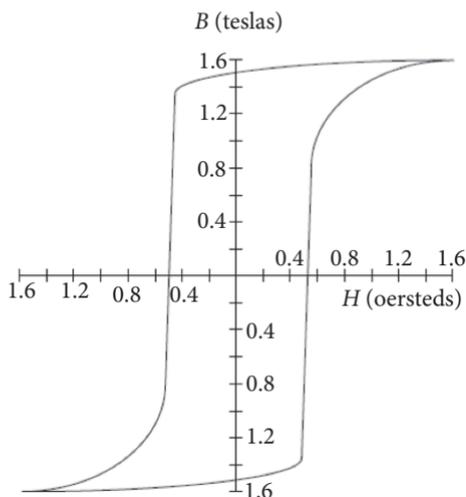
Dentre os materiais usados na construção do núcleo, as ligas de ferro-silício têm lugar de destaque por possuírem altas permeabilidades e baixas perdas por correntes de Foucault. O Quadro 3.4 apresenta algumas propriedades de interesse de algumas ligas de ferro. A Figura 3.26 apresenta a curva B-H típica de ligas de ferro-silício. Repare que a coercividade desse material é baixa, de forma que o classificamos como material magnético mole.

Quadro 3.4 | Características de algumas ligas de ferro

Nome do material	Composição	Permeabilidade inicial μ_r	Densidade de fluxo magnético de saturação B_s (T)	Temperatura de Curie ($^{\circ}\text{C}$)	Coercividade H_c (A/m)	Coercividade H_c (Oersted)
Ferro-silício (orientado)	3% Si + 97% Fe	1500	1,5 – 1,8	750	32 - 48	0,4 – 0,6
Supermalói	78% Ni + 17% Fe + 5% Mo	10000 – 50000	0,65 – 0,82	460	1,51 – 3,02	0,02 – 0,04
Permalói	79% Ni + 17% Fe + 4% Mo	12000 – 100000	0,66 – 0,82	460	0,24 – 0,64	0,003 – 0,008

Fonte: Mcllyman (2011, p. 32).

Figura 3.26 | Curva B-H para o aço silício



Fonte: Mclyman (2011, p. 34).



Pesquise mais

Além dos transformadores (de potência) que estudamos aqui, há outra classe fundamental para medições de tensão e corrente em sistemas de energia: os transformadores de instrumentos, dos quais os mais conhecidos são os transformadores de potencial e de corrente (TP e TC, respectivamente). Leia o capítulo 12 do livro:

SIMONE, G. A. Transformadores: teoria e exercícios. 1 ed. São Paulo: Érica, 2010. 336 p.

Sem medo de errar

Lembre-se de que, nesta unidade, você ocupa o lugar de um profissional que trabalha com produção de equipamentos de alta tensão. Você já verificou anteriormente quais tipos de materiais podem ser usados para construir o núcleo de um transformador, a partir de uma análise da permeabilidade magnética e das perdas por histerese, a fim de melhorar a eficiência do equipamento. Para finalizar esse projeto, você deve apresentar um relatório com o princípio de funcionamento do transformador e demais materiais

necessários para sua construção.

O princípio de funcionamento do transformador é a Lei de Faraday, que nos diz que teremos uma tensão induzida proporcional ao inverso da taxa de variação do fluxo concatenado. Matematicamente, temos que $E_s = -\frac{d\lambda}{dt} = -N_s \frac{d\phi}{dt}$, em que: λ é o fluxo concatenado (enlaçado pela bobina), calculado como o produto do número de enrolamentos pelo fluxo magnético ($\lambda = N_s \phi$). Portanto, não basta ter um campo magnético para o transformador funcionar, é necessário que este seja variante no tempo, algo que pode ser conseguido se alimentarmos o transformador com tensão alternada.

O núcleo do transformador é construído com material ferromagnético mole, de forma que se reduzam as perdas por histerese, visto que a área dentro de sua curva BH é menor do que a encontrada em materiais magnéticos duros. Ademais, o núcleo precisa ser feito com lâminas desse material para reduzir os efeitos das correntes parasitas de Foucault. Dessa forma, as perdas no núcleo serão reduzidas, melhorando a eficiência global do transformador.

Os enrolamentos são feitos normalmente com fios de cobre, que possui alta condutividade, separados por uma camada de papel isolante (para evitar curtos-circuitos nas bobinas). Apesar de ser um bom condutor, uma pequena resistência inerente ao cobre existirá e dissipará energia na forma de calor (efeito Joule), tanto no primário quanto no secundário. Portanto, ainda será necessário considerar as perdas nos enrolamentos de cobre para verificar a eficiência do equipamento.

Avançando na prática

Bancada de eletrônica

Descrição da situação-problema

Você trabalha em um laboratório de eletrônica cuja instalação elétrica é trifásica de 220 V. Você precisa alimentar equipamentos que funcionam em, no máximo, 22 V (CA). A potência máxima exigida é 100 VA. Qual é a relação de transformação necessária para você

trabalhar com esses equipamentos? Qual é o número necessário de enrolamentos no secundário se o primário tiver 100 voltas?

Resolução da situação-problema

Considerando um transformador ideal, isto é, que não apresenta perdas (no núcleo nem nos enrolamentos), podemos calcular a relação de transformação (a) como a relação entre as tensões do primário e do secundário, como segue:

$$\frac{V_1}{V_2} = a \rightarrow a = \frac{220}{22} = 10.$$

Podemos descrever essa relação de transformação como 220/22 V, sendo os valores apresentados as tensões do primário e secundário, respectivamente. Para calcular o número de enrolamentos no secundário, podemos usar a relação de transformação novamente, como segue:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \rightarrow N_2 = \frac{N_1}{a} \rightarrow N_2 = \frac{100}{10} \rightarrow N_2 = 10 \text{ voltas}.$$

Portanto, o transformador em questão deverá ter 10 voltas no secundário. Vamos agora calcular as correntes do primário e secundário desse transformador. A potência aparente (S) em circuitos de corrente alternada é calculada como $S = VI$. Assim, as correntes serão:

- Primário: $S = V_1 I_1 \rightarrow I_1 = \frac{S}{V_1} \rightarrow I_1 = \frac{100}{220} \rightarrow I_1 = 454,5 \text{ mA}.$
- Secundário: $S = V_2 I_2 \rightarrow I_2 = \frac{S}{V_2} \rightarrow I_2 = \frac{100}{22} \rightarrow I_2 = 4,545 \text{ A}.$

Assim, verificamos que a corrente no secundário é maior que a do primário para manter a potência constante que esse transformador pode fornecer para uma carga.

Faça valer a pena

1. Dentre os materiais utilizados na construção do núcleo dos transformadores estão os materiais magnéticos moles, usados principalmente pelas baixas perdas por histerese. Ademais, usamos óleo mineral para isolamento elétrica e refrigeração. Além do óleo, temos papel isolante entre os enrolamentos para evitar curto-circuito entre as bobinas. Transformadores são equipamentos que utilizam materiais magnéticos, dielétricos e condutores na sua construção. A respeito apenas dos materiais magnéticos, analise as afirmações seguintes:

I. O aço-silício é usado por possuir alta coercividade.

II. O núcleo é constituído de lâminas de material ferromagnético pois, dessa forma, conseguimos reduzir as perdas por correntes de Foucault.

III. Materiais de alta permeabilidade são usados por permitirem a passagem de altas densidades de fluxo magnético.

Assinale a alternativa que apresenta apenas as afirmações corretas.

a) I.

b) II.

c) I e II.

d) III.

e) II e III.

2. Transformadores são equipamentos que transmitem potência entre seus terminais (primário e secundário) fazendo a adequação dos níveis de tensão e corrente. Um transformador elevador é aquele no qual a tensão de saída (geralmente no secundário) é maior do que a do primário. Conseqüentemente, um transformador abaixador de tensão é aquele no qual a tensão de saída é menor do que a de entrada.

Um transformador ideal possui 500 enrolamentos no primário e 200 no secundário. Se alimentarmos o primário com uma fonte de tensão de 100 V, qual será a tensão induzida no secundário?

a) $V_s = 150V$.

b) $V_s = 100V$.

c) $V_s = 250V$.

d) $V_s = 40V$.

e) $V_s = 80V$.

3. Transformadores podem ser usados para adequação dos níveis de tensão em diversos equipamentos eletrônicos para seu correto funcionamento. Devemos conhecer o tipo de transformador (elevador, abaixador etc.) que precisaremos para cada aplicação.

Um transformador ideal possui 40 enrolamentos no primário e 300 no secundário. Se alimentarmos o primário com uma fonte de tensão de 20 V, qual será a tensão induzida no secundário? Esse transformador é do tipo elevador ou abaixador de tensão?

- a) $V_s = 150V$ e elevador de tensão.
- b) $V_s = 20V$ e abaixador de tensão
- c) $V_s = 80V$ e abaixador de tensão.
- d) $V_s = 250V$ e elevador de tensão.
- e) $V_s = 200V$ e elevador de tensão.

Referências

CALLISTER JR., W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma Introdução**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 2016.

CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de máquinas elétricas**. São Paulo: AMGH, 2013.

COEY, J. M. D. **Magnetism and magnetic materials**. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.

FURLANI, E. P. **Permanent magnet and electromechanical devices: materials, analysis, and applications**. New York: Academic Press, 2001.

HAYT Jr., W. H.; BUCK, J. A. **Eletromagnetismo**. 8. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

MCLYMAN, C. W. T. **Transformer and inductor design handbook**. New York: CRC Press, 2011.

NASAR, A. S. **Máquinas Elétricas**. São Paulo: McFraw Hill, 1995. (Coleção Schaum)

SIMONE, G. A. **Transformadores: teoria e exercícios**. São Paulo: Érica, 2010.

SMITH, W. F.; HASHEMI, J. **Fundamentos de engenharia e ciência dos materiais**. Porto Alegre: AMGH, 2013.

UMANS, S. D. **Máquinas elétricas**. São Paulo: AMGH, 2014.

Princípios de medidas elétricas

Convite ao estudo

Seja bem-vindo à última unidade da disciplina de Medidas e Materiais Elétricos. Já estudamos várias propriedades dos materiais, como as elétricas, dielétricas, magnéticas, mecânicas, térmicas, entre outras. Nesta unidade, mudaremos o foco e estudaremos os princípios básicos de medidas elétricas, vendo a importância destes para o seu desenvolvimento profissional. Medições de grandezas elétricas estão presentes nas mais diversas áreas de atuação de engenheiros e técnicos, desde medições de pequenos valores de tensão em circuitos eletrônicos até medições de energia elétrica em grandes consumidores industriais.

Compreendendo a relevância do tema, vamos conhecer como utilizar os instrumentos adequados para medição de grandezas elétricas. Na primeira seção, estudaremos os amperímetros e voltímetros para medições de correntes e tensões, respectivamente. Começaremos com os medidores analógicos, que usam um galvanômetro, e encerraremos com os medidores digitais. Na Seção 4.2, estudaremos as medições de sistemas de aterramento e, por fim, na Seção 4.3, estudaremos as medições de potências e energia elétrica.

Nesta unidade, você ocupará o lugar de um profissional que trabalha em uma indústria de papel e celulose. Solicitaram-lhe, então, que verificasse se as instalações elétricas do seu local de trabalho estão adequadas aos padrões exigidos pelas normas técnicas vigentes. A sua empresa o nomeou como o responsável por esse projeto. Você e sua equipe deverão gerar um relatório técnico que contenha medições de tensão e correntes elétricas em todos os circuitos da indústria, resistência da(s) malha(s) de aterramento, demanda de energia

consumida e fator de potência médio. Todas as medidas e conclusões deverão ser apresentadas na forma de um relatório técnico ao gestor da área.

Seção 4.1

Medidas elétricas em corrente contínua e alternada

Diálogo aberto

Nesta seção, aprenderemos as grandezas e unidades básicas de medidas elétricas, além do princípio de funcionamento de voltímetros e amperímetros. Por meio desses dois instrumentos, aprenderemos a fazer medições de tensões e correntes em circuitos elétricos e desenvolveremos os conhecimentos necessários para resolver o desafio proposto nesta seção.

Como engenheiro responsável pela equipe de medições em campo, a sua tarefa será de orientar e atestar se os valores de tensão e corrente medidos estão de acordo com as normas técnicas vigentes. Há dois critérios a serem verificados: o critério da queda de tensão e o da máxima corrente admissível nos condutores, de acordo com a norma ABNT NBR 5410 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004).

Você e sua equipe deverão medir as tensões em alguns pontos especificados pela indústria, a fim de verificar se elas estão de acordo com o critério da queda de tensão das normas técnicas vigentes. Além disso, as correntes em alguns circuitos também serão medidas com o objetivo de verificar se estão dentro das capacidades admissíveis dos condutores.

Não pode faltar

A medição de grandezas elétricas é fundamental no dia a dia do profissional que trabalha no setor industrial e de tecnologia. Além disso, o desenvolvimento tecnológico depende diretamente de avanços em medidas, as quais, por sua vez, precisam ser cada vez mais precisas e rápidas. Podemos (e devemos, sempre que possível) fazer simulações de circuitos elétricos e eletrônicos para verificar como estão se comportando e se estão dentro das especificações.

Entretanto, a medição em campo permanece necessária para comprovar o funcionamento de um circuito.

Grandezas e unidades elétricas

As unidades básicas que utilizamos são aquelas do chamado Sistema Internacional de Unidades (SI) e estão apresentadas no Quadro 4.1. As grandezas elétricas que utilizaremos nesta disciplina são derivadas daquelas padronizadas pelo SI.

Quadro 4.1 | Unidades fundamentais do Sistema Internacional de Unidades

Grandeza	Unidade	Símbolo
Comprimento	Metro	m
Massa	Quilograma	kg
Tempo	Segundo	s
Corrente elétrica	Ampère	A
Temperatura	Kelvin	K
Quantidade de matéria	Mol	mol
Intensidade luminosa	Candela	cd

Fonte: Balbinot e Brusamarello (2010).

Várias das grandezas apresentadas aqui já foram usadas no decorrer deste livro. Mesmo assim, vejamos as definições de algumas grandezas elétricas de destaque:

- Carga elétrica (Q): medida em **Coulomb (C)**, em homenagem ao físico francês Charles Augustin de Coulomb. A menor unidade de carga conhecida é o elétron, com $Q = -1,602 \times 10^{-19} \text{C}$.
- Corrente elétrica (I): é definida como o fluxo de portadores de carga elétrica, medido em coulomb (C), que atravessa um condutor durante um segundo. A unidade da corrente elétrica é, em homenagem ao físico francês André-Marie Ampère, o **Ampère (A)**, que mede a taxa de variação de carga no tempo,

$$I = \frac{dQ}{dt} \left[\frac{\text{C}}{\text{s}} \right].$$

- Potencial elétrico (ou tensão elétrica): medido em **Volts (V)**, é definido como a diferença de potencial entre dois pontos

em um condutor onde passa uma corrente constante de 1 A e dissipa uma potência de **1 watt (W)**.

- Resistência elétrica: medida em **Ohm (Ω)**, é definida como a resistência que permite a passagem de uma corrente de 1 A quando há uma diferença de potencial de 1 V entre seus terminais.



Pesquise mais

O desenvolvimento histórico das unidades de medida do SI data de 1799 e está intimamente ligado ao trabalho de diversos cientistas, como Gauss. Para maiores informações sobre este desenvolvimento leia o item 1.4 – Unidades de Medida do livro BALBINOT, A.; BRUSAMARELLO, V. J. Instrumentação e fundamentos de medidas. 2 ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2010. v.1 404 p.

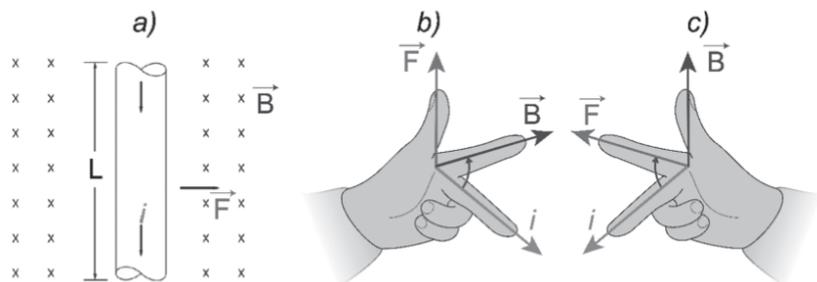
Introdução aos instrumentos de deflexão com ímãs permanentes

Este tipo de instrumento utiliza um ponteiro móvel sobre uma escala calibrada que serve para leitura da quantidade a ser medida. O fenômeno físico que permite esse movimento é a Lei da Força de Lorentz, que afirma que, se dentro de uma região com um campo magnético houver um condutor conduzindo corrente elétrica (Figura 4.1a), surgirá uma força de origem magnética nesse condutor dada por:

$$\vec{F} = i\vec{L} \times \vec{B} \rightarrow |\vec{F}| = BiL$$

Em que: F é a força exercida no condutor, B é a densidade de fluxo magnético na região de interesse, i é a corrente elétrica que passa pelo condutor de comprimento L (com o sentido igual ao da corrente). Os sentidos das variáveis são dados pela Figura 4.1 (b e c).

Figura 4.1 | a) Força em condutor conduzindo corrente. Regras da mão: b) esquerda e c) direita, indicando os sentidos da força, do campo magnético e da corrente



Fonte: a) adaptada de Chapman (p. 33, 2013); b) <goo.gl/dmyw44>; c) <<https://goo.gl/MyugAX>>. Acesso em: 16 jan. 2017.

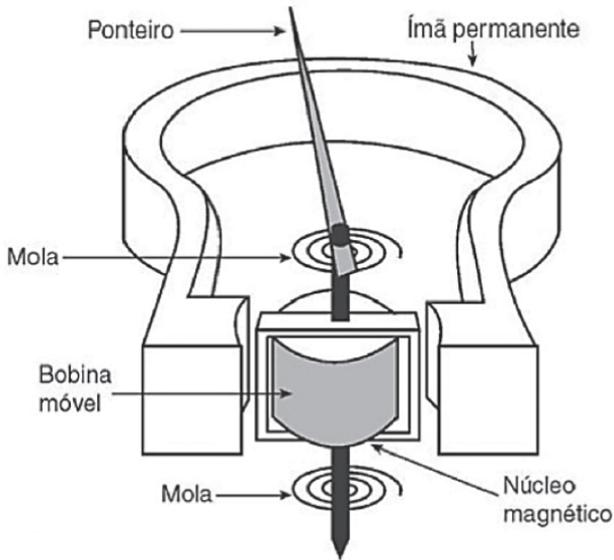
Para que esse movimento aconteça, três forças devem operar dentro desse sistema eletromecânico: força de deflexão, força de controle e força de amortecimento. A força de deflexão tem origem magnética e faz que o ponteiro saia da posição zero (repouso) quando uma corrente elétrica passa pelo enrolamento que, por sua vez, está em uma região com campo magnético produzido por um ímã permanente. A força de controle é desenvolvida por uma mola que mantém o ponteiro na posição zero, quando não há corrente passando pelo enrolamento. Quando uma corrente passa pelo enrolamento, a mola é contraída e a força exercida no ponteiro cresce. O ponteiro parará de andar quando as forças de deflexão e de controle forem iguais. Por fim, a força de amortecimento é resultado de correntes parasitas de Foucault que acabam por amortecer as oscilações do ponteiro (BELL, 1994).

Galvanômetros

Agora que já vimos os fundamentos de medição para os equipamentos eletromecânicos, temos condições de estudar os galvanômetros (Figura 4.2), que são equipamentos desenvolvidos para detectar correntes elétricas muito baixas. Eles são construídos da mesma maneira que os instrumentos de bobina móvel e ímã permanente e podem possuir uma escala centrada em zero, permitindo assim que ocorra deflexão do ponteiro para ambos os

lados, dependendo apenas do sentido do fluxo de corrente que atravessa a bobina. O ângulo de deflexão é diretamente proporcional à corrente que passa pelo enrolamento, isto é, quanto maior for a corrente, maior será a deflexão. Ademais, a escala do instrumento é linear (uniformemente dividida).

Figura 4.2 | Galvanômetro de bobina móvel



Fonte: Balbinot e Brusamarello (2010).

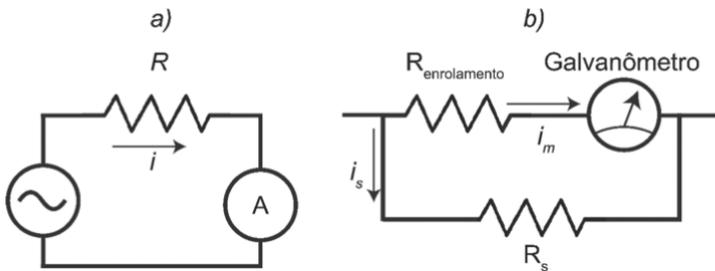
Apesar de os galvanômetros também poderem ser usados para medir tensões, esses equipamentos foram mais utilizados para detectar ausência de tensão e corrente (*null meter* ou *null detector*). Atualmente, medidores eletrônicos superaram em muito a utilização de galvanômetros graças à precisão superior com que conseguem medir tensões e correntes. Entretanto, os galvanômetros formam a base para a construção de amperímetros e voltímetros eletrodinâmicos, que estudaremos a seguir.

Amperímetros

Os amperímetros são instrumentos utilizados para medir correntes em circuitos elétricos. Inicialmente eram dispositivos eletromecânicos de ponteiro móvel, sendo este último responsável pela indicação da corrente em uma escala calibrada. Para utilizar o amperímetro, devemos inseri-lo em série com o circuito no qual desejamos medir a corrente (Figura 4.3a).

Os amperímetros analógicos são construídos usando-se os mesmos galvanômetros apresentados na Figura 4.2, com algumas observações: a deflexão máxima de um galvanômetro ocorre para correntes muito baixas (lembre-se de que ele é um instrumento usado para detectar baixas correntes). Assim sendo, seria possível fazer leituras apenas de baixas correntes, por causa desse baixo fundo de escala. Além disso, poderíamos causar danos físicos ao enrolamento quando da passagem de correntes mais altas. Para conseguirmos medir correntes mais altas, é necessário desviar parte da corrente que passaria pelo galvanômetro usando-se uma resistência *shunt* (R_s), isto é, em paralelo com o galvanômetro (conforme apresentado na Figura 4.3b). Note que, ao inserir a resistência R_s , a corrente do circuito é dividida em duas, I_s e I_m , que são as correntes que passam por R_s e pelo galvanômetro, respectivamente.

Figura 4.3 | a) Amperímetro em série para medição de corrente; b) Circuito do amperímetro



Fonte: a) elaborada pelo autor; b) Bell (1994).



Considere um amperímetro cuja resistência do enrolamento é 99Ω e a corrente de fundo de escala é 1 mA . Se uma resistência Shunt de 1Ω for ligada no circuito, determine a corrente que passa pelo amperímetro para as seguintes condições: a) fundo de escala; b) metade do fundo de escala e c) um quarto do fundo de escala.

(adaptado de BELL, 1994.)

Solução:

a) Em primeiro lugar, vamos verificar novamente o circuito do amperímetro (Figura 4.3). Sabemos que a tensão na resistência Shunt e no amperímetro são iguais, uma vez que estão em paralelo. Portanto, quando uma corrente de 1 mA passa pelo amperímetro, teremos que:

$$V_{amp} = I_{amp} R_{enrolamento} = 1 \times 10^{-3} \times 99 = 99 \text{ mV} .$$

Além disso, $V_{amperímetro} = V_s = I_s R_s$

A corrente que atravessa R_s é:

$$I_s = \frac{V_s}{R_s} = \frac{99 \times 10^{-3}}{1} = 99 \text{ mA} .$$

Portanto, a corrente total que será medida pelo amperímetro será: $I_{total} = I_{amp} + I_s = (1 + 99) \times 10^{-3} = 100 \text{ mA}$.

b) Para metade do fundo de escala:

$$V_{amp} = I_{amp} R_{enrolamento} = 0,5 \times 10^{-3} \times 99 = 49,5 \text{ mV} .$$

A corrente que atravessa R_s é:

$$I_s = \frac{V_s}{R_s} = \frac{49,5 \times 10^{-3}}{1} = 49,5 \text{ mA} .$$

Portanto, a corrente total que será medida pelo amperímetro será: $I_{total} = I_{amp} + I_s = (0,5 + 49,5) \times 10^{-3} = 50 \text{ mA}$.

c) Para um quarto do fundo de escala

$$V_{amp} = I_{amp} R_{enrolamento} = 0,25 \times 10^{-3} \times 99 = 24,75 \text{ mV} .$$

A corrente que atravessa R_s é:

$$I_s = \frac{V_s}{R_s} = \frac{24,75 \times 10^{-3}}{1} = 24,75 \text{ mA}$$

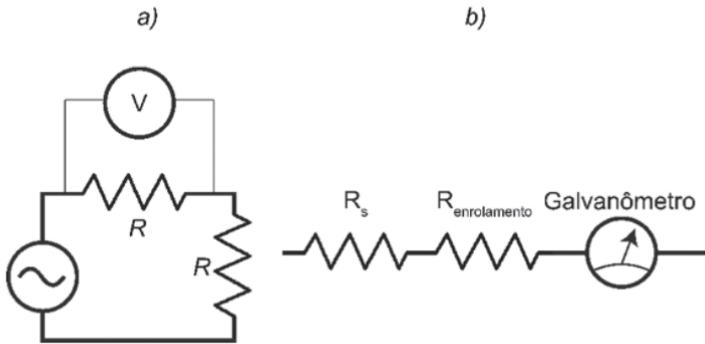
Portanto, a corrente total que será medida pelo amperímetro será: $I_{total} = I_{amp} + I_s = (0,25 + 24,75) \times 10^{-3} = 25 \text{ mA}$.

Note que, quando a corrente que passa pelo amperímetro é a corrente de fundo de escala (no nosso exemplo, de 1 mA), a corrente total na verdade é 100 mA. Quando a corrente que passa pelo amperímetro for metade da corrente de fundo de escala (no nosso exemplo, de 0,5 mA), a corrente total será na verdade de 50 mA, ou seja, metade do valor total anterior. Com este exemplo, podemos verificar a linearidade da escala de medidas do amperímetro. Para que a leitura seja correta, portanto, a escala deverá estar calibrada e apresentar valores de 0 até 100 mA (em vez de 0 até 1 mA).

Voltímetros

Os voltímetros são instrumentos utilizados para medir tensões (ou diferença de potencial) em circuitos elétricos. Para utilizar o voltímetro, este deve ser colocado em paralelo com o elemento do circuito cuja tensão desejamos medir (Figura 4.4a). Conforme verificamos anteriormente, a deflexão de ponteiros de bobina móvel e ímã permanente é diretamente proporcional à corrente que passa pelo enrolamento. Essa corrente, por sua vez, é proporcional à tensão entre os terminais do enrolamento. Assim, podemos utilizar um galvanômetro com escala calibrada para medir tensões como um voltímetro. De maneira análoga ao caso do amperímetro, é necessário haver uma resistência em série com o galvanômetro, denominada resistência de multiplicação (Figura 4.4b), para aumentar a escala de leitura do voltímetro.

Figura 4.4 | a) Voltímetro em paralelo com resistência para medição de tensão; b) Circuito do voltmímetro



Fonte: a) elaborada pelo autor; b) Bell (1994).



Assimile

Amperímetros devem ser ligados em série com o circuito cuja corrente desejamos medir, ao passo que os voltmímetro devem ser ligados em paralelo com o elemento cuja tensão desejamos conhecer.



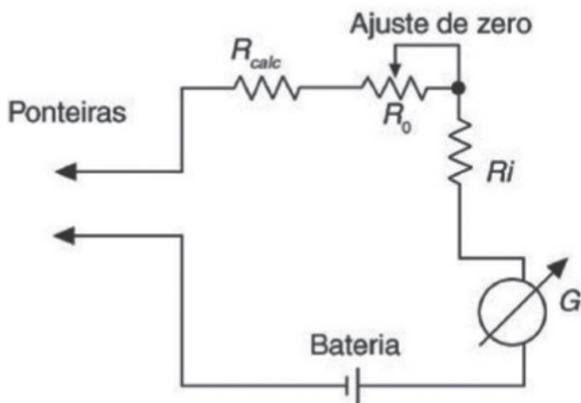
Refleta

O que aconteceria se invertêssemos a forma de ligação do voltmímetro com o amperímetro?

Ohmímetros

Um ohmímetro é um instrumento usado para medir resistências elétricas. Em seu interior, há uma bateria que produzirá uma corrente no circuito de medição quando os terminais do equipamento forem fechados, seja por meio de curto-circuito, seja por meio de um elemento (um resistor, por exemplo), como visto no esquema da Figura 4.5. A resistência para ajuste de zero é necessária em ohmímetros por conta da variação da tensão da bateria com o tempo (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2010).

Figura 4.5 | Esquema simplificado de um ohmímetro



Fonte: Balbinot e Brusamarello (2010).

Os ohmímetros devem ser ligados diretamente ao elemento cuja resistência deve ser medida sem nenhuma outra fonte de tensão, visto que o próprio instrumento gera a corrente necessária para a medição. Portanto, se for preciso medir a resistência de um resistor que está ligado em um circuito, será necessário desconectá-lo do circuito para que se realize a medida correta. Caso contrário, a leitura será da resistência equivalente vista a partir dos terminais do ohmímetro.

Medidores digitais – multímetros

Os medidores usados na indústria atualmente são, em sua grande maioria, digitais. Em vez de um medidor para fazer apenas um único tipo de medida, como no caso dos amperímetros e voltímetros analógicos, os multímetros são comumente encontrados em praticamente todas as empresas que necessitam de medições elétricas no cotidiano. O multímetro permite medições de correntes e tensões, tanto contínuas e alternadas, resistência, temperatura, continuidade, entre outras. A Figura 4.6 apresenta um multímetro digital comercial.

Figura 4.6 | Multímetro digital



Fonte: <https://c1.staticflickr.com/9/8143/7481765448_1b47acea75_b.jpg>. Acesso em: 13 dez. 2016.

Para medições de correntes, temos disponível o amperímetro alicate (*clamp*). Esse equipamento possui grande importância prática na indústria, pois não há necessidade de inserir o circuito em série com o amperímetro, o que acarretaria, por exemplo, desligamentos de máquinas e interrupção da cadeia de produção. Em vez de inserir o amperímetro em série, o condutor no qual desejamos medir a corrente deve ser enlaçado pelo medidor, conforme Figura 4.7. O princípio de funcionamento desse instrumento é similar ao transformador para medições de correntes CA, no qual o condutor envolvido age como primário, induzindo uma corrente no circuito do gancho (equivalente ao secundário). Por sua vez, no caso das correntes CC, o amperímetro alicate utiliza sensores de efeito Hall.

Figura 4.7 | Amperímetro alicate (*clamp*)



Fonte: <http://www.jmtestsystems.com/pictures/5174-Ap-amp-330_06b_c.jpg>. Acesso em: 11 dez. 2016.



Refleta

Instrumentos de medição digitais tornaram-se muito mais presentes do que os eletrodinâmicos estudados nesta seção. Dentre as várias razões dessa mudança, temos o aumento na precisão como uma das mais importantes vantagens dos instrumentos digitais em relação aos analógicos.

Sem medo de errar

Lembre-se de que você trabalha em uma indústria de papel e celulose e de que lhe solicitaram que verificasse se as instalações elétricas estavam adequadas aos padrões exigidos pelas normas técnicas vigentes. A sua empresa, nesse caso, o nomeou como o responsável por esse projeto. Você e sua equipe deveriam gerar um relatório técnico contendo medições de tensão e correntes elétricas em todos os circuitos da indústria e começar a redigir o relatório técnico ao gestor da área.

Como líder da equipe, você escolheu os instrumentos adequados para medição de tensões e correntes, isto é, voltímetros e amperímetros, e os equipamentos de proteção individual e coletivo (EPIs e EPCs, respectivamente). A sua equipe mediu tensões e correntes em 6 pontos diferentes de um determinado circuito elétrico, o que resultou no relatório de medidas apresentado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1| Resumo das medições de tensão e corrente

Ponto	Local	Tensão (V)	Porcentagem de queda de tensão (padrão 220 V)	Corrente (A)	Capacidade máxima do condutor (A)
1	Tomadas escritório 1	215	2,27	0,47	9
2	Tomadas escritório 2	214	2,73	0,47	9
3	Tomadas escritório 3	217	1,36	0,46	9
4	Motor do elevador	213	3,18	17,50	17
5	Motor do portão	212	3,64	3,00	10

Fonte: elaborada pelo autor.

Após analisar os resultados dessas medições, você verificou que, em todos os pontos em questão, a tensão respeita o critério da queda de tensão, pois foi menor do que 5%. No caso das correntes, deve-se prestar atenção ao condutor do motor do elevador, visto que a corrente que passa por ele é maior do que o valor máximo suportado pelo condutor, indicando que este deverá ser trocado.

Finalmente, os resultados das medições e as conclusões que você obteve deverão ser compilados em um relatório técnico para o gestor da sua área.

Laudo técnico

Descrição da situação-problema

Um estabelecimento comercial tem tido problemas com a sua instalação elétrica e alguns equipamentos, como motores de elevador, que não estão funcionando corretamente. Para resolver esse problema, a sua empresa foi contratada para fazer um novo laudo técnico para esse estabelecimento, no qual você fará medições de tensão e corrente em todo circuito que possui motores, a fim de verificar se há alguma anomalia no circuito.

Resolução da situação-problema

A sua equipe levantou as medidas apresentadas na Tabela 4.2, com base na qual você verificou que a tensão de alimentação do motor do elevador 1 está muito baixa, pois há uma queda de tensão de 9%, valor superior ao estipulado pelas normas técnicas. Assim, você conclui o laudo dizendo que há necessidade de substituição dos condutores de alimentação do motor do elevador.

Tabela 4.2 | Resumo das medições nos motores dos elevadores

Local	Tensão (V)	Porcentagem de queda	Corrente (A)	Capacidade máxima do condutor (A)
Motor do elevador 1	200	9,09	17,00	20
Motor do elevador 2	212	3,64	15,00	17

Fonte: elaborada pelo autor

Faça valer a pena

1. As unidades básicas (ou fundamentais) são aquelas do chamado Sistema Internacional de Unidades (SI), que procura estabelecer um padrão para as unidades de grandezas físicas. As unidades derivadas são calculadas a partir das unidades básicas.

Quais das unidades elétricas seguintes fazem parte das unidades fundamentais do SI?

- a) Ampère.
- b) Volt.
- c) Ohm.
- d) Tesla.
- e) Coulomb.

2. Amperímetros são instrumentos de medição destinados a medir correntes elétricas em circuitos elétricos. Os amperímetros eletrodinâmicos são construídos a partir de galvanômetros que utilizam a deflexão de um ponteiro para indicar, em uma escala calibrada, qual é a corrente no circuito. Assinale a alternativa correta sobre os amperímetros eletrodinâmicos.

- a) Possuem escala não linear.
- b) Podem ser utilizados para medir ausência de tensão.
- c) Não suportam grandes correntes, pois podem danificar seu enrolamento e atingir o fundo de escala rapidamente.
- d) Suportam grandes correntes sem danificar seu enrolamento nem atingir o fundo de escala rapidamente.
- e) Não podem ser usados para medir correntes alternadas.

3. Voltímetros são instrumentos usados para medir tensões em circuitos elétricos/eletrônicos. Os modelos analógicos são construídos a partir de galvanômetros, que possuem uma resistência de enrolamento em série com uma resistência que deve ser alta para evitar erros de medição.

Considere um voltímetro cuja resistência do enrolamento é $1\text{ k}\Omega$ e a corrente de fundo de escala é $100\ \mu\text{A}$. Determine a resistência multiplicadora que deve ser ligada em série para que esse voltímetro possa medir 50 V (fundo de escala) e a tensão aplicada no instrumento para quando este indicar metade do fundo de escala ($V_{0,5}$) e um quarto do fundo de escala ($V_{0,25}$).

Escolha a alternativa que apresenta as respostas corretas na sequência (R_s , $V_{0,5}$ e $V_{0,25}$).

- a) $249\text{ k}\Omega$, $12,5\text{ V}$ e $12,5\text{ V}$.
- b) $499\text{ k}\Omega$, 25 V e $12,5\text{ V}$.

- c) $550\text{ k}\Omega$, 20 V e 25 V .
- d) $890\text{ k}\Omega$, 50 V e 25 V .
- e) $607\text{ k}\Omega$, 25 V e $12,5\text{ V}$.

Seção 4.2

Aterramentos

Diálogo aberto

Seja bem-vindo à segunda seção da última unidade da disciplina de Medidas e Materiais Elétricos, na qual estamos estudando os princípios básicos de medidas elétricas e vendo sua importância para o seu desenvolvimento profissional. Já estudamos as medições básicas de corrente e tensão elétricas, usando amperímetros e voltímetros, respectivamente. Vamos avançar agora para o estudo da medição de resistência de aterramento.

O aterramento é parte fundamental de toda instalação elétrica, desde residências (que são alimentadas em baixa tensão) até subestações (alimentadas em alta tensão), visto que é importante para o correto funcionamento de equipamentos elétricos. Além disso, o aterramento protagoniza um papel importante no quesito segurança em instalações e serviços que envolvam eletricidade, sendo bastante explorado em cursos de segurança do trabalho (pela Norma Reguladora 10 – NR 10) e necessário para todos os profissionais dessa área. Vamos estudar nesta seção como fazer medições da resistência de um sistema de aterramento e da resistividade do solo.

Nesta unidade, você ocupa o lugar de um profissional que trabalha em uma indústria de papel e celulose. Nesse contexto, solicitaram-lhe que verificasse se as instalações elétricas do seu local de trabalho estão adequadas aos padrões exigidos pelas normas técnicas vigentes. A sua empresa o nomeou, então, como o responsável por esse projeto. Você e sua equipe deverão gerar um relatório técnico que contenha medições de tensão e correntes elétricas em todos os circuitos da indústria, resistência da(s) malha(s) de aterramento, demanda de energia consumida e fator de potência médio. Vocês já verificaram as tensões e correntes nos circuitos e devem, agora, usar os conhecimentos adquiridos nesta seção

para atestar a condição do aterramento dessa indústria. Todas as medidas e conclusões deverão ser apresentadas na forma de um relatório técnico ao gestor da área.

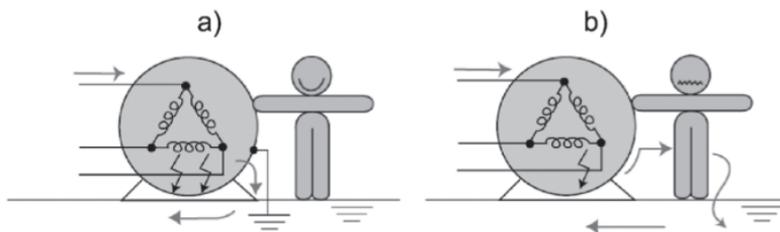
Não pode faltar

Os aterramentos elétricos são de fundamental importância para o funcionamento correto de equipamentos do Sistema Elétrico de Potência (SEP), além de ser necessário para colaborar com a segurança de trabalhadores envolvidos com eletricidade. De acordo com Kindermann e Campagnolo (1995), os principais objetivos de um sistema de aterramento são:

- Obter a menor resistência de aterramento possível para correntes de falta (ou curto-circuito) para terra.
- Manter as tensões produzidas pelas correntes de falta dentro de padrões de segurança pessoal.
- Fazer que equipamentos de proteção sejam mais sensíveis às faltas e isolem essas ocorrências à terra mais rapidamente.
- Proporcionar um caminho para as correntes advindas de descargas atmosféricas e escoar as cargas estáticas geradas nas carcaças de equipamentos elétricos (por exemplo, motores e transformadores).

No que tange à segurança, o aterramento ajuda a proteger contra contatos indiretos, isto é, contatos acidentais com alguma parte energizada, submetendo o indivíduo a uma diferença de potencial. Nessa situação, o corpo desse indivíduo será o caminho condutor para a terra, isto é, ele receberá um choque elétrico. Deve ser feito, por exemplo, o aterramento das carcaças de motores e transformadores para evitar o choque elétrico quando do contato com esta (Figura 4.8a), que pode apresentar potencial elétrico não nulo caso ocorra uma falha na isolação, conforme apresentado na Figura 4.8b.

Figura 4.8 | a) Com aterramento, a corrente não passará pelo corpo; b) Sem aterramento, o corpo humano é o único caminho para a terra



Fonte: adaptada de Moreno e Costa (1999, p. 4).

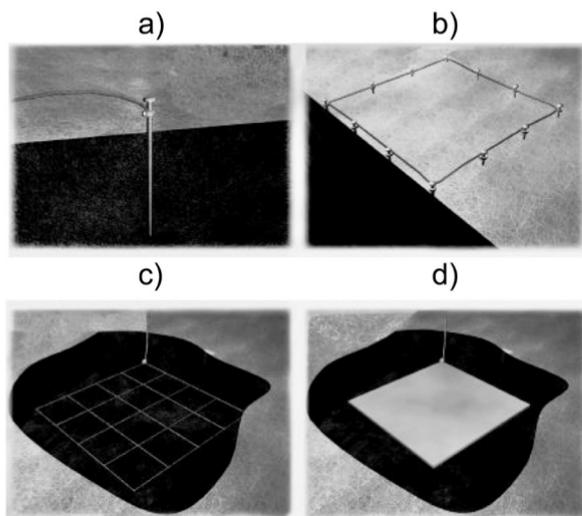


Assimile

O aterramento é necessário tanto para o funcionamento correto de equipamentos elétricos quanto para proteção de seres humanos e animais.

Os principais componentes de um aterramento são: eletrodos (ou hastes) para fazer contato com o solo, sendo normalmente de aço galvanizado ou cobreado; condutor de aterramento; conexões e condutor de proteção, usado para ligar as carcaças dos equipamentos ao aterramento (MAMEDE FILHO, 2010). Dentre os principais tipos de sistemas de aterramento temos: haste simples cravada no solo (muito comum em instalações elétricas residenciais); hastes em paralelo; malha de aterramento; e placa de material condutor enterrada no solo. Esses tipos estão representados esquematicamente na Figura 4.9 (a, b, c, e d, respectivamente).

Figura 4.9 | Componentes básicos do aterramento



Fonte: LEM (2017).



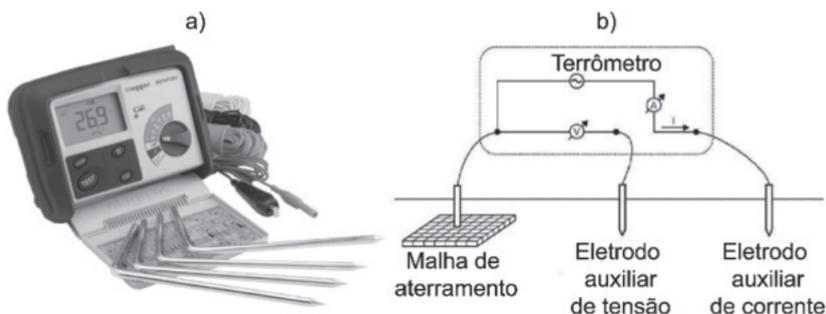
Pesquise mais

O projeto de sistemas de aterramento é vasto e fora do escopo deste curso. Assim sendo, vamos nos ater apenas aos métodos de medição de resistência de aterramento e resistividade do solo. Leia mais sobre o aterramento em instalações elétricas industriais no Capítulo 11 do livro MAMEDE FILHO, J. Instalações elétricas industriais. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017. 980 p.

A norma NBR 15749 (ABNT, 2009) apresenta os procedimentos padronizados para medição da resistência de aterramento, a partir do método do potencial, que estudaremos a seguir, utilizando um equipamento chamado terrômetro. Esse equipamento possui duas bobinas entrelaçadas que funcionam como um amperímetro e um voltímetro e uma escala calibrada em ohms para indicação da resistência. Os terrômetros normalmente possuem quatro terminais: dois de corrente (C_1 e C_2) e dois de potencial (P_1 e P_2). A Figura 4.10a apresenta um terrômetro digital e as hastes que o acompanham. Para medir a resistência de aterramento, uma corrente elétrica é injetada no sistema de aterramento de interesse por meio do eletrodo auxiliar

de corrente, e a tensão entre a malha de aterramento e o terra de referência é medida por meio de um eletrodo auxiliar de potencial, conforme Figura 4.10b. A resistência é calculada aplicando a Lei de Ohm com os valores medidos.

Figura 4.10 | a) Terrômetro digital; b) Circuito medição de resistência de aterramento

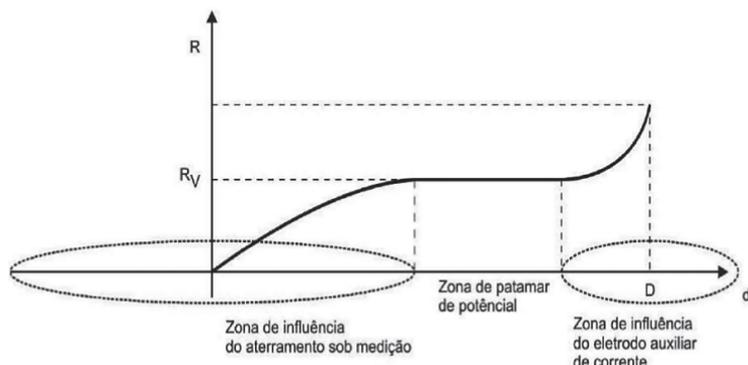


Fonte: a) <<http://jmttestsystems.com/pictures/4984-DET4TCR2.jpg>>. Acesso em: 25 jan. 2017; b) NBR 15749 (ABNT, 2009).

Há vários métodos para medição de resistência de aterramento, um dos quais consiste em deslocar o eletrodo de potencial ao longo do eixo definido entre a malha de aterramento (sob ensaio) e o eletrodo auxiliar de corrente, em intervalos de 5% da distância entre os dois pontos anteriores (ABNT, 2009). Para cada posição, uma leitura de resistência deve ser feita de forma a obtermos a curva de resistência em função da distância (Figura 4.11). A curva característica de aterramento possui três regiões distintas: a de influência do aterramento sob medição; a de patamar; e a de influência do eletrodo auxiliar de corrente. A primeira e a última ocorrem quando o eletrodo de potencial está próximo da malha de aterramento e do eletrodo de corrente, respectivamente. A região de patamar ocorre, portanto, quando não há nenhuma das influências supracitadas. Ademais, o valor da resistência do aterramento sob medição é medido nesta faixa. Se o equipamento usado for um terrômetro analógico, com amperímetro e voltímetro, o valor da resistência será

$$R_{\text{aterramento}} = \frac{V_{\text{patamar}}}{I}$$

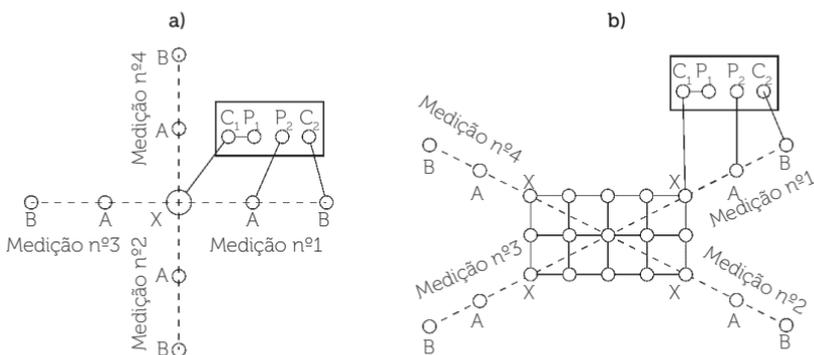
Figura 4.11 | Curva característica de aterramento



Fonte: NBR 15749 (ABNT, 2009).

A localização dos eletrodos de potencial e corrente variam de acordo com o tipo do sistema de aterramento. Em aterramentos com haste simples cravada no solo e malha de aterramento, serão feitas medições nos sentidos indicados na Figura 4.12 (a e b, respectivamente). Entretanto, vale ressaltar que essas direções dependem da geometria do sistema de aterramento, em especial no caso da malha. Por fim, os condutores de ligação dos eletrodos possuem uma resistência que deve ser considerada para evitar medidas incorretas.

Figura 4.12 | Localização dos eletrodos de potencial e corrente para medição da resistência de aterramento em: a) sistema com haste simples cravada no solo; b) malha de aterramento



Fonte: Medeiros Filho (p. 283 e p. 286, 1986).

Existem ainda algumas regras práticas para medição de resistência de aterramentos como inserir o eletrodo de potencial a 62% da distância entre o eletrodo de corrente e a referência, pois, dessa forma, estaremos na zona de patamar. Contudo, isto pode não ser verdade, recomendando-se deslocar o eletrodo de potencial de 3 m nas duas direções e verificar se os valores medidos de resistência estão próximos, tomando 10% como desvio máximo. Caso essa condição seja verdadeira, podemos considerar que realmente estamos na zona de patamar (MEDEIROS FILHO, 1986). É desejável que o aterramento tenha a menor resistência possível. Um padrão comum entre os profissionais é que a resistência de aterramento seja menor que 10Ω , quando o solo está úmido, e de 25Ω quando este está seco. Para valores acima destes, alguma medida para reduzir a resistência deve ser tomada, desde tratamento químico do solo até aumento do número de hastes de aterramento.



Exemplificando

Você fez uma série de medições de resistência de aterramento de uma malha de subestação de 50 m x 80 m, apresentados na Tabela 4.3. Qual é a resistência desse aterramento?

Tabela 4.3 | Medições realizadas em campo de resistividade do solo.

Ordem das medições	Distância (m)		Resistência do condutor (Ω)	Valor medido pelo terrômetro (Ω)	Resistência do aterramento (Ω)
	\overline{XA}	\overline{XB}			
1	40	80	0,149	6,12	5,971
2	43	80	0,155	7,25	7,095
3	37	80	0,135	5,35	5,215
4	80	160	0,298	5,67	5,372
5	120	240	0,596	5,91	5,314

Fonte: elaborada pelo autor.

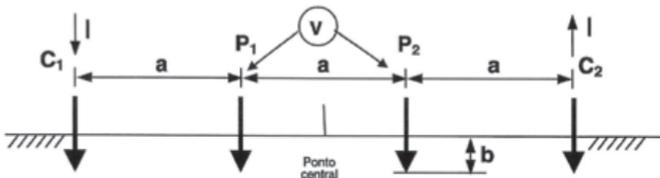
Analisando os dados da Tabela 4.3, verificamos que as medições 2 e 3 foram feitas para verificar se o eletrodo de potencial, cravado a 40 m da malha, estava localizado no patamar. Como os valores medidos pelo terrômetro possuem desvio maior que 10%, concluímos que essa medição foi feita fora do patamar e será, portanto, desconsiderada. Assim, restam

apenas as medições 4 e 5 para calcularmos a resistência de aterramento a partir da média aritmética delas:

$$R_{\text{aterramento}} = \frac{R_4 + R_5}{2} \rightarrow R_{\text{aterramento}} = \frac{5,67 + 5,91}{2} \rightarrow R_{\text{aterramento}} = 5,79 \Omega$$

Para desenvolvermos um bom projeto de aterramento, é necessário conhecer o solo onde esse projeto será executado. Dentre as informações necessárias, damos destaque à resistividade do solo, parâmetro que está intimamente ligado com a resistência do sistema de aterramento. Vamos estudar um método de medição de resistividade de solo conhecido como método (ou Arranjo) de Wenner, aceito mundialmente por apresentar resultados satisfatórios e ser de fácil aplicação. A NBR 7117 (ABNT, 2012) recomenda que os eletrodos de aterramento sejam igualmente espaçados por uma distância (a) e enterrados a uma profundidade (b), conforme Figura 4.13.

Figura 4.13 | Arranjo de Wenner



Fonte: NBR 7117 (ABNT, 2012).

A resistividade pode ser calculada em função dessas distâncias a partir de uma das seguintes equações:

$$\rho = \frac{4\pi a \frac{V}{I}}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{2a}{\sqrt{4a^2 + 4b^2}}} \rightarrow \rho = \frac{4\pi a R_{\text{aterramento}}}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{2a}{\sqrt{4a^2 + 4b^2}}}$$

Em que: a é a distância (em metros) entre os eletrodos, b é a profundidade (em metros) dos eletrodos enterrados, e V e I são os valores de tensão e corrente medidos pelo terrômetro, respectivamente. Normalmente são usados quatro eletrodos alinhados

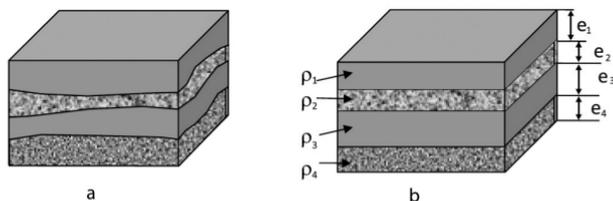
em intervalos regulares e enterrados a uma distância inferior a 0,1 a ($b < a$), condição na qual podemos simplificar a equação da resistividade média do solo, chegando à seguinte equação (fórmula simplificada de Palmer):

$$\rho = 2\pi a \frac{V}{I} \rightarrow \rho = 2\pi a R_{\text{aterramento}}$$

Os eletrodos devem ser cravados, aproximadamente, a uma profundidade de 20 cm ou até que apresentem resistência mecânica consistente, de forma a apresentarem resistência de contato aceitável. Além disso, os eletrodos devem estar sempre alinhados, equidistantes, e o espaçamento entre estes deve variar entre 2, 4, 8, 16 e 32 m, e pelo menos uma medida de resistividade deve ser feita para cada uma. A resistividade média deve ser calculada a partir da média aritmética das medições de resistividade para cada espaçamento. Se o desvio padrão observado em uma medida for superior a 50%, a resistividade média deverá ser calculada sem considerar essa medida (MAMEDE FILHO, 2010). Outras recomendações podem ser encontradas nas normas técnicas vigentes.

A resistividade do solo depende de vários parâmetros, como composição química, umidade e temperatura. Além da composição química, o solo não é uniforme, mas sim composto por camadas de resistividade, profundidade e formações geológicas distintas (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995), conforme a Figura 4.14. Essa estratificação do solo deve ser considerada para ver quais são as camadas de materiais que constituem o solo de um determinado lugar. A modelagem matemática desse tipo de solo foge ao escopo deste curso.

Figura 4.14 | Solo estratificado com camadas de resistividade (ρ) e profundidade (e): a) não uniformes; e b) uniformes



Fonte: NBR 7117 (ABNT, 2012).



Podemos fazer a medição de resistência de aterramento em qualquer período do ano? Sabendo que a umidade do solo influencia na resistência, qual é o período recomendado para realizar as medições de resistência de aterramento e resistividade do solo?

Sem medo de errar

Uma vez que você trabalha em uma indústria de papel e celulose, solicitaram-lhe que verificasse se as instalações elétricas de seu local de trabalho estão adequadas aos padrões exigidos pelas normas técnicas vigentes. A sua empresa, então, nomeou você como o responsável por esse projeto. Você e sua equipe deverão verificar se a resistência da malha de terra da indústria está adequada. Esse resultado fará parte do relatório técnico que será entregue ao gestor da área.

Como líder, você solicitou que a sua equipe preparasse um terrômetro para a medição e também os equipamentos de proteção individual e coletivo (EPIs e EPCs, respectivamente). Usando o método estudado nesta seção, a sua equipe fixou o eletrodo auxiliar de corrente 10 m distante do eletrodo conectado à malha de terra, e percorreu a reta formada entre esses dois com o eletrodo auxiliar de potencial. Foram medidas tensões para cada 50 cm (5% da distância de separação entre a malha e o eletrodo auxiliar de corrente). Os resultados estão apresentados na Tabela 4.4.

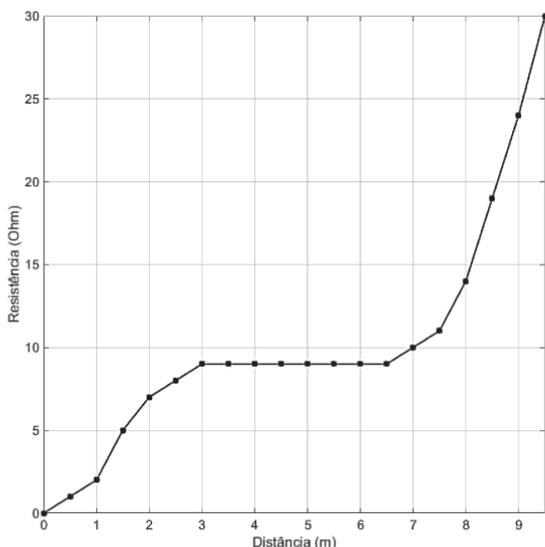
Tabela 4.4 | Resultados da medição de resistência de aterramento

Distância (m)	Tensão (V)	Corrente (A)	Resistência (Ω)
0	0	1	0
0,5	1	1	1
1	2	1	2
1,5	5	1	5
2	7	1	7
2,5	8	1	8
3	9	1	9
3,5	9	1	9
4	9	1	9
4,5	9	1	9
5	9	1	9
5,5	9	1	9
6	9	1	9
6,5	9	1	9
7	10	1	10
7,5	11	1	11
8	14	1	14
8,5	19	1	19
9	24	1	24
9,5	30	1	30

Fonte: elaborada pelo autor.

Analisando os resultados dessa medição, você percebe que o patamar apresenta 9 Ω de resistência, ou seja, esse aterramento possui resistência de 9 Ω , valor dentro do estabelecido pelas normas técnicas vigentes. A Figura 4.15 apresenta a curva de resistência pela distância para esse aterramento.

Figura 4.15 | Curva de resistência pela distância para aterramento sob medida



Fonte: elaborada pelo autor.

! Atenção

As condições ambientais, como temperatura e umidade, devem fazer parte do relatório, visto que a resistividade do solo e a resistência de aterramento dependem desses parâmetros, dentre outros. Por exemplo, em locais onde há uma grande oscilação entre as temperaturas mínimas e máximas, haverá também uma maior oscilação entre os valores medidos de resistência de aterramento em cada uma delas.

Avançando na prática

Medição de resistividade do solo

Descrição da situação-problema

Você, responsável pela manutenção elétrica de uma indústria, responsabilizou-se pela medição da resistividade do solo para verificar

se houve variações significativas em relação ao valor de projeto. As medições realizadas estão apresentadas na Tabela 4.5. Calcule a resistividade média desse solo.

Tabela 4.5 | Medições realizadas em campo de resistividade do solo

Espaçamento (m)	Resistividade elétrica medida ($\Omega \cdot m$)				
	1	2	3	4	5
2	305	320	400	267	365
4	425	390	380	712	430
8	500	510	700	652	490
16	600	580	543	556	521
32	750	800	672	300	740

Fonte: elaborada pelo autor.

Resolução da situação-problema

A partir das medidas em campo, precisamos calcular a resistividade média e o desvio padrão para cada espaçamento. Ambos os resultados são apresentados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 | Desvio padrão e resistividade média

Espaçamento (m)	Desvio padrão relativo (%)					Resistividade média ($\Omega \cdot m$)
	1	2	3	4	5	
2	7,97	3,44	20,70	19,43	10,14	331,4
4	9,07	16,56	18,70	52,33	8,00	467,4
8	12,34	10,59	22,72	14,31	14,10	570,4
16	7,14	3,57	3,04	0,71	6,96	560
32	14,96	22,62	3,00	54,02	13,43	652,4

Fonte: elaborada pelo autor.

Duas medidas estão em destaque na Tabela 4.6, pois seus desvios padrões foram maiores que 50%. Essas duas medidas serão, portanto, desconsideradas no cálculo da resistividade média. As novas resistividades, chamadas de recalculadas, são apresentadas na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 | Resistividade média e resistividade recalculada

Resistividade média ($\Omega \cdot m$)	Resistividade recalculada ($\Omega \cdot m$)
331,4	331,4
467,4	406,25
570,4	570,4
560	560
652,4	740,5

Fonte: elaborada pelo autor.

Faça valer a pena

1. Os aterramentos elétricos são de fundamental importância para o funcionamento correto de equipamentos do Sistema Elétrico de Potência (SEP), além de serem necessários para colaborar com a segurança de trabalhadores envolvidos com eletricidade.

Avalie as afirmações seguintes sobre os objetivos dos sistemas de aterramento:

I. Obter a maior resistência de aterramento possível para correntes de falta (ou curto-circuito) para terra para limitar as suas intensidades.

II. Proporcionar um caminho para as correntes advindas de descargas atmosféricas.

III. Escoar as cargas estáticas geradas nas carcaças de equipamentos elétricos (por exemplo, motores e transformadores).

É correto o que se afirma em:

- a) I e II, apenas.
- b) I e III, apenas.
- c) II e III, apenas.
- d) I, II e III.
- e) II, apenas.

2. A resistividade do solo é um parâmetro importante para avaliar a resistência de aterramento. Os solos são formados por diferentes camadas que possuem resistividades, profundidade e formações geológicas distintas,

tornando-os não homogêneos.

Escolha a alternativa que apresente outros parâmetros que influenciam a resistividade do solo:

- a) Temperatura e pressão.
- b) Pressão e umidade.
- c) Composição química e pressão.
- d) Composição química e altitude.
- e) Temperatura, umidade e composição química.

3. O conhecimento da resistividade do solo é de extrema importância para o projeto de um bom sistema de aterramento. Um dos métodos mais conhecidos de medição é o método de Wenner, que usa um terrômetro e quatro eletrodos auxiliares (dois de corrente e dois de potencial).

Você aplicou o método de Wenner para medição da resistividade do solo, cravando quatro hastas a 50 cm de profundidade e espaçando-as em 8 m.

Se o terrômetro indicou $R_{\text{aterramento}} = 18 \Omega$, qual é a resistividade desse solo?

- a) $\rho = 800,10 \Omega \cdot m$
- b) $\rho = 919,56 \Omega \cdot m$
- c) $\rho = 998,32 \Omega \cdot m$
- d) $\rho = 910,93 \Omega \cdot m$
- e) $\rho = 930,50 \Omega \cdot m$

Seção 4.3

Medição de potência e energia elétrica

Diálogo aberto

Seja bem-vindo à última seção da Unidade 4 do curso de Medidas e Materiais Elétricos. Vamos concluir este curso com um estudo sobre os medidores de potência e de energia elétrica.

Medições de potência são bastante utilizadas em instalações elétricas industriais. Podemos usá-las, por exemplo, para verificar se um equipamento opera acima da sua capacidade nominal, para verificar qual é o seu fator de potência, entre outros casos.

Por sua vez, a medição de energia elétrica está presente em todas as unidades consumidoras das redes de distribuição de energia elétrica. O valor que devemos pagar na nossa conta de energia depende da leitura feita nos medidores de energia elétrica.

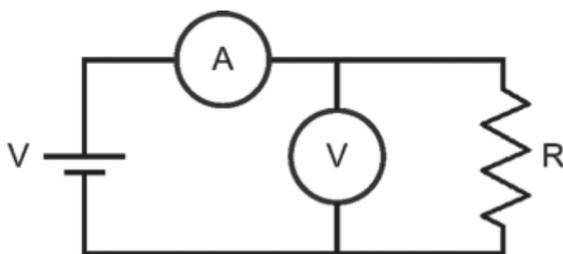
Nesta unidade, você ocupa o lugar de um profissional que trabalha em uma indústria de papel e celulose. Solicitaram-lhe, então, que verificasse se as instalações elétricas estavam adequadas aos padrões exigidos pelas normas técnicas vigentes. A sua empresa o nomeou como o responsável por esse projeto. Com base nisso, você e sua equipe deverão gerar um relatório técnico que contenha medições de tensão e correntes elétricas em todos os circuitos da indústria, resistência da(s) malha(s) de aterramento, demanda de energia consumida e fator de potência médio. Já foram verificadas as tensões e correntes nos circuitos e no aterramento. Agora vamos usar os conhecimentos adquiridos nesta seção para medir a potência consumida e o fator de potência da instalação. Todas as medidas e conclusões deverão ser apresentadas na forma de um relatório técnico ao gestor da área.

Não pode faltar

A potência elétrica pode ser definida como a quantidade de trabalho por unidade de tempo que um determinado elemento/equipamento consome. Como você já estudou anteriormente, a potência em circuitos de corrente contínua (CC) é dada pelo produto da tensão pela corrente

($P=VI$), cuja unidade é Watts (W), e indica a quantidade de potência consumida por um equipamento. Assim, para medirmos a potência de um circuito CC, precisamos ter um voltímetro e um amperímetro (Figura 4.16) e calcular o produto de ambas as leituras.

Figura 4.16 | Medição de potência em corrente contínua

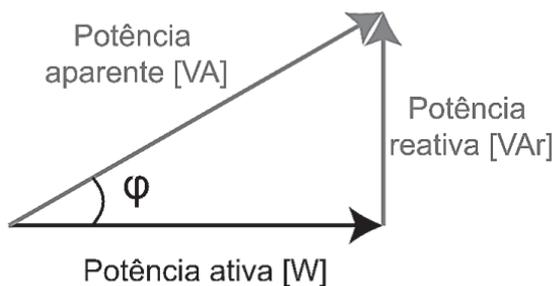


Fonte: elaborada pelo autor.

No caso de circuitos em corrente alternada, essa potência é denominada como ativa. Além desta, temos a potência aparente (S) e a reativa (Q), medidas em Volt-Ampère (VA) e Volt-Ampère reativo (VAr), respectivamente, que se relacionam a partir de $S = P + jQ = VI \cos(\varphi) + jVI \sin(\varphi)$, em que: $j = \sqrt{-1}$ (unidade imaginária), V e I são a tensão e corrente na carga e φ é o ângulo de fase da carga. A potência reativa (Q) indica a quantidade de potência consumida pelos elementos reativos, isto é, indutores e capacitores. Essa potência, embora não seja convertida em trabalho, é usada para estabelecer os campos magnéticos e elétricos dentro dos elementos reativos para que estes funcionem adequadamente.

Avaliando a equação da potência aparente, percebemos que a potência ativa está no eixo real e a reativa está no eixo imaginário. Se desenharmos essas duas potências em um plano cartesiano, juntamente com a potência aparente, teremos o triângulo de potências (Figura 4.17).

Figura 4.17 | Triângulo de potências

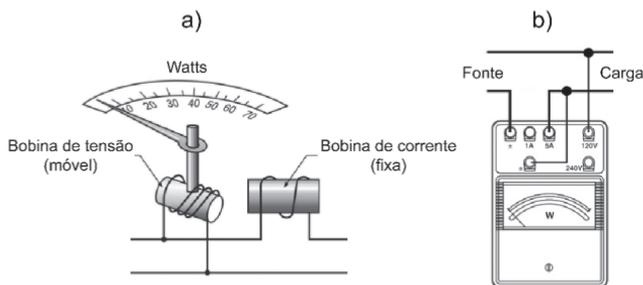


Fonte: elaborada pelo autor.

Medição de potência - Wattímetros

O wattímetro é o instrumento de medição de potência usado tanto em circuitos CC quanto em CA. A Figura 4.18a apresenta uma representação de um wattímetro analógico, em que podemos identificar uma bobina de corrente (fixa) e uma bobina de tensão (móvel), além de um ponteiro para indicação de leitura em uma escala calibrada. O wattímetro possui, portanto, um circuito que simula a operação de um voltímetro e um amperímetro combinados em um único equipamento (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2010). As bobinas de corrente e tensão devem ser ligadas em série e paralelo no circuito no qual desejamos medir a potência, respectivamente. A Figura 4.18b apresenta simplificada as ligações de um wattímetro em um circuito.

Figura 4.18 | a) Esquema simplificado de um wattímetro analógico; b) Ligação de um wattímetro em um circuito elétrico



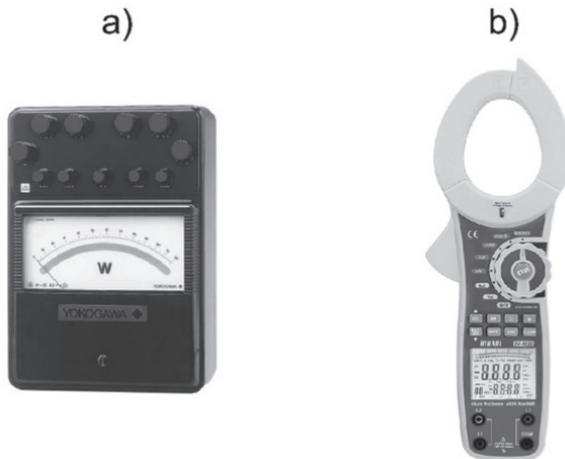
Fonte: a) adaptada de Creder (2016, p. 25); b) <<http://assets.tequipment.net/assets/1/7/2041-42ConnectionDiagramTN.jpg>>. Acesso em: 29 jan. 2017



O wattímetro possui uma bobina de corrente e uma de tensão que trabalham como um amperímetro e um voltímetro, respectivamente. Assim, a bobina de corrente deve ser ligada em série com o circuito, e a bobina de tensão ficará em paralelo.

Um wattímetro analógico e um alicate wattímetro digital são apresentados na Figura 4.19 (a e b, respectivamente). Este último, mais moderno do que o anterior, pode apresentar diversas outras medidas além da potência, como distorção harmônica total, fator de potência, entre outras. Nesse caso, a bobina de corrente foi substituída por um amperímetro alicate (“*clamp*”, estudado na Seção 4.1). Para fazer medição de potência, é preciso, portanto, enlaçar o condutor com o alicate e medir a tensão de alimentação simultaneamente.

Figura 4.19 | a) Wattímetro analógico e conexões; b) Alicate wattímetro digital



Fonte: a) <<https://goo.gl/1lHfCr>>. Acesso em: 11 jan. 2017; b) <<https://goo.gl/Q3MZvi>>. Acesso em: 11 jan. 2017.

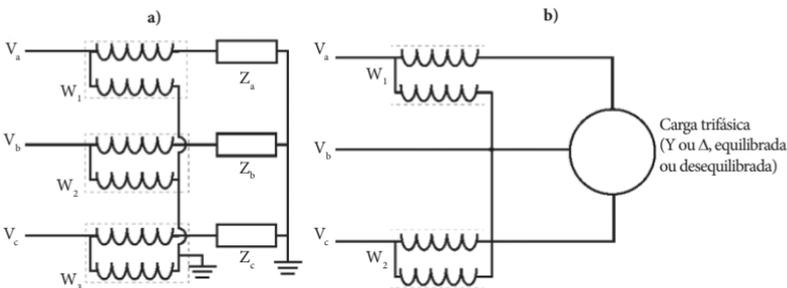
A maioria dos circuitos elétricos de interesse para medição de potência são trifásicos, como instalações elétricas industriais. Uma primeira forma de medir toda potência ativa consumida por uma carga (ou uma instalação de maneira geral, dependendo do local onde o wattímetro foi instalado) seria conectar um wattímetro por

fase, de forma que a potência trifásica ($P_{3\phi}$) é a soma das potências indicadas em cada instrumento:

$$P_{3\phi} = W_1 + W_2 + W_3 \rightarrow P_{3\phi} = V_a I_a \cos(\varphi_a) + V_b I_b \cos(\varphi_b) + V_c I_c \cos(\varphi_c)$$

Em que W_1 , W_2 e W_3 são as potências indicadas nos wattímetros 1, 2 e 3, respectivamente, e o ângulo φ é a fase da carga. A Figura 4.20a apresenta um exemplo de ligação de três wattímetros em um circuito trifásico que alimenta uma carga. No caso particular no qual as cargas forem perfeitamente balanceadas e equilibradas, podemos fazer a medição usando apenas um wattímetro em uma fase qualquer, que a potência ativa trifásica será o triplo da potência indicada no instrumento ($P = 3W_1$). Também podemos calcular a potência reativa consumida pela carga trifásica a partir de $Q = \frac{W_1 + W_2 + W_3}{\sqrt{3}}$. Um método frequentemente usado para medição de potências trifásicas é o dos dois wattímetros (conhecido como conexão de Aron), cujas ligações são apresentadas na Figura 4.20b. Neste método, as potências ativa (P) e reativa (Q) trifásicas serão calculadas por $P = W_1 + W_2$ e $Q = \sqrt{3}(W_2 - W_1)$, respectivamente. Esse método é válido para cargas em Y ou Δ , equilibradas ou desequilibradas. Vale a pena ressaltar que as leituras dos wattímetros são diferentes em relação ao método dos três wattímetros.

Figura 4.20 | a) Método dos três wattímetros; b) Medição de potência ativa de carga balanceada e equilibrada com um wattímetro



Fonte: elaborada pelo autor.

As conexões para usarmos o método dos dois wattímetros não precisam ser necessariamente as apresentadas na Figura 4.20b.

Podemos conectar, por exemplo, os wattímetros nas fases b e c, desde que os terminais da bobina de tensão estejam na fase a.



Refleta

Não é necessário um wattímetro por fase para medições de potências em circuitos trifásicos. O uso de apenas dois wattímetros implica algum erro na medida? Por que conseguimos medir potências trifásicas usando apenas dois wattímetros?

A partir das medidas realizadas com o método dos dois wattímetros, podemos calcular a fase da carga (φ) e, posteriormente, o fator de potência (FP) a partir das seguintes equações:

$$\tan \varphi = \sqrt{3} \frac{W_2 - W_1}{W_1 + W_2} \rightarrow \varphi = \tan^{-1} \left(\sqrt{3} \frac{W_2 - W_1}{W_1 + W_2} \right)$$

$$FP = \cos \varphi = \cos \left[\tan^{-1} \left(\sqrt{3} \frac{W_2 - W_1}{W_1 + W_2} \right) \right]$$

O fator de potência, que é a relação entre as potências ativa e aparente, nos informa a parcela da potência fornecida que foi transformada em trabalho. Cargas resistivas, por exemplo, possuem fator de potência unitário, isto é, não consomem energia reativa, e 100% da potência fornecida é convertida em trabalho. Cargas reativas, no entanto, possuem fatores de potência menores que 1 (um), indicando que parte da potência fornecida foi usada como potência reativa. O fator de potência em instalações industriais deve ser, no mínimo, de 0,92, conforme permitido pela NBR 14036 (ABNT, 2005).

Analisando as equações anteriores, podemos inferir qual é a característica da carga como segue (ALEXANDER; SADIKU, 2013):

- Se $W_1 = W_2$, a carga é resistiva.
- Se $W_1 < W_2$, a carga é indutiva.
- Se $W_1 > W_2$, a carga é capacitiva.



Você usou o método dos dois wattímetros em uma instalação industrial que possui cargas trifásicas operando em regime permanente. As leituras dos wattímetros foram $W_1 = 1000W$ e $W_2 = 2400W$. Calcule a potência ativa e reativa trifásicas e o fator de potência desse motor.

- A potência ativa trifásica, dada pela soma das indicações dos wattímetros:

$$P = W_1 + W_2 \rightarrow P = 1000 + 2400 \rightarrow P = 3400W$$

- A potência reativa trifásica:

$$Q = \sqrt{3}(W_2 - W_1) \rightarrow Q = \sqrt{3}(2400 - 1000) \rightarrow Q \approx 2424,87Var$$

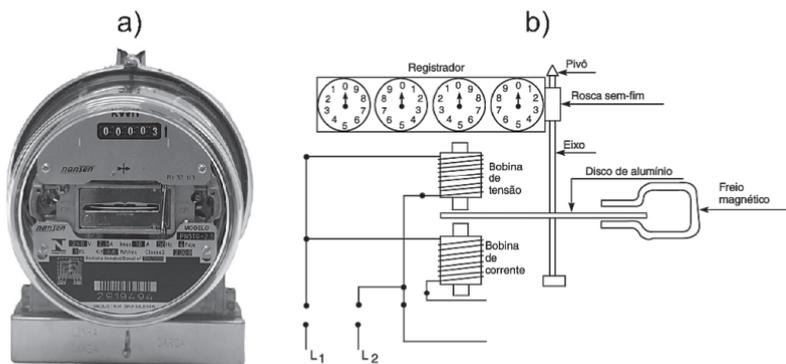
- O fator de potência é calculado a partir de:

$$FP = \cos \varphi = \cos \left[\tan^{-1} \left(\sqrt{3} \frac{2400 - 1000}{1000 + 2400} \right) \right] \rightarrow \cos \varphi = \cos(35,496^\circ) = 0,814$$

Medidores de energia elétrica

Esses medidores são usados nas instalações elétricas para medir a quantidade de energia elétrica consumida, normalmente em quilowatt-hora (kWh). Conhecidos popularmente como relógios de luz (Figura 4.21a), são instrumentos eletromecânicos que possuem um disco de alumínio livre para girar em um eixo: quanto maior for a velocidade de rotação, maior será a energia consumida naquele instante de tempo. O número de rotações completas é proporcional à quantidade de energia consumida. Um diagrama esquemático simplificado é apresentado na Figura 4.21b.

Figura 4.21 | a) Medidor de energia elétrica analógico; b) Esquemático do medidor



Fonte: a) adaptada de <<http://www.nansen.com.br/imagens/produtos/galerias/grande/polifasicos1.jpg>>. Acesso em: 13 jan. 2017; b) Creder (2016).

Atualmente, está em desenvolvimento uma série de medidores de energia elétrica inteligentes, conhecidos como *smart meters* (Figura 4.22). Esses medidores possuem funcionalidades de comunicação, além da medição de energia elétrica propriamente dita. Dessa forma, não há necessidade da leitura em campo da energia consumida em cada instalação, evitando erros de leitura e reduzindo custos operacionais. Além disso, alguns medidores conseguem, inclusive, fornecer detalhes sobre o perfil de consumo de uma instalação particular. Essa informação pode ser de extrema relevância para ações de eficiência energética.

Figura 4.22 | Medidor de energia elétrica inteligente



Fonte: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/9a/Intelligenter_zaeehler-_Smart_meter.jpg>. Acesso em: 13 jan. 2017.

Os *smart meters* estão inseridos ainda em um contexto maior, conhecido como redes inteligentes (ou *smart grids*), isto é, sistemas de distribuição de energia elétrica com sensoriamento e automação em larga escala (OLIVEIRA; VIEIRA JUNIOR, 2012).



Pesquise mais

Para aprender mais sobre as *smart grids*, seus benefícios e aplicações de medidores de energia inteligentes, leia os materiais a seguir:

OLIVEIRA, R. D.; VIEIRA Júnior, J. C. de M. Benefícios e desafios de redes inteligentes. **Revista Eletrônica de Energia**, v. 2, n.1, p. 3-14, 2012. Disponível em: <<http://www.revistas.unifacs.br/index.php/ree/article/view/1609>>. Acesso em: 16 jan. 2017.

FRACARI, F.; SANTOS, I. dos; SANCHEZ, G. Smart grid: uma nova forma de controle de energia elétrica. **Rev. de Empreendedorismo, Inovação e Tecnologia**, v. 2, n. 1, p. 15-22, 2015. Disponível em: <<https://seer.imed.edu.br/index.php/revistas/article/viewFile/917/741>>. Acesso em: 16 jan. 2017.

Sem medo de errar

Como trabalhador de uma indústria de papel e celulose, solicitaram-lhe que verificasse se as suas instalações elétricas estavam adequadas aos padrões exigidos pelas normas técnicas vigentes. Uma vez que sua empresa o nomeou como o responsável por esse projeto, você e sua equipe deveriam finalizar esse serviço com medições de potências e fator de potência. Esse resultado fará parte do relatório técnico que será entregue ao gestor da área.

Como líder do grupo, você, então, solicitou que sua equipe preparasse dois wattímetros para a medição e os equipamentos de proteção individual e coletiva (EPIs e EPCs, respectivamente). As leituras indicadas nos wattímetros foram $W_1 = 4000W$ e $W_2 = 5000W$. Você, então, conseguiu calcular as seguintes potências:

- A potência ativa trifásica, dada pela soma das indicações dos wattímetros: $P = W_1 + W_2 \rightarrow P = 4000 + 5000 \rightarrow P = 9000W$.

- A potência reativa trifásica:

$$Q = \sqrt{3}(W_2 - W_1) \rightarrow Q = \sqrt{3}(5000 - 4000) \rightarrow Q \approx 1732VAr.$$

- A potência aparente:

$$S = P + jQ \rightarrow S = 9000 + j1732VA \rightarrow S = 9165,15 \angle 10,89^\circ VA.$$

- O fator de potência:

$$FP = \cos \varphi = \frac{P}{S} \rightarrow \cos \varphi = \frac{9000}{9165,15} \rightarrow \cos \varphi = 0,982 \text{ indutivo}$$

O fator de potência desta instalação é indutivo, pois a potência reativa e o ângulo φ são positivos, ou, ainda, porque $W_2 > W_1$. O valor encontrado está acima do mínimo de 0,92 permitido pela NBR 14036 (ABNT, 2005), razão pela qual você conclui que sua instalação está adequada. Esse resultado deverá ser explicado no relatório que será enviado ao gestor da sua área.

Medição de potência e fator de potência globais

Descrição da situação-problema

Uma pequena indústria possui quatro motores de indução trifásicos operando em regime permanente. Foram feitas medidas por meio do método dos dois wattímetros em cada motor. As leituras dos wattímetros estão apresentadas na Tabela 4.8. Calcule as potências ativa, reativa e aparente trifásicas que a instalação consome. Qual é o fator de potência global da indústria?

Tabela 4.8 | Medidas dos wattímetros

Motor	Wattímetro 1 (W)	Wattímetro 2 (W)
I	800	2000
II	900	2300
III	1100	1600
IV	1000	2500

Fonte: elaborada pelo autor.

Resolução da situação-problema

Conhecendo o método dos dois wattímetros, você preparou uma planilha que fizesse todos os cálculos para você, a fim de facilitar a análise. Todas as potências para todos os motores estão apresentadas na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 | Cálculo das potências a partir do método dos dois wattímetros

Motor	P (W)	Q (VAr)	S (VA)
I	2800,00	2078,46	3487,12
II	3200,00	2424,87	4014,97
III	2700,00	866,03	2835,49
IV	3500,00	2598,08	4358,90

Fonte: elaborada pelo autor.

A partir desses resultados, basta somarmos as potências para descobrirmos quanto a indústria gasta no total, como segue:

- Potência ativa:

$$P = P_I + P_{II} + P_{III} + P_{IV} \rightarrow P = 2800 + 3200 + 2700 + 3500 \rightarrow P = 12,2 \text{ kW} .$$

- Potência reativa:

$$Q = Q_I + Q_{II} + Q_{III} + Q_{IV} \rightarrow Q = 2078,46 + 2424,87 + 866,03 + 2598,08 \rightarrow Q = 7,97 \text{ kVar} .$$

- Potência aparente:

$$S = S_I + S_{II} + S_{III} + S_{IV} \rightarrow S = 3487,12 + 4014,97 + 2835,49 + 4358,90 \rightarrow S = 14,70 \text{ kVA} .$$

O fator de potência é calculado a partir da relação entre as potências ativa e aparente, como segue:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \rightarrow \cos \varphi = \frac{12,2 \times 10^3}{14,7 \times 10^3} \rightarrow \cos \varphi = 0,83$$

Como as leituras de W_2 são todas maiores que W_1 , concluímos que a carga é indutiva e o fator de potência é, portanto, atrasado. Como o fator de potência da instalação está abaixo do mínimo exigido em norma pela NBR 14036 (ABNT, 2005), alguma providência deverá ser tomada para corrigi-lo, como o uso de banco de capacitores.

Faça valer a pena

1. O wattímetro é o instrumento de medição de potência usado tanto em circuitos CC quanto em CA. Esse instrumento apresenta duas bobinas, uma de corrente (fixa) e outra de tensão (móvel), além de um ponteiro para a indicação de leitura em uma escala calibrada. O wattímetro simula a operação de um voltímetro e um amperímetro combinados em um único equipamento.

Complete as lacunas da afirmação seguinte:

As bobinas de corrente e tensão devem ser ligadas em _____ e _____, respectivamente, para medir a potência _____ de um circuito/carga.

Escolha a alternativa que apresente as palavras corretas e na sequência em que aparecem.

- a) Paralelo, série, ativa.
- b) Série, paralelo, ativa.
- c) Série, paralelo, reativa.
- d) Série, paralelo, aparente.
- e) Paralelo, série, reativa.

2. O método dos dois wattímetros é bastante utilizado na medição de potências em circuitos trifásicos, independentemente da carga estar em Y ou Δ e ser balanceada. A partir das leituras dos wattímetros, podemos calcular todas as potências envolvidas e o fator de potência.

As leituras dos wattímetros foram $W_1 = 500W$ e $W_2 = 1100W$.

Assinale a alternativa que apresente a potência aparente consumida por esta carga (na forma polar).

- a) $S = 1907,88 \angle 33^\circ VA$.
- b) $S = 1563,77 \angle 30^\circ VA$.
- c) $S = 1123,41 \angle 39^\circ VA$.
- d) $S = 1701,12 \angle 24^\circ VA$.
- e) $S = 2013,52 \angle 27^\circ VA$.

3. Medidores de energia elétrica (relógios de luz) são usados nas instalações elétricas para medir a quantidade de energia elétrica consumida, normalmente em quilowatt-hora (kWh) em vez de joules (J), unidade oficial para energia. O valor lido no medidor é usado para tarifação em nossas contas de energia elétrica.

Avalie as afirmações seguintes sobre os medidores de energia elétrica:

I. A velocidade de giro do disco de alumínio é diretamente proporcional à energia consumida naquele instante.

II. A diferença entre o número de rotações registradas em um período de trinta dias consecutivos é a energia (em kWh) consumida pela unidade consumidora.

III. Uma das possibilidades decorrentes da utilização de *smart meters* é a leitura remota da energia consumida em uma determinada unidade consumidora por parte da concessionária.

É correto o que se afirma em:

- a) I, apenas.
- b) II, apenas.
- c) I e III, apenas.
- d) I, II e III.
- e) II e III, apenas.

Referências

- AGULLEIRO, I.; LOZANO, M. M. **Técnicas modernas para la medición de sistemas de puesta a tierra en zonas urbanas**. Caracas: Universidad Simón Bolívar, 2005.
- ALEXANDER, C. K., SADIKU, M. N. O. **Fundamentos de circuitos elétricos**. Porto Alegre: AMGH, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 14039**: Instalações elétricas de média tensão de 1,0 kV a 36,2 kV. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.
- _____. **NBR 5410**: Instalações técnicas de baixa tensão. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- _____. **NBR 15749**: Medição de resistência de aterramento e de potenciais na superfície do solo em sistemas de aterramento. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
- _____. **NBR 7117**: Medição de resistividade e determinação da estratificação do solo. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.
- BALBINOT, A.; BRUSAMARELLO, V. J. **Instrumentação e fundamentos de medidas**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2010. v.1
- BELL, D. A. **Electronic instrumentation and measurements**. New Jersey: Prentice Hall, 1994.
- CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de máquinas elétricas**. São Paulo: AMGH, 2013.
- CREDER, H. **Instalações elétricas**. São Paulo: LTC, 2016.
- FRACARI, F.; SANTOS, I.; SANCHEZ, G. Smart Grid: uma nova forma de controle de Energia Elétrica. **Revista de Empreendedorismo, Inovação e Tecnologia**, v. 2, n. 1, p. 15-22, 2015. Disponível em: <<https://seer.imes.edu.br/index.php/revistas/article/viewFile/917/741>>. Acesso em: 16 jan. 2017.
- KINDERMANN, G.; CAMPAGNOLO, J. M. **Aterramento elétrico**. Porto Alegre: Sagra DC Luzzatto, 1995.
- MAMEDE FILHO, J. **Instalações elétricas industriais**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010.
- MEDEIROS, Solon. **Fundamentos de medidas elétricas**. 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara, 1986.
- MORENO, H.; COSTA, P. F. **Aterramento elétrico**. São Paulo: Procobre, 1999.
- OLIVEIRA, R. D.; VIEIRA JÚNIOR, J. C. de M. Benefícios e desafios de redes inteligentes. **Revista Eletrônica de Energia**, v. 2, n. 1, 2012. Disponível em: <<http://www.revistas.unifacs.br/index.php/ree/article/view/1609>>. Acesso em: 16 jan. 2017.

ISBN 978-85-87482-853-1



9 788584 828531 >