

GILMAR BARRETO
CARLOS ALBERTO DE CASTRO JUNIOR
CARLOS ALBERTO FAVARIN MURARI
FUJIO SATO

circuitos de corrente alternada

fundamentos e prática

GILMAR BARRETO
CARLOS ALBERTO DE CASTRO JUNIOR
CARLOS ALBERTO FAVARIN MURARI
FUJIO SATO

**circuítos de
correntes
altérnada**
fundamentos e prática

oficina de textos

© 2012 Oficina de Textos

Grafia atualizada conforme o Acordo Ortográfico da Língua Portuguesa de 1990, em vigor no Brasil a partir de 2009.

CONSELHO EDITORIAL Cylon Gonçalves da Silva; José Galizia Tundisi; Luis Enrique Sánchez; Paulo Helene; Rozely Ferreira dos Santos; Teresa Gallotti Florenzano

CAPA Malu Vallim

DIAGRAMAÇÃO Casa Editorial Maluhy & Co.

PROJETO GRÁFICO Douglas da Rocha Yoshida

PREPARAÇÃO DE TEXTO Gerson Silva

REVISÃO DE TEXTO Marcel Iha

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Circuitos de corrente alternada : fundamentos e prática / Gilmar Barreto...[et al.]. – São Paulo : Oficina de Textos, 2012.

Outros autores: Carlos Alberto de Castro Junior, Carlos Alberto Favarin Murari, Fujio Sato

Bibliografia.

ISBN 978-85-7975-044-1

1. Circuitos elétricos - Análise 2. Correntes elétricas alternadas
I. Barreto, Gilmar. II. Castro Junior, Carlos Alberto de. III. Murari, Carlos Alberto Favarin. IV. Sato, Fujio.

12-00911

CDD-621.31913

Índices para catálogo sistemático:

1. Correntes alternadas : Engenharia elétrica 621.31913

Todos os direitos reservados à **Editora Oficina de Textos**

Rua Cubatão, 959

CEP 04013-043 São Paulo SP

tel. (11) 3085 7933 fax (11) 3083 0849

www.ofitexto.com.br

atend@ofitexto.com.br

Sobre os Autores

Gilmar Barreto é Engenheiro Químico pela Faculdade de Engenharia Química da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp) e Doutor na área de Automação pela Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação - FEEC (Unicamp), onde atualmente é Professor, com ampla experiência no ensino de Eletrotécnica. Na pesquisa tem atuado nos seguintes temas: Modelagem Computacional de Dados, Ensino de Engenharia e Inovações Curriculares.

e-mail: gbarreto@dmcsi.fee.unicamp.br

Carlos A. F. Murari é Engenheiro Eletricista e Doutor em Sistemas de Energia Elétrica pela Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação - FEEC (Unicamp), onde atualmente é Professor Colaborador, tendo se dedicado ao ensino em disciplinas associadas aos temas abordados neste livro. Na pesquisa, tem atuado em métodos computacionais para o planejamento e a operação da transmissão e da distribuição de energia elétrica.

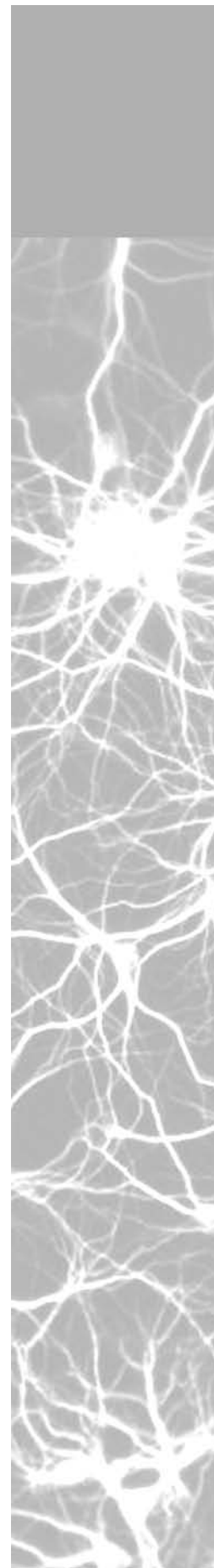
e-mail: murari@dsee.fee.unicamp.br

Carlos A. Castro é Engenheiro Eletricista e Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas (Unicamp) e Doctor of Philosophy pela Arizona State University (EUA). Atualmente é Professor Associado da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Unicamp. Tem interesse especial, tanto no ensino como na pesquisa, em análise de circuitos elétricos e sistemas elétricos de potência (particularmente estabilidade de tensão, operação e segurança de sistemas de potência, métodos de fluxo de carga e sistemas de transmissão e distribuição).

e-mail: ccastro@unicamp.br

Fujio Sato formou-se em Engenharia Elétrica na Unicamp em 1975, onde também realizou o mestrado e o doutorado (1979 e 1994). É Professor Doutor I do Departamento de Sistemas de Energia Elétrica da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Unicamp. De 1965 a 1997 trabalhou na CPFL (Companhia Paulista de Força e Luz) nas áreas de manutenção e operação de sistemas de energia elétrica.

e-mail: sato@dsee.fee.unicamp.br



Apresentação

É com grande satisfação e agradecimento que me debruço na tarefa de apresentar os autores deste livro, os Professores Doutores Gilmar Barreto, Carlos Alberto de Castro Jr., Carlos Alberto Favarin Murari e Fujio Sato. Todos são profundos conhecedores e estudiosos em sistemas de energia elétrica e atuam nesta área há pelo menos 25 anos, período em que apresentaram contribuições significativas tanto no aspecto teórico como no de aplicação, advindas dos projetos de pesquisa financiados por instituições de fomento (Fapesp e CNPq), bem como pelos setores privado e governamental.

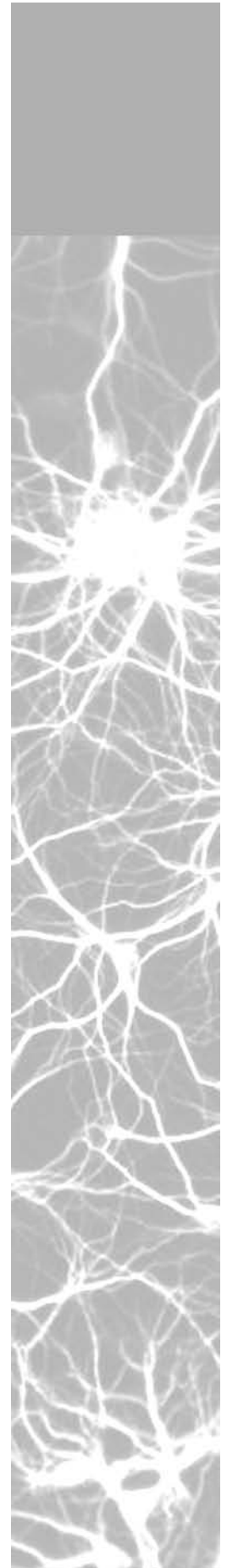
Embora sejamos colegas na Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação (Unicamp), atuamos profissionalmente em áreas não correlatas. Ao longo desse tempo, ficou evidenciada a preocupação e a dedicação dos autores em relação ao ensino, atividade ainda por ocupar um lugar de destaque e ter reconhecida sua importância como forma apropriada de apresentar os fundamentos e transmitir os conhecimentos, desde os conceitos mais básicos até os mais avançados. Foi em virtude dessa preocupação que os autores se propuseram a encontrar formas não convencionais de alcançar tais objetivos, sendo que o leitor encontrará exemplos disso neste livro.

A obra apresenta de forma diferenciada conceitos básicos e fundamentais na área de Eletrotécnica, pois contempla, além da parte teórica, experimentos relacionados a estes conceitos por meio de vídeos. Isso proporciona uma forma de aprendizado agradável e didática aos estudantes dos mais diversos cursos de Engenharia, de colégios técnicos ou de cursos básicos de Eletrotécnica. Além dos problemas resolvidos, os exercícios propostos ao final de cada capítulo auxiliam a fixar os principais conceitos do tema abordado.

As experiências adquiridas nas pesquisas desenvolvidas ao longo dos anos também acrescentaram contribuições significativas ao conteúdo desta obra, como o pragmatismo, uma característica associada aos autores e proporcionada pela formação em Engenharia. A incorporação de todos esses elementos não poderia deixar de resultar numa obra que certamente tornar-se-á uma importante referência na área.

Prof. Dr. Reginaldo Palazzo Junior

Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação - Unicamp



Sumário

Conceitos básicos, 17

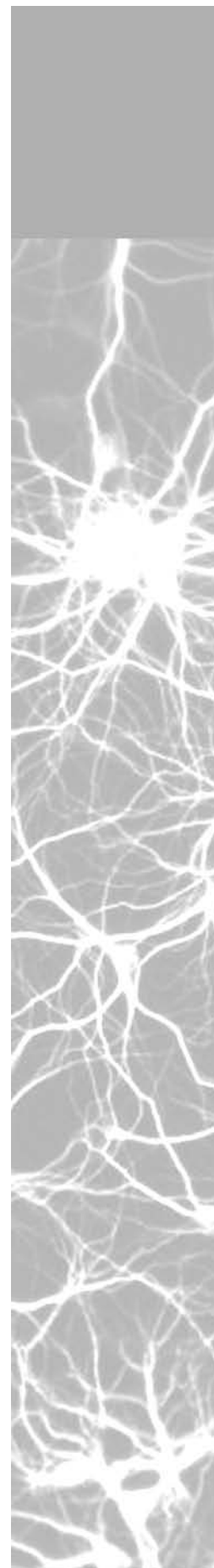
- 1.1 – Eletrotécnica, 17
- 1.2 – Geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, 18
- 1.3 – Circuitos de corrente alternada, 20
- 1.4 – Rendimento e potência em equipamentos, 21
- 1.5 – Choque elétrico, 23
- 1.6 – Procedimentos gerais para o uso seguro de equipamentos elétricos, 23
- 1.7 – Procedimento para a utilização de voltímetro (medida de tensão), 24
- 1.8 – Procedimentos para a utilização de amperímetros (medida de corrente), 25
- 1.9 – Procedimento para o uso de ohmímetro (medida de resistência), 26
- 1.10 – Leis fundamentais, 27
- 1.11 – Curva característica, 29
- 1.12 – Especificação comercial de resistores, 30

Formas de ondas, 33

- 2.1 – Forma de onda contínua, 33
- 2.2 – Forma de onda oscilante, 34
- 2.3 – Classificação das formas de ondas, 34
- 2.4 – Valores característicos das formas de ondas alternadas, 36
- 2.5 – Visualização de formas de ondas no osciloscópio, 45

Resistor, indutor e capacitor em circuitos elétricos, 51

- 3.1 – Capacitor, 51
- 3.2 – Indutor, 52
- 3.3 – Circuito RL série com fonte c.c., 52
- 3.4 – Circuito RC série com fonte c.c., 55
- 3.5 – Comportamento elétrico em circuitos c.a., 56
- 3.6 – Comportamento em regime permanente do circuito RL série com fonte senoidal, 60
- 3.7 – Comportamento em regime permanente do resistor sob corrente senoidal, 61
- 3.8 – Comportamento em regime permanente do indutor sob corrente senoidal, 62
- 3.9 – Comportamento em regime permanente do circuito RL paralelo com fonte senoidal, 62
- 3.10 – Comportamento em regime permanente do circuito RC série com fonte senoidal, 65
- 3.11 – Comportamento em regime permanente do capacitor sob corrente senoidal, 68



- 3.12 – Comportamento em regime permanente do circuito RC paralelo com fonte senoidal, 69
- 3.13 – Comportamento em regime permanente do circuito RLC série com fonte senoidal, 70

Conceitos de fasor e impedância, 75

- 4.1 – Revisão básica de números complexos, 75
- 4.2 – Fasor, 77
- 4.3 – Impedância, 79
- 4.4 – Circuitos com impedâncias em série e/ou em paralelo, 81
- 4.5 – Admitância, 87
- 4.6 – Diagrama fasorial, 87

Potências em circuitos de corrente alternada, 97

- 5.1 – Conceitos básicos, 97
- 5.2 – Obtenção experimental das potências ativa e reativa, 109
- 5.3 – Fator de potência, 111
- 5.4 – Correção do fator de potência, 113

Circuitos Trifásicos, 129

- 6.1 – Fonte de tensões trifásicas, 129
- 6.2 – Conexões trifásicas, 133
- 6.3 – Circuitos equilibrados, 134
- 6.4 – Circuitos desequilibrados, 137

Potências em circuitos trifásicos, 151

- 7.1 – Potência aparente em carga trifásica, 151
- 7.2 – Medição da potência ativa em circuitos trifásicos, 156
- 7.3 – Medição da potência reativa em circuitos trifásicos, 163
- 7.4 – Demanda e curva de carga, 168
- 7.5 – Medição da energia elétrica, 170
- 7.6 – Composição da fatura de energia elétrica, 172

Transformadores , 179

- 8.1 – Introdução, 179
- 8.2 – Lei de Indução de Faraday, 180
- 8.3 – Transformador monofásico, 181
- 8.4 – Transformador ideal, 182
- 8.5 – Autotransformador monofásico, 185
- 8.6 – Transformador real – características de operação, 189
- 8.7 – Polaridade dos enrolamentos, 194
- 8.8 – Transformador trifásico, 195
- 8.9 – Transmissão e distribuição da energia elétrica, 198

Acionamento e proteção em instalações elétricas, 207

- 9.1 – Distribuição de energia elétrica em baixa tensão, 207
- 9.2 – Normas e regulamentos, 211
- 9.3 – Aterramento das instalações elétricas, 212
- 9.4 – Choque elétrico, 217
- 9.5 – Padronização de plugues e tomadas, 218
- 9.6 – Dispositivos de acionamento, 220
- 9.7 – Dispositivos de proteção, 223
- 9.8 – Orientações do Corpo de Bombeiros para o “Programa Casa Segura – Prevenção contra choques e curtos-circuitos”, 225
- 9.9 – Lâmpadas de uso popular, 226

Motores e geradores, 235

- 10.1 – Conversão eletromecânica de energia, 235
- 10.2 – Aspectos construtivos, 236
- 10.3 – Princípio de funcionamento dos motores de indução e síncrono, 238
- 10.4 – Características elétricas, 242
- 10.5 – Identificação (dados de placa), 243
- 10.6 – Regulamentação, 246
- 10.7 – Acionamento de motor de indução trifásico, 248
- 10.8 – Princípio de funcionamento do gerador c.a., 249
- 10.9 – Gerador c.a. elementar, 249
- 10.10 – Princípio de funcionamento do motor de corrente contínua, 251
- 10.11 – Classificação do motor c.c., 252
- 10.12 – Motor universal, 253
- 10.13 – Características operacionais do motor c.c., 253
- 10.14 – Acionamento de motores de corrente contínua, 254
- 10.15 – Comentários gerais, 256

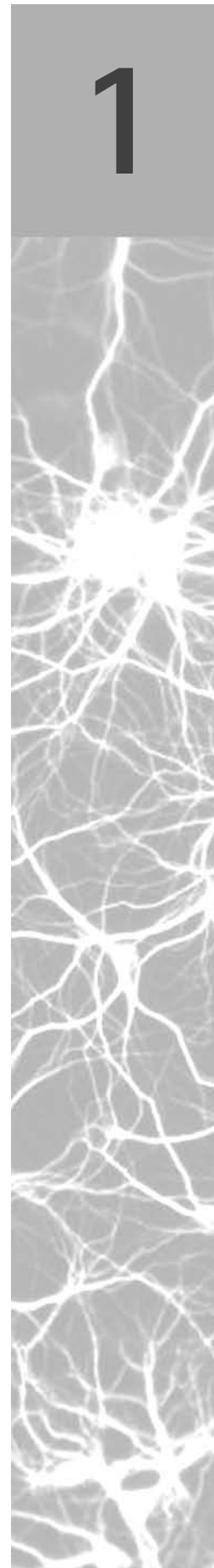
Conceitos básicos

Neste capítulo são introduzidos alguns conceitos que serão úteis ao longo deste livro, além de uma abordagem sucinta sobre normas de segurança pertinentes ao uso da eletricidade e informações importantes sobre o uso de alguns instrumentos de medidas de grandezas elétricas. Como exemplo de aplicação desses instrumentos, descreve-se um método para obter a curva característica de bipolos resistivos dos tipos linear e não linear, abordando as condições de validade da Lei de Ohm e a obtenção dos valores das respectivas resistências elétricas. Entenda-se por bipolo qualquer componente conectado a um circuito elétrico por meio de um par de terminais (dois contatos elétricos).

1.1 ELETROTÉCNICA

Em linhas gerais, Eletrotécnica pode ser conceituada como a área da Engenharia Elétrica que estuda a geração, a transmissão, a distribuição e a utilização da energia elétrica. Desde 1879, quando Thomas Alva Edison apresentou a primeira lâmpada incandescente apropriada para utilização comercial (a lâmpada incandescente foi inventada por Sir Joseph Wilson Swan em 1860), essa área vem apresentando uma evolução notável, que pode ser constatada pelo crescimento constante da demanda de energia elétrica e pelo desenvolvimento tecnológico alcançado para o seu atendimento. A sociedade moderna depende definitiva e intensamente da energia elétrica.

Thomas Alva Edison nasceu em 11 de fevereiro de 1847, em Milan, Ohio, EUA, e faleceu em 18 de outubro de 1931 em West Orange, New Jersey, EUA. Foi o empresário e inventor que desenvolveu muitos dispositivos de fundamental interesse industrial, destacando-se o fonógrafo, o gramofone, a lâmpada elétrica incandescente, o projetor de cinema, a técnica de empacotar alimentos a vácuo e o aperfeiçoamento do telefone. Foi detentor de mais de 1.000 patentes.



- Se for medir a resistência entre dois contatos de um circuito (conhecida como resistência equivalente), assegure-se de que o circuito não esteja energizado. Lembrete: em geral, as fontes têm resistência interna.
- Se for medir a resistência de um único bipolo, retire-o do circuito e conecte-o aos terminais do ohmímetro.
- Selecione o fundo de escala adequado para a grandeza a ser lida. Se não conhecer a ordem do valor da grandeza a ser lida, selecione o maior fundo de escala.
- Após a leitura, desligue o instrumento ou, caso o ohmímetro faça parte de um multímetro, retorne a chave seletora para a posição “desliga” ou para a função amperímetro ou voltímetro. Esse procedimento evita que a bateria interna do instrumento se descarregue.

1.10 LEIS FUNDAMENTAIS

1.10.1 Lei de Ohm

Em 1827, Georg Simon Ohm descobriu que, para certos materiais, a uma dada temperatura, a relação entre a diferença de potencial U aplicada entre dois pontos de um condutor e a corrente I que flui entre esses dois pontos é constante. Essa constante corresponde à resistência R do condutor, dada por:

$$R = \frac{U}{I} \quad (1.5)$$

e que pode ser medida com o ohmímetro, conforme descrito na seção 1.9

A diferença de potencial é expressa em volts (V); a corrente em ampères (A) e a resistência em ohms (Ω).

Georg Simon Ohm nasceu em 16 de março de 1789, em Erlangen, Alemanha, e faleceu em 6 de julho de 1854, em Munique, Alemanha. Foi o físico e matemático que, entre 1825 e 1827, desenvolveu a primeira teoria matemática da condução elétrica nos circuitos, que resultou na fórmula posteriormente denominada de Lei de Ohm. O reconhecimento do seu trabalho só ocorreu em 1841, quando ele recebeu da Royal Society of London a Medalha Copley, que é um prêmio no domínio das ciências.

Cuidado para não confundir o conceito de resistência com resistividade, pois esta é uma grandeza física que expressa de forma quantitativa a propriedade que os materiais têm de apresentar diferentes graus de oposição à passagem de corrente elétrica, ou seja, trata-se de uma característica do material em si e não de uma amostra (pedaço) do material. Portanto, a resistividade do cobre, por exemplo, é característica do metal cobre e não de um pedaço de fio feito de cobre, ao qual se associa o conceito de resistência, que depende do comprimento l (m), da área da seção transversal A (m^2) e da resistividade ρ ($\Omega.m$) conforme indicado na Eq. (1.6)

valor nominal, o valor medido ou até mesmo um valor calculado. O erro relativo também é normalmente expresso em valores percentuais, sendo definido por:

$$\varepsilon = \frac{|VG - VR|}{VR} \cdot 100\% \quad (1.7)$$

VG – valor da grandeza

VR – valor de referência

Exemplo 1.3

Um resistor com valor nominal $1\text{ k}\Omega \pm 5\%$ é conectado a uma fonte c.c. cuja tensão medida com voltímetro é de 100 V. Se um amperímetro registra 97,6 mA, pode-se calcular a resistência:

$$R = \frac{100}{0,0976} = 1.024,59 \quad \Omega$$

Se for considerado como valor de referência o valor nominal $1.000\ \Omega$, o erro relativo será de:

$$\varepsilon = \frac{|R_{calc} - R_{nom}|}{R_{nom}} \cdot 100\% = \frac{|1.024,59 - 1.000|}{1.000} \cdot 100\% = 2,46\%$$

Portanto, o valor calculado apresenta um erro de 2,46% em relação ao valor nominal, abaixo da tolerância (5%).

Conectado a um ohmímetro, obtém-se para esse resistor $1.024\ \Omega$. Ao se considerar como valor de referência a leitura do ohmímetro (instrumento confiável), pode-se avaliar a precisão do valor nominal informado pelo fabricante. Nesse caso, o erro relativo é de:

$$\varepsilon = \frac{|R_{nom} - R_{med}|}{R_{med}} \cdot 100\% = \frac{|1.000 - 1.024|}{1.024} \cdot 100\% = 2,34\%$$

Independentemente do valor de referência adotado, o importante é o valor do resistor estar no intervalo estipulado pelo fabricante.



O vídeo "Curvas características de bipolos" destaca aspectos práticos citados nesses exemplos.

EXERCÍCIOS

1.1 Na Fig. 1.1:

- Quais as funções dos transformadores nela representados? Justifique.
- Quais as funções da turbina e do gerador?

1.2 Cite vantagens e desvantagens em um sistema interligado de geração e transmissão de energia elétrica.

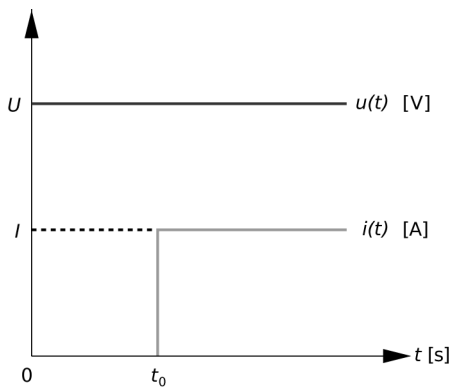


Fig. 2.2 Forma de onda contínua

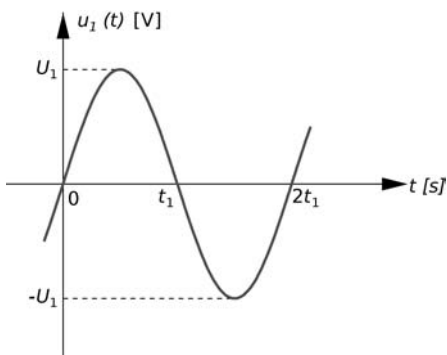


Fig. 2.3 Forma de onda senoidal

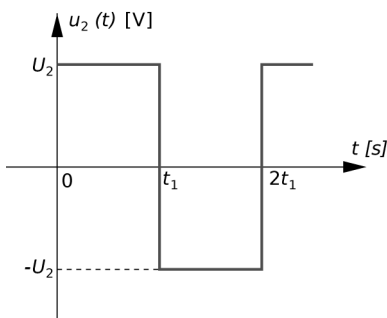


Fig. 2.4 Forma de onda quadrada

O instante $t = t_0$ registra uma transição no comportamento elétrico do circuito. Em seguida, para $t > t_0$, o circuito entra em regime permanente (ou simplesmente regime) e os valores de tensão e corrente permanecem constantes. Se a bateria for substituída por uma fonte cuja tensão é variável, ou seja, assume valores distintos para cada instante de tempo, circulará pelo resistor uma corrente também variável.

Dessa forma, em circuitos elétricos, as tensões e correntes apresentam um comportamento ao longo do tempo que pode ser caracterizado graficamente, o que corresponde ao que é, em geral, denominado forma de onda.

2.2 FORMA DE ONDA OSCILANTE

A forma de onda de uma tensão senoidal, matematicamente expressa pela Eq. (2.3), é mostrada na Fig. 2.3.

$$u_1(t) = U_1 \cdot \text{sen} \left(\frac{\pi}{t_1} \cdot t \right) \quad (2.3)$$

E uma forma de onda quadrada é apresentada na Fig. 2.4.

A expressão matemática que define a forma de onda da Fig. 2.4 é:

$$u_2(t) = \begin{cases} U_2 & \text{para } nt_1 \leq t < (n+1)t_1 \\ -U_2 & \text{para } (n+1)t_1 \leq t < (n+2)t_1 \end{cases} \quad (2.4)$$

$n = 0, 2, 4, 6$

2.3 CLASSIFICAÇÃO DAS FORMAS DE ONDAS

Três categorias de formas de ondas são de especial interesse, e suas características são apresentadas a seguir.

2.3.1 Ondas oscilatórias

As formas de ondas oscilatórias são aquelas que crescem e decrescem alternadamente ao longo do tempo, de acordo com alguma lei definida.

Na Fig. 2.5A é ilustrada uma corrente elétrica cuja forma de onda é oscilatória, matematicamente expressa por:

$$i(t) = \frac{\text{sen}(\omega \cdot t)}{e^{\beta t}} \quad (2.5)$$

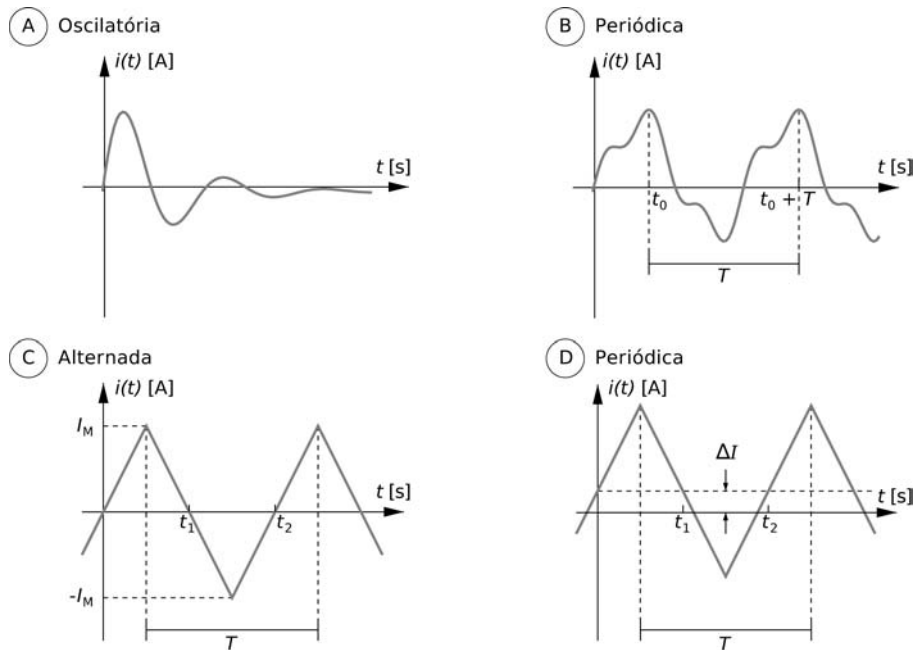


Fig. 2.5 Tipos de formas de ondas

2.3.2 Ondas periódicas

As formas de ondas periódicas correspondem a um subconjunto das formas de ondas oscilatórias para as quais os seus valores se repetem a intervalos de tempo iguais.

A Fig. 2.5B corresponde a uma corrente periódica, matematicamente expressa por:

$$i(t) = I_0 + I_1 \cdot \text{sen}(\omega \cdot t) + I_3 \cdot \text{sen}(3 \cdot \omega \cdot t + \alpha) \quad (2.6)$$

Note que os valores instantâneos da corrente se repetem a cada intervalo de tempo T , ou seja, para qualquer instante de tempo t , assim como para $t = t_0$, mostrado na Fig. 2.5B, tem-se:

$$i(t_0 + T) = i(t_0) \quad (2.7)$$

2.3.3 Ondas alternadas

As formas de ondas alternadas constituem um subconjunto das formas de ondas periódicas para as quais os respectivos valores médios são nulos.

A definição matemática de valor médio de uma forma de onda é apresentada na próxima seção. No entanto, é possível identificar uma forma de onda alternada por meio de uma interpretação intuitiva de valor médio.

Observe a Fig. 2.5C, na qual está representada uma forma de onda triangular que, evidentemente, possui as características de uma forma de onda periódica, ou seja, seus valores se repetem a intervalos de tempo T . Além disso, no intervalo $0 < t < t_1$, a corrente

3.8 COMPORTAMENTO EM REGIME PERMANENTE DO INDUTOR SOB CORRENTE SENOIDAL

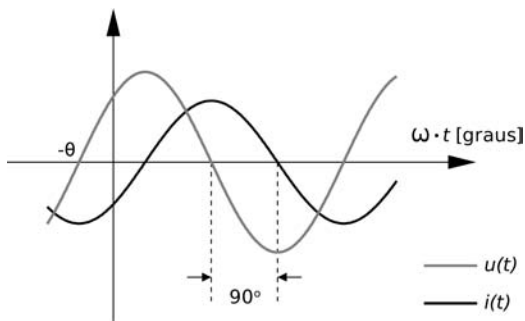


Fig. 3.18 Corrente e tensão no indutor

Se, na análise matemática do circuito RL série, considerarmos $R = 0$, tem-se, para um circuito puramente indutivo:

$$i(t) = \frac{U_p}{\omega \cdot L} \cdot \text{sen}(\omega \cdot t + \theta - 90^\circ) \quad (3.47)$$

As formas de ondas da corrente e da tensão no indutor estão ilustradas na Fig. 3.18. Portanto, em um indutor, constata-se que a corrente está atrasada de 90° em relação à tensão, e essa conclusão é válida para esse componente em qualquer circuito a que ele esteja conectado.



O vídeo "Circuito RL série" apresenta uma análise do respectivo comportamento elétrico.

3.9 COMPORTAMENTO EM REGIME PERMANENTE DO CIRCUITO RL PARALELO COM FONTE SENOIDAL

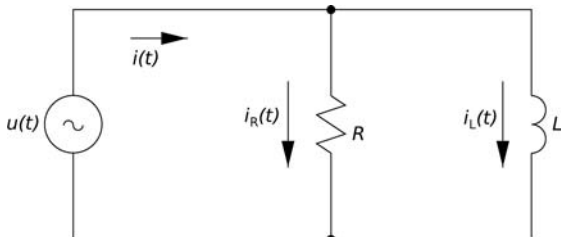


Fig. 3.19 Circuito RL paralelo

No diagrama elétrico da Fig. 3.19 tem-se um resistor conectado em paralelo com um indutor, e ambos conectados em paralelo com a fonte, formando o circuito RL paralelo.

A tensão nos terminais da fonte corresponde a:

$$u(t) = U_p \cdot \text{sen}(\omega \cdot t + \theta) \quad (3.48)$$

e sua forma de onda está ilustrada na Fig. 3.20.

Ao se realizar para esse circuito um desenvolvimento matemático similar ao aplicado para o circuito RL série (seção 3.6), obtém-se que, quando a tensão $u(t)$ é aplicada ao circuito RL paralelo, a corrente em regime permanente é:

$$i(t) = I_p \cdot \text{sen}(\omega \cdot t + \theta - \varphi) \quad (3.49)$$

sendo:

$$I_p = \frac{U_p}{\frac{R \cdot \omega \cdot L}{\sqrt{R^2 + (\omega \cdot L)^2}}} \quad \varphi = \text{arctg} \left(\frac{R}{\omega \cdot L} \right) \quad (3.50)$$

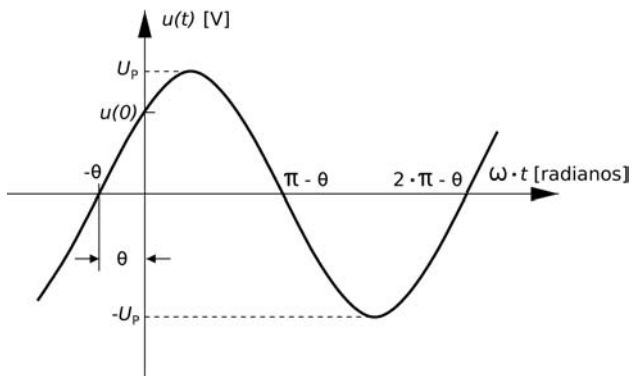


Fig. 3.20 Tensão na fonte

As formas de ondas da tensão e da corrente na fonte, destacando-se a defasagem φ , estão ilustradas na Fig. 3.21.

Exemplo 3.2

Uma fonte de tensão senoidal de valor de pico igual a 100 V e frequência 60 Hz é conectada ao circuito RL paralelo (Fig. 3.22), com resistor de 100 Ω e indutor de 300 mH. Obter a corrente na fonte em regime permanente.

A tensão na fonte corresponde a:

$$u(t) = 100 \cdot \text{sen}(377 \cdot t + \theta) \text{ V}$$

A corrente em regime permanente fornecida pela fonte é do mesmo tipo da tensão aplicada, mas defasada de um ângulo φ :

$$i(t) = I_p \cdot \text{sen}(\omega \cdot t + \theta - \varphi) \quad (3.51)$$

A corrente no resistor vale:

$$i_R(t) = \frac{u(t)}{R} = \frac{100 \cdot \text{sen}(\omega \cdot t + \theta)}{100} = \text{sen}(\omega \cdot t + \theta) \text{ A}$$

Note que a corrente no resistor está em fase com a tensão, como ilustrado na Fig. 3.23.

A relação entre a tensão $u(t)$ e a corrente no indutor é:

$$u(t) = L \cdot \frac{d}{dt} i_L(t) \quad (3.52)$$

Portanto, a corrente no indutor em regime permanente corresponde a:

$$\begin{aligned} i_L(t) &= \frac{1}{L} \cdot \int u(t) dt = \frac{U_p}{L} \int \text{sen}(\omega \cdot t + \theta) \\ &= -\frac{U_p}{\omega \cdot L} \cdot \cos(\omega \cdot t + \theta) = \frac{U_p}{\omega \cdot L} \cdot \text{sen}(\omega \cdot t + \theta - 90^\circ) \\ i_L(t) &= \frac{100}{377 \cdot 300 \cdot 10^{-3}} \cdot \text{sen}(\omega \cdot t + \theta - 90^\circ) \\ &= 0,884 \cdot \text{sen}(\omega \cdot t + \theta - 90^\circ) \text{ A} \end{aligned}$$

Note que a corrente no indutor está atrasada de 90° em relação à tensão, como ilustrado na Fig. 3.24.

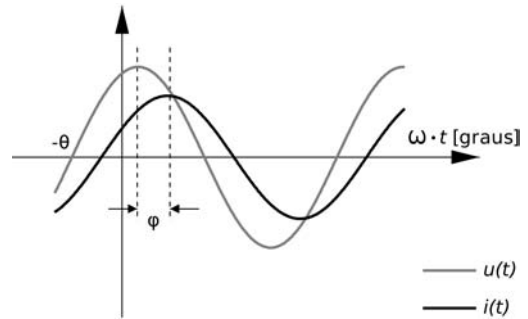


Fig. 3.21 Tensão e corrente na fonte

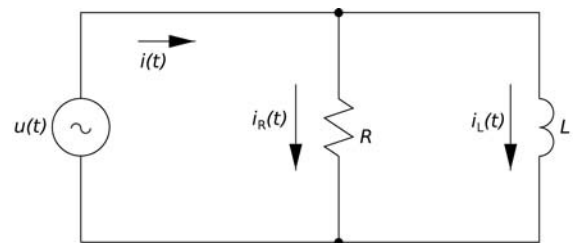


Fig. 3.22 Circuito RL paralelo

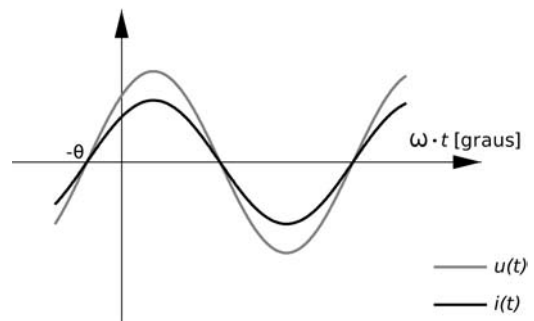


Fig. 3.23 Corrente e tensão no resistor

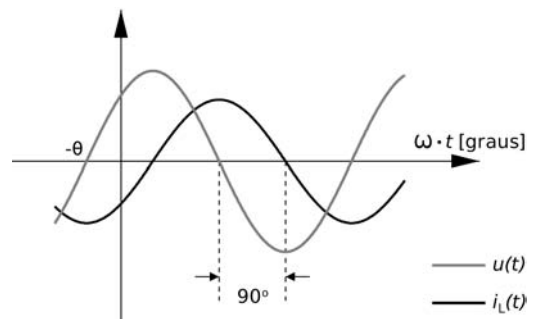


Fig. 3.24 Corrente e tensão no indutor

A faixa de variação do ângulo de defasagem é $-90^\circ < \varphi < 90^\circ$, ou seja, dependendo dos valores de R , L e C , o circuito pode ter sua corrente adiantada, atrasada ou em fase com a tensão da fonte.

Dependendo dos valores de L , C e da frequência, pode-se ter:

$$X_L = X_C \quad \rightarrow \quad \omega \cdot L = \frac{1}{\omega \cdot C} \quad \rightarrow \quad \omega^2 = \frac{1}{L \cdot C}$$

Nessa condição, a associação série de L e C pode apresentar o comportamento de um curto-circuito do ponto de vista da fonte, pois a magnitude da corrente no circuito estaria sendo limitada apenas pelo resistor R e, portanto, se este não existir, a fonte estará em curto-circuito.

Esse comportamento elétrico particular é denominado ressonância série e, sendo $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$, tem-se:

$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} \quad (3.72)$$

denominada frequência de ressonância

Pode-se considerar que os circuitos RL série e RC série estudados anteriormente são casos particulares do circuito RLC série.



O vídeo "Circuito RLC série" apresenta uma análise do respectivo comportamento elétrico.

EXERCÍCIOS

- 3.1 Para o circuito RL série com fonte c.c. (Fig. 3.2), prove que, imediatamente após o fechamento da chave, o indutor momentaneamente se comporta como um circuito aberto e que, para $t \rightarrow \infty$, o indutor comporta-se como um curto-circuito.
- 3.2 Para o circuito RC série com fonte c.c. (Fig. 3.4), prove que, imediatamente após o fechamento da chave, o capacitor momentaneamente se comporta como um curto-circuito e que, para $t \rightarrow \infty$, o capacitor comporta-se como um circuito aberto.
- 3.3 Com base no Exemplo 3.1, como seria possível diminuir o tempo de duração do regime transitório no circuito RL série com fonte de tensão senoidal? E quais seriam as consequências nas formas de ondas da corrente e das tensões nos bipolos?
- 3.4 Se variarmos a frequência da tensão senoidal fornecida pela fonte ao circuito RL série, quais seriam as consequências nas formas de ondas da corrente e das tensões nos bipolos?
- 3.5 Esboce, em relação a um mesmo eixo de referência, as duas formas de onda que você veria na tela de um osciloscópio, correspondentes à corrente e à tensão no indutor no circuito RL série com fonte de tensão senoidal.

Conceitos de fasor e impedância

No Cap. 3 foi apresentada a resolução de circuitos em corrente alternada no domínio do tempo por meio de uma formulação baseada em equações diferenciais, a qual pode apresentar níveis de dificuldade e trabalho bastante elevados.

Neste capítulo é proposto um método alternativo para a análise de circuitos em corrente alternada, que consiste na aplicação dos conceitos de fasor e impedância, propiciando uma maneira simples de obtenção dos valores das respectivas grandezas elétricas.

4.1 REVISÃO BÁSICA DE NÚMEROS COMPLEXOS

O conhecimento dos números complexos e das respectivas operações matemáticas é de fundamental importância para a análise de circuitos c.a. por meio dos conceitos de fasor e impedância.

Um número complexo z é representado por um par ordenado de números reais (x, y) , em que x é a parte real (Re) e y é a parte imaginária (Im) do número complexo z :

$$x = \text{Re}\{z\} \quad y = \text{Im}\{z\} \quad (4.1)$$

A representação de z no plano complexo está na Fig. 4.1, bem como do respectivo conjugado de z , o número complexo z^* , que é simétrico a z em relação ao eixo real.

Uma das expressões matemáticas para um número complexo corresponde à forma retangular:

$$z = x + j \cdot y \quad (4.2)$$

em que $j = \sqrt{-1}$.

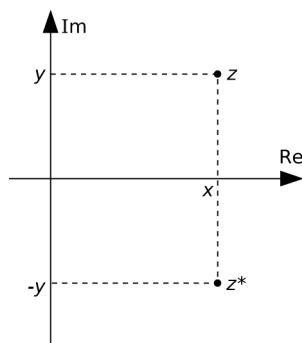


Fig. 4.1 Representação do número complexo

5.1.3 Impedância capacitiva

No caso de a impedância Z corresponder a uma carga puramente capacitiva na Fig. 5.1, tem-se:

$$R = 0 \quad |Z| = X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} \quad \varphi = -90^\circ \quad \text{ou} \quad \varphi = -\frac{\pi}{2} \text{ rad}$$

A expressão da potência instantânea é:

$$p(t) = \underbrace{U_{\text{ef}} \cdot I_{\text{ef}} \cdot \text{sen}(2\omega \cdot t)}_{\{B\}} \quad (5.6)$$

Como ocorre para a carga puramente indutiva, também são nulos a componente $\{A\}$ da Eq. (5.3) e o valor médio da potência instantânea.

As formas de onda das grandezas tensão, corrente e potência para uma carga puramente capacitiva estão representadas na Fig. 5.5.

Note que, nesse caso, a corrente está adiantada de 90° em relação à tensão e que a potência instantânea para o capacitor também assume valores positivos e negativos ao longo do tempo. No intervalo de tempo em que a potência assume valores positivos – que corresponde a um quarto de ciclo da tensão –, o capacitor recebe energia da fonte, e no intervalo de tempo seguinte, em que a potência assume valores negativos, o capacitor fornece energia à fonte. Assim, o capacitor também é considerado um elemento armazenador de energia, no sentido de que a energia armazenada durante um período de tempo é totalmente devolvida à fonte no período de tempo seguinte.

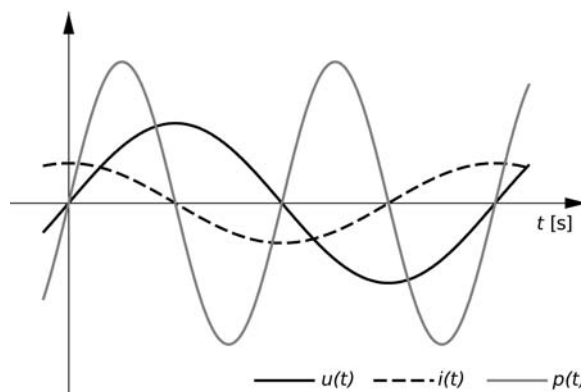


Fig. 5.5 Formas de onda para uma carga puramente capacitiva

5.1.4 Circuito RLC série

No caso de a impedância Z da Fig. 5.1 corresponder a uma conexão série de um resistor, um indutor e um capacitor, as formas de onda da tensão, da corrente e da potência podem ser, por exemplo, como as mostradas na Fig. 5.6.

Nesse caso, a corrente está adiantada em relação à tensão de um ângulo φ , indicando que a carga apresenta um comportamento predominantemente capacitivo. No entanto, φ pode variar de -90° a 90° , dependendo dos valores de R , L e C e da frequência.

A potência assume valores positivos e negativos ao longo do tempo, e o valor médio da potência fornecida corresponde ao valor constante da componente $\{A\}$ da Eq. (5.3):

$$P_m = U_{\text{ef}} \cdot I_{\text{ef}} \cdot \cos(\varphi)$$

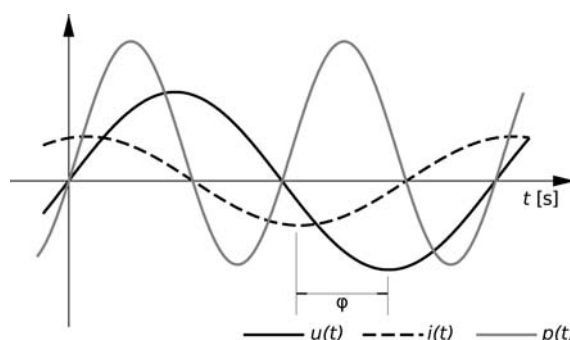


Fig. 5.6 RLC série com comportamento predominantemente capacitivo

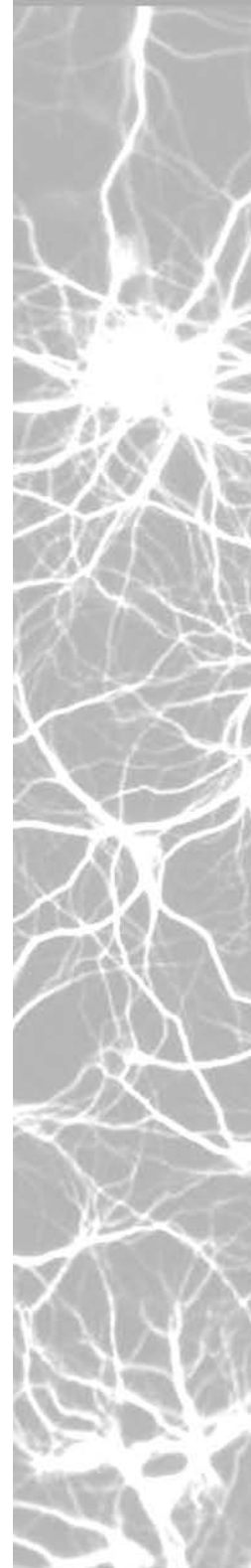
Transformadores

Neste capítulo analisa-se o princípio de funcionamento de um transformador. São apresentadas as relações entre tensões e correntes; a importância prática da polaridade dos enrolamentos; as características de operação de um transformador e a associação trifásica de transformadores monofásicos.

8.1 INTRODUÇÃO

Os primeiros sistemas comerciais de fornecimento de energia elétrica foram construídos basicamente para alimentar circuitos de iluminação, e funcionavam com corrente contínua. Como as tensões de fornecimento eram baixas (da ordem de 120 V), altas correntes eram necessárias para suprir grandes quantidades de potência e, assim, as perdas de potência ativa na transmissão (proporcionais ao quadrado da corrente), bem como as quedas de tensão, eram muito grandes. Com isso, a tendência foi construir pequenas centrais de geração distribuídas entre os pontos de carga, as quais, em função da pequena potência gerada, eram ineficientes e caras.

A posterior utilização de corrente alternada na geração, transmissão e distribuição de energia elétrica resultou em grande avanço na operação eficiente dos sistemas elétricos. Os geradores elétricos, que fornecem tensões relativamente baixas (da ordem de 15 a 25 kV), são ligados a transformadores, equipamentos eletromagnéticos que transformam um nível de tensão em outro. A tensão de saída de um transformador elevador ligado a um gerador pode ser de várias centenas de kV. Se a tensão é maior, a mesma potência pode ser transmitida com correntes menores, diminuindo as perdas e as quedas de tensão. Consequentemente, as centrais geradoras podem ser maiores e a transmissão pode ser feita a longas distâncias. Nos pontos de consumo, são ligados transformadores abaixadores, que reduzem as tensões para níveis compatíveis com os equipamentos dos consumidores.



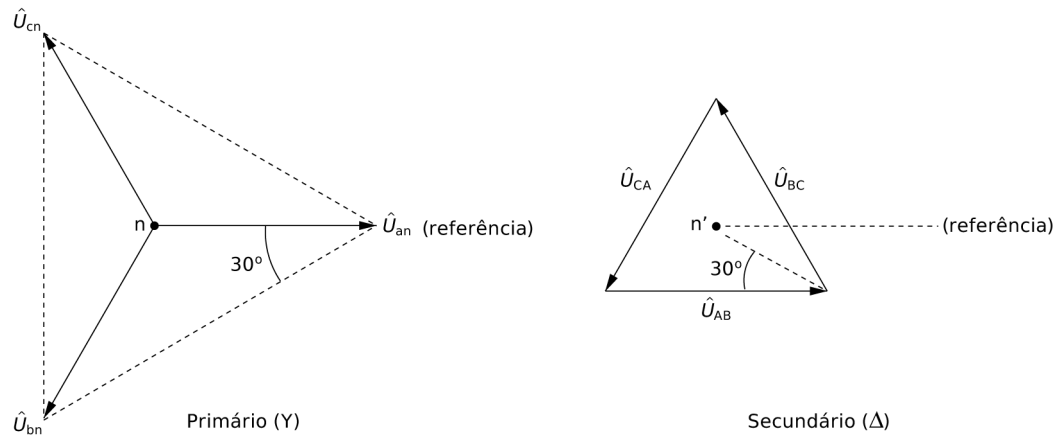


Fig. 8.23 Diagrama fasorial para a conexão Y-Δ

Exemplo 8.7

Considere uma conexão Δ-Y de transformadores monofásicos com 1.000 espiras no primário e 100 no secundário. Se, no primário, a tensão de linha é de 1.270 V e a corrente de linha é de 11 A, obtenha a tensão de linha e a corrente de linha no secundário.

Como a tensão de linha é de 1.270 V no primário em Δ, basta aplicar a relação de espiras 10:1 para obter na bobina secundária uma tensão de fase igual a 127 V e uma tensão de linha igual a 220 V.

Como a corrente de linha é de 11 A no primário em Δ, basta dividir por $\sqrt{3}$ e aplicar a relação de espiras 10:1 para obter no secundário uma corrente de linha igual a 63,5 A.

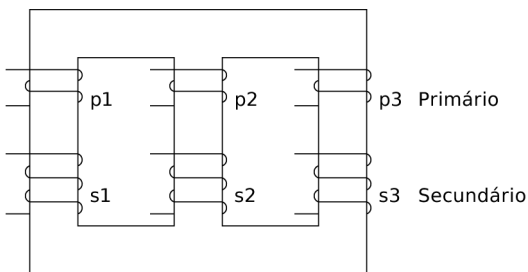


Fig. 8.24 Transformador trifásico

Na prática, os transformadores utilizados também podem ter seus enrolamentos instalados em um mesmo núcleo (Fig. 8.24) e seu funcionamento é idêntico ao do banco trifásico.

A ligação em Y ou Δ dos enrolamentos é estabelecida por meio da conexão dos seus terminais, como indicado na Fig. 8.25.

Para realizar corretamente essa conexão, é fundamental conhecer a polaridade relativa dos enrolamentos (seção 8.7). Qualquer inversão pode colocar duas fases em curto-circuito ou desequilibrar o circuito magnético. Essencialmente, para a

conexão em Y, forma-se o neutro com os terminais que têm a mesma polaridade, e para a conexão em Δ, conectam-se os terminais com polaridades contrárias.

8.9 TRANSMISSÃO E DISTRIBUIÇÃO DA ENERGIA ELÉTRICA

A transmissão da energia elétrica gerada nas diferentes usinas (hidrelétricas, termelétricas etc.) ocorre em alta tensão, e isso é possível porque transformadores estão instalados

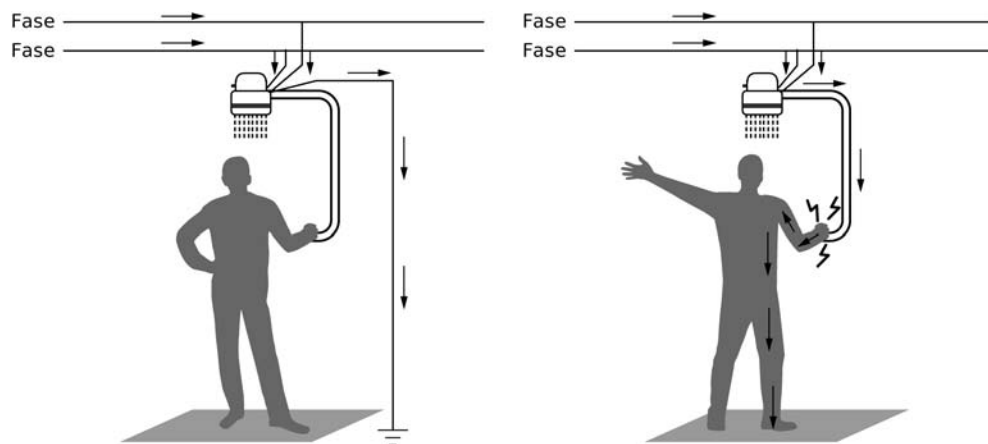


Fig. 9.13 Choque elétrico por contato indireto

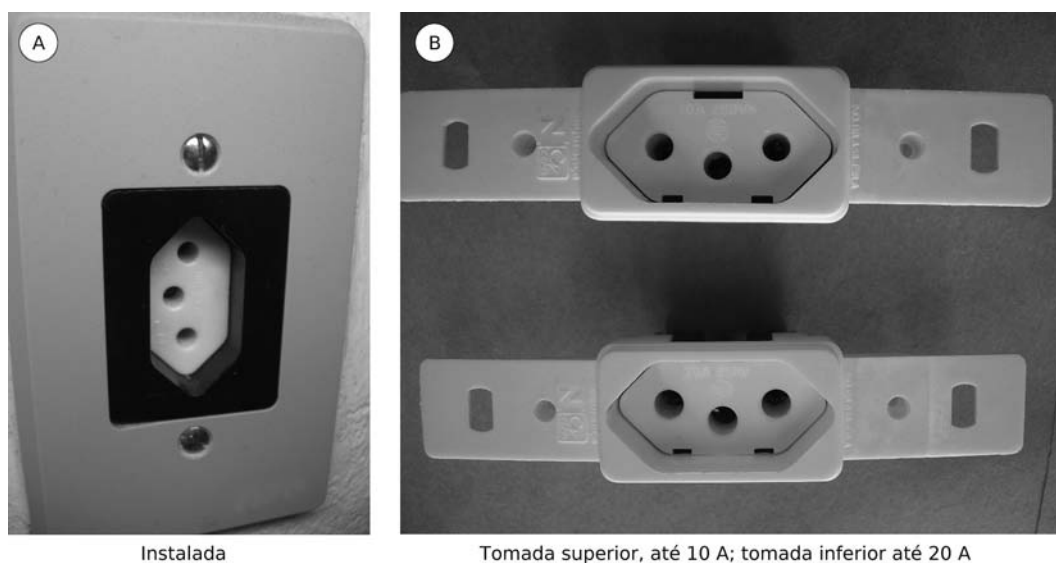


Fig. 9.14 Tomada padrão – norma ABNT NBR 14136

Essa configuração contempla avanços importantes em relação a outros modelos nos seguintes aspectos:

- a) **Segurança:** devido à existência do rebaixo na face da tomada, não existe o risco de choque elétrico, pois o usuário fica impossibilitado de contato acidental nos pinos do plugue quando este está em contato com a parte viva do terminal. Como o rebaixo também serve como um eficiente guia, fica impossível o usuário levar choque elétrico na tentativa de encaixar o plugue na tomada usando o dedo como guia no movimento de inserção.
- b) **Contato de aterramento:** a obrigatoriedade do contato de aterramento no polo central aumenta a segurança do usuário e atende à exigência da norma de instalações elétricas ABNT NBR 5410.

- isolações deterioradas.

O Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo recomenda:

- Faça o aterramento nos circuitos elétricos dimensionados, para evitar choques elétricos e danos nos eletrodomésticos.
- Execute a instalação elétrica conforme a norma ABNT NBR 5410.
- Utilize disjuntores do tipo DR (dispositivo de proteção à corrente diferencial-residual), especialmente em áreas molhadas (cozinhas, banheiros etc).
- Não execute instalações elétricas provisórias ou precárias (gambiarras), para não ocorrer sobrecarga da rede e possível curto-circuito.
- Quando for realizar reparos nas instalações elétricas, procure sempre um profissional habilitado e credenciado.
- Realize periodicamente manutenção preventiva nas instalações elétricas, pois estas possuem vida útil limitada.
- Não utilize benjamins ou outro tipo de extensão nas tomadas de uso geral ou específica, para não ocorrer sobrecarga na rede e possível curto-circuito.

Mais detalhes podem ser obtidos em <<http://www.programacasasegura.org/br>>.

9.9 LÂMPADAS DE USO POPULAR

Desde que Thomas Alva Edison, utilizando um filamento de carvão inserido em um invólucro de vidro selado, inventou a primeira lâmpada elétrica prática, em 1879 (patenteada em

27/1/1880), a tecnologia da iluminação evoluiu para a produção de diferentes tipos de lâmpadas, como se pode constatar por meio dos catálogos dos fabricantes. A seguir, são descritas lâmpadas de uso popular.

9.9.1 Lâmpada incandescente

Os principais componentes do tipo mais comum de lâmpada incandescente estão indicados na Fig. 9.23.

A base serve para conectar a lâmpada ao receptáculo (soquete). Para a iluminação geral, existem no comércio as bases dos tipos rosca (Fig. 9.23) e baioneta, identificadas respectivamente pelas letras E (Edson) e B, seguidas por um número que indica o diâmetro da base em milímetros. O material da base geralmente é latão, alumínio ou níquel. O filamento de uma lâmpada incandescente é colocado em um invólucro de vidro selado, denominado bulbo, disponível em uma grande

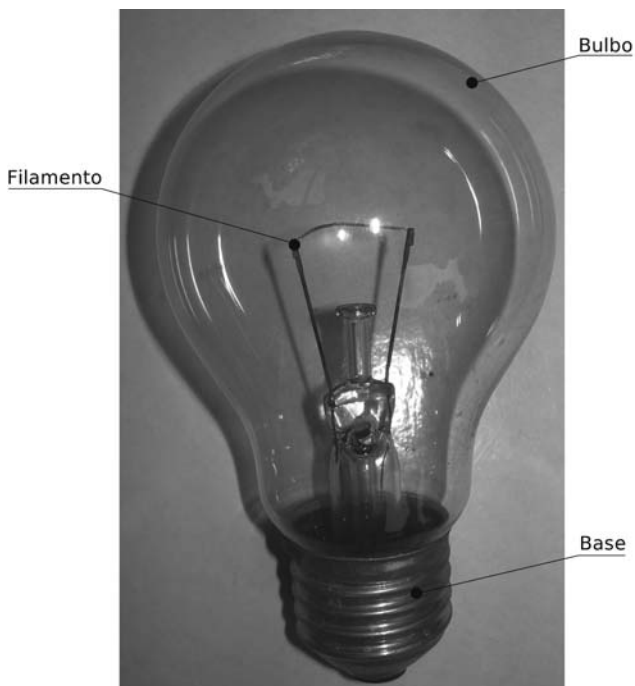


Fig. 9.23 Lâmpada incandescente