

Coleção UAB–UFSCar

Tecnologia Sucroalcooleira

Antonio Frederico Comin

Conhecendo as instalações elétricas



Conhecendo as instalações elétricas

**Reitor**

Targino de Araújo Filho

Vice-Reitor

Adilson J. A. de Oliveira

Pró-Reitora de Graduação

Claudia Raimundo Reyes

**Secretária de Educação a Distância - SEaD**

Aline M. de M. R. Realí

Coordenação SEaD-UFSCar

Daniel Mill

Denise Abreu-e-Lima

Glauber Lúcio Alves Santiago

Joice Otsuka

Marcia Rozenfeld G. de Oliveira

Sandra Abib

Vânia Paula de Almeida Neris

Coordenação UAB-UFSCar

Daniel Mill

Denise Abreu-e-Lima

**Coordenador do Curso de
Tecnologia Sucoalcooleira**

Gilberto Miller Devós Ganga

UAB-UFSCar

Universidade Federal de São Carlos

Rodovia Washington Luís, km 235

13565-905 - São Carlos, SP, Brasil

Telefax (16) 3351-8420

www.uab.ufscar.br

uab@ufscar.br

**Conselho Editorial**

José Eduardo dos Santos

José Renato Coury

Nivaldo Nale

Paulo Realí Nunes

Oswaldo Mário Serra Truzzi (Presidente)

Secretária Executiva

Fernanda do Nascimento

Diretor da EdUFSCar

Oswaldo Mário Serra Truzzi

EdUFSCar

Universidade Federal de São Carlos

Rodovia Washington Luís, km 235

13565-905 - São Carlos, SP, Brasil

Telefax (16) 3351-8137

www.editora.ufscar.br

edufscar@ufscar.br

Antonio Frederico Comin

Conhecendo as instalações elétricas

São Carlos



EdUFSCar

2012

© 2012, Antonio Frederico Comin

Concepção Pedagógica

Daniel Mill

Supervisão

Douglas Henrique Perez Pino

Equipe de Revisão Linguística

Clarissa Galvão Bengtson

Daniel William Ferreira de Camargo

Gabriel Hayashi

Letícia Moreira Clares

Sara Naime Vidal Vital

Tássia Lopes de Azevedo

Equipe de Editoração Eletrônica

Izis Cavalcanti

Equipe de Ilustração

Maria Julia Barbieri Mantoanelli

Capa e Projeto Gráfico

Luís Gustavo Sousa Sguissardi

Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da Biblioteca Comunitária da UFSCar

C733c

Comin, Antonio Frederico.

Conhecendo as instalações elétricas / Antonio Frederico Comin.

-- São Carlos : EdUFSCar, 2012.

201 p. -- (Coleção UAB-UFSCar).

ISBN – 978-85-7600-335-9

1. Instalações elétricas. 2. Eficiência energética. 3. Choques elétricos - medidas de segurança. 4. Energia industrial. 5. Eletricidade - controle. I. Título.

CDD – 621.31924 (20ª)

CDU – 621.316.17

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO	13
---------------------------	----

UNIDADE 1: Revisão de eletricidade básica

1.1 Primeiras palavras	17
1.2 Problematizando o tema	17
1.3 Texto básico para estudos	17
1.3.1 Tensão Contínua (DC)	17
1.3.1.1 Primeira Lei de Ohm	18
1.3.1.2 Segunda Lei de Ohm	18
1.3.2 Potência elétrica	20
1.3.3 Associação de cargas elétricas	23
1.3.4 Condutores de energia	29
1.3.5 Energia elétrica	31
1.3.5.1 Energia consumida	31
1.3.5.2 Transformação de energia elétrica em térmica	32
1.4 Considerações finais	33
1.5 Exercícios	33
1.5.1 Respostas dos exercícios	34
1.6 Estudos complementares	34
1.6.1 Saiba mais	34
1.6.2 Outras referências	34

UNIDADE 2: Fundamentos da corrente alternada

2.1	Primeiras palavras	37
2.2	Problematizando o tema	37
2.3	Texto básico para estudos	37
2.3.1	Tensão alternada	37
2.3.1.1	Corrente alternada	38
2.3.1.1.1	Defasamento angular	40
2.3.1.2	Cargas resistivas em circuitos de corrente alternada	41
2.3.1.2.1	Potência em circuitos resistivos de corrente alternada	42
2.3.1.2.2	Circuitos com cargas em paralelo	43
2.3.1.3	Cargas indutivas em circuitos de corrente alternada	45
2.3.1.3.1	Representação da impedância: triângulo da impedância	47
2.3.1.3.2	Potência em um circuito puramente indutivo	48
2.3.1.3.3	Potência em um circuito indutivo real ($\theta < 90^\circ$)	49
2.3.1.3.4	Análise de um circuito	52
2.3.1.4	Cargas capacitivas em circuitos de corrente alternada	54
2.3.1.4.1	Potência em um circuito capacitivo ideal	56
2.3.1.4.2	Potência em circuito capacitivo com perdas	57
2.4	Considerações finais	58
2.5	Exercícios	60
2.5.1	Respostas dos exercícios	64
2.6	Estudos complementares	66
2.6.1	Saiba mais	66
2.6.2	Outras referências	66

UNIDADE 3: Geração, transmissão e distribuição de energia elétrica

3.1	Primeiras palavras.....	69
3.2	Problematizando o tema	69
3.3	Texto básico para estudos.....	69
3.3.1	Conceito de energia.....	69
3.3.2	Fontes de energia elétrica	70
3.3.2.1	Fontes renováveis e não renováveis de energia.....	70
3.3.2.2	Usinas hidrelétricas.....	71
3.3.2.3	Usinas termelétricas	72
3.3.2.4	Usinas nucleares	72
3.3.2.5	Energia eólica	73
3.3.3	Geração e cogeração de energia elétrica.....	73
3.3.3.1	Gerador de tensão trifásica.....	74
3.3.3.1.1	Ligação em estrela (Y).....	76
3.3.3.1.2	Ligação em triângulo (D).....	81
3.3.3.1.3	Potência da corrente trifásica nas ligações estrela e triângulo	82
3.3.4	Transmissão de energia elétrica	85
3.3.5	Distribuição e utilização de energia elétrica.....	86
3.4	Considerações finais.....	86
3.5	Exercícios	87
3.5.1	Respostas dos exercícios	89
3.6	Estudos complementares	91
3.6.1	Saiba mais.....	91
3.6.2	Outras referências.....	91

UNIDADE 4: Instalações elétricas

4.1	Primeiras palavras.....	95
4.2	Problematizando o tema	95
4.3	Texto básico para estudos.....	95
4.3.1	Generalidades	95
4.3.2	Condutores de energia elétrica	98
4.3.2.1	Temperatura	100
4.3.2.2	Capacidade de condução de corrente	101
4.3.2.3	Queda de tensão admissível	104
4.3.2.4	Fator de demanda	106
4.3.2.5	Eletrodutos	106
4.3.3	Choque elétrico	107
4.3.3.1	Proteção contra choques elétricos.....	109
4.3.4	Sistema de aterramento	110
4.3.5	Dispositivo de proteção contra sobrecorrentes.....	111
4.3.5.1	Fusíveis	112
4.3.5.1.1	Características elétricas	112
4.3.5.1.2	Tipos de fusíveis.....	114
4.3.5.1.2.1	Fusíveis rápidos e retardados.....	114
4.3.5.1.2.2	Fusíveis tipo Diazed	115
4.3.5.2	Disjuntores termomagnéticos em caixa moldada	117
4.3.5.2.1	Funcionamento.....	118
4.3.5.2.2	Características nominais.....	119
4.3.5.2.3	Fusível e disjuntor termomagnético: características comparativas	120
4.4	Considerações finais.....	122
4.5	Exercícios	122
4.5.1	Respostas dos exercícios	123

4.6 Estudos complementares	124
4.6.1 Saiba mais	124

UNIDADE 5: Eficiência energética

5.1 Primeiras palavras	127
5.2 Problematizando o tema	127
5.3 Texto básico para estudos	127
5.3.1 Definição de eficiência energética	127
5.3.2 Consumo, demanda, fator de carga e intervalo de integração	128
5.3.2.1 Por que se preocupar com a demanda e o período de integração?	129
5.3.2.2 Fator de carga (FC)	130
5.3.3 Tarifação da energia elétrica	131
5.3.3.1 O que isso significa na prática?	131
5.3.3.1.1 Tarifa convencional	131
5.3.3.1.2 Tarifa horossazonal (THS)	133
5.3.3.1.2.1 Tarifa horossazonal azul	134
5.3.3.1.2.2 Tarifa horossazonal verde	136
5.3.3.1.3 Enquadramento tarifário	137
5.3.3.1.3.1 Como saber em que modalidade tarifária se enquadrar e o modo mais econômico possível?	137
5.3.3.1.3.2 O que significa ter um alto FC? ..	138
5.3.3.1.3.3 Como saber o perfil de consumo de uma indústria?	139
5.3.3.2 Exemplo de aplicação	139
5.3.4 Controle e análise de consumo e demanda	143
5.3.5 Energia e produção	143
5.3.6 Fator de potência, causas, consequências e correção	146

5.3.6.1	Introdução	146
5.3.6.2	Consequências do baixo fator de potência.	147
5.3.6.3	Causas do baixo fator de potência.	149
5.3.6.4	Correção do fator de potência	149
5.3.6.5	Vantagens da correção do fator de potência	150
5.3.6.6	Exemplo de aplicação	152
5.4	Considerações finais.	153
5.5	Exercícios	153
5.5.1	Respostas dos exercícios	155
5.6	Estudos complementares	155
5.6.1	Saiba mais.	155
5.6.2	Outras referências.	156

UNIDADE 6: Instalações industriais

6.1	Primeiras palavras	159
6.2	Problematizando o tema.	159
6.3	Texto básico para estudos	159
6.3.1	Transformador de potência	159
6.3.1.1	Potência nominal.	161
6.3.1.2	Tensão nominal	162
6.3.1.3	Tensão nominal de curto-circuito	163
6.3.1.4	Componentes percentuais da tensão nominal de curto-circuito	164
6.3.1.5	Perdas elétricas	165
6.3.1.6	Regulação	165
6.3.1.7	Rendimento.	166
6.3.1.8	Líquido isolante.	167
6.3.1.9	Especificação.	167

6.3.2	Motores elétricos de corrente alternada	168
6.3.2.1	Motores trifásicos	168
6.3.2.1.1	Motores de indução	169
6.3.2.2	Rendimento de uma máquina	173
6.3.2.3	Motores monofásicos de indução	174
6.3.2.4	Motores do tipo universal	176
6.3.2.5	Motores assíncronos trifásicos com rotor em gaiola	176
6.3.2.5.1	Potência nominal	177
6.3.2.5.2	Tensão nominal	182
6.3.2.5.3	Corrente nominal	182
6.3.2.5.4	Frequência nominal	183
6.3.2.5.5	Fator de serviço	183
6.3.2.5.6	Perdas ôhmicas	184
6.3.3	Iluminação	185
6.3.3.1	Introdução	185
6.3.3.2	Fluxo luminoso	185
6.3.3.3	Rendimento luminoso (h) ou eficiência luminosa	186
6.3.3.4	Iluminamento ou iluminância	186
6.3.3.5	Refletância	187
6.3.3.6	Método dos lumens ou dos rendimentos	189
6.3.3.6.1	Coeficiente de utilização ou índice de forma	189
6.3.3.6.1.1	Expressão geral (tabelas)	190
6.3.3.6.2	Tabelas para a determinação do coeficiente de utilização	191
6.3.3.6.3	Exemplo de aplicação	191
6.3.3.6.4	Critério de espaçamento mínimo	192
6.4	Considerações finais	193
6.5	Exercícios	193
6.5.1	Respostas dos exercícios	195
6.6	Estudos complementares	196

6.6.1 Saiba mais.....	196
6.6.2 Outras referências.....	197

REFERÊNCIAS	199
--------------------------	------------

APRESENTAÇÃO

As instalações elétricas representam o último elo entre a distribuição de energia e sua utilização nos pontos de consumo. Assim, o seu dimensionamento correto envolve o conhecimento de itens fundamentais da eletricidade, aqui divididos em unidades de estudo. Iniciamos a Unidade 1 com uma revisão de eletricidade básica. Na Unidade 2, apresentamos os fundamentos da corrente alternada. Na Unidade 3, descrevemos o Sistema Elétrico de Potência (SEP) formado pela geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Já na Unidade 4, introduzimos os conceitos básicos de instalações elétricas com seus dispositivos de proteção dos circuitos e da segurança dos usuários contra choques elétricos. Na Unidade 5, estudamos as formas como a energia elétrica é cobrada na indústria e a melhor opção tarifária para cada instalação. Finalmente, na Unidade 6, apresentamos a instalação elétrica industrial com seus componentes típicos e possíveis aplicações dos motores para acionamentos de máquinas.

O profissional que atua na área de açúcar e álcool precisa conhecer os termos técnicos relacionados com as instalações elétricas para ter condições de usar racionalmente a eletricidade. Na composição do custo de um determinado produto, a energia elétrica representa um valor considerável e precisa ser controlada.

UNIDADE 1

Revisão de eletricidade básica

1.1 Primeiras palavras

Atualmente, é enorme e crescente a influência que a energia elétrica exerce em todos os setores da atividade humana. Somos, a cada dia, mais dependentes dessa energia no lar, no trabalho, nos locais de lazer, de compras, enfim, em toda parte.

Nesta primeira unidade, serão revisados alguns conceitos de eletricidade estudados no ensino de segundo grau.

1.2 Problematizando o tema

Os aparelhos eletrônicos portáteis funcionam com pilhas ou baterias. Cada pilha comum fornece 1,5 VDC de tensão elétrica contínua. Assim, um aparelho que utiliza quatro pilhas do tipo AA é alimentado em 6 VDC porque as quatro pilhas estão associadas em série.

Quando o aparelho é ligado, passa a consumir energia elétrica na forma de corrente elétrica. Nesta unidade, vamos aprender a calcular o valor da corrente elétrica conhecendo a tensão e a resistência da carga ligada na fonte de alimentação.

1.3 Texto básico para estudos

Antes de entrarmos no tema dos fundamentos de corrente alternada, vamos recordar os conceitos de eletricidade básica.

1.3.1 Tensão Contínua (DC)

A energia fornecida por uma pilha (1,5 V) ou uma bateria (9 V) é disponibilizada com tensão contínua em seus terminais. O valor é constante com o tempo, decrescendo apenas com o uso, devido a mudanças nas suas propriedades físicas e químicas.

A transferência dessas fontes de energia para os aparelhos consumidores é feita através de circuitos elétricos com condutores do tipo *fiões* ou *cabos*.

1.3.1.1 Primeira Lei de Ohm

A intensidade da corrente elétrica em um circuito é diretamente proporcional à tensão aplicada e inversamente proporcional à sua resistência. Matematicamente podemos escrever:

$$I = \frac{U}{R}$$

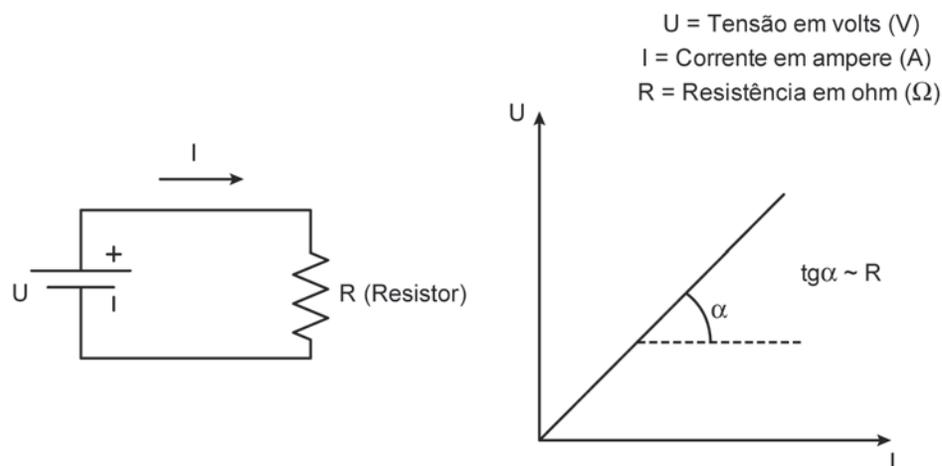


Figura 1 Circuito elementar.

1.3.1.2 Segunda Lei de Ohm

A resistência elétrica de um condutor é diretamente proporcional ao produto da resistividade específica pelo seu comprimento e inversamente proporcional à sua área de seção transversal. Matematicamente podemos escrever:

$$R = \frac{\rho L}{S}$$

em que:

R = resistência elétrica expressa em ohms (Ω);

L = comprimento do condutor em metros (m);

S = área da seção transversal do condutor em milímetros quadrados (mm²);

ρ = resistividade elétrica do material em (Ω · mm²/m) ou (Ω · m).

σ (letra grega sigma) = 1/ρ [condutividade elétrica (siemens/metro)].

$$U = R \cdot I \Rightarrow U = \frac{\rho \cdot L \cdot I}{S} \Rightarrow \frac{I}{S} = \frac{U}{\rho \cdot L}$$

$$\frac{I}{S} = j = \text{densidade de corrente} \left[\frac{\text{A}}{\text{m}^2} \right]$$

$$\frac{U}{L} = E = \text{campo elétrico} \left[\frac{\text{V}}{\text{m}} \right]$$

$$j = \sigma \cdot E$$

Exemplo: alumínio + 1,2% de manganês.

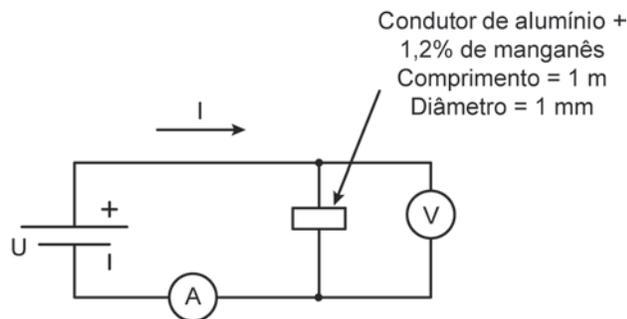


Figura 2 Circuito equivalente.

$$d = 1 \text{ mm} \Rightarrow S = 0,785 \text{ mm}^2 = 0,785 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$$

$$l = 1 \text{ m}$$

$$\Delta V = 432 \text{ mV}$$

$$I = 10 \text{ A}$$

Calcular σ :

$$R = V/I = \frac{432 \cdot 10^{-3}}{10} = 43,2 \cdot 10^{-3} \Omega$$

$$R = \rho \frac{l}{S} \Rightarrow \rho = \frac{RS}{l} = \frac{43,2 \cdot 10^{-3} \cdot 0,785 \cdot 10^{-6}}{1} \Rightarrow \rho = 33,9 \cdot 10^{-9} \Omega \cdot \text{m}$$

$$\sigma = 1/\rho = 1/33,9 \cdot 10^{-9} \text{ S/m}$$

1.3.2 Potência elétrica

Potência dissipada por um resistor:

$$P = R \cdot I^2 = U \cdot I = U^2/R \quad \text{Watt (joule/segundo) W}$$

Essas expressões podem ser aplicáveis em qualquer circuito de corrente contínua (CC ou DC) ou de corrente alternada (CA ou AC) puramente resistivo.

Exemplo: qual a resistência do filamento de uma lâmpada incandescente com:

40 W – potência nominal?

120 V – tensão nominal?

$$R = U^2/P = (120)^2/40 = 360 \, \Omega$$

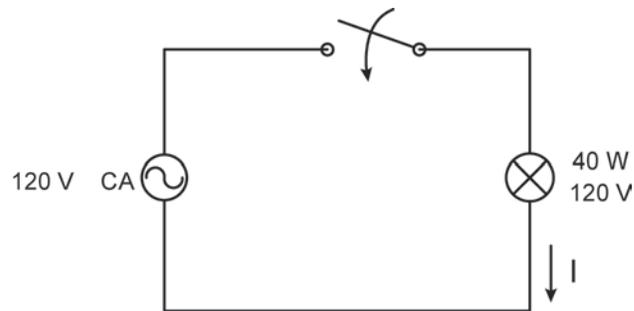


Figura 3 Circuito equivalente.

Que corrente circulará pela lâmpada quando a tensão for 120 V?

$$I = U/R = 120/360 = 0,33 \text{ A}$$

Para outra lâmpada com potência nominal $P = 40 \text{ W}$ e tensão $U = 220 \text{ V}$:

$$R = U^2/P = 1210 \, \Omega \quad \Rightarrow \quad I = U/R = 220/1210 = 0,18 \text{ A}$$

Se aplicarmos 120 V nessa lâmpada:

$$I = 120/1210 \cong 0,099 \text{ A}$$

$$P = R \cdot I^2 = 1210 (0,099)^2 = 11,9 \text{ W} \sim 30\%$$

Se aplicarmos 220 V na lâmpada de 40 W e 120 V:

$$I = U/R = 220/360 = 0,6 \text{ A}$$

$$P = U \cdot I = 132 \text{ W}$$

Exemplo: quando a chave do chuveiro é mudada de *inverno* para *verão*, a resistência está aumentando ou diminuindo?

em que:

Potência de um chuveiro = 4000 W (*verão*) \Rightarrow 6500 W (*inverno*) \Rightarrow 220 V

Chave na posição *verão* = 4000 W

$$R = U^2/P = 12,1 \Omega \quad I = U/R = 18,2 \text{ A}$$

Chave na posição *inverno* = 6500 W

$$R = U^2/P = 7,45 \Omega \quad I = U/R = 220/7,45 = 29,5 \text{ A}$$

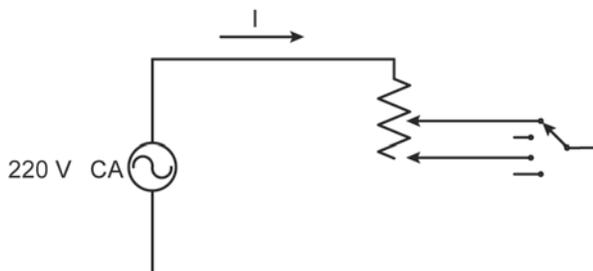


Figura 4 Circuito equivalente.

Resposta: a resistência está aumentando.

Para um chuveiro de 4000 W, qual é a melhor tensão de alimentação, 110 ou 220 V?

Para alimentação em 110 V, temos:

$$R = (110)^2/4000 = 3,02 \Omega \quad I = U/R = 110/3,02 = 36,4 \text{ A}$$

Consequências:

- sobrecorrente (aquece o condutor);
- maior queda de tensão na instalação;
- menor durabilidade.

Para alimentação em 220 V, temos:

$$R = (220)^2 / 4000 = 12,1 \Omega \quad I = U/R = 220/12,1 = 18,2 \text{ A}$$

Resposta: a melhor tensão para alimentação de um chuveiro de 4000 W é 220 V, porque a corrente é metade do valor na tensão de 110 V, de forma que poderemos utilizar condutores de secção menor.

$$\text{Se } U = 220 \text{ V} \Rightarrow I_{220} = \frac{I_{110}}{2}$$

Tabela 1 Exemplos de aparelhos com suas potências e correntes típicas para 110 V.

Aparelho	Potência nominal (P) (de entrada)	Corrente p/110 V $I = P/U$
Batedeira Liquidificador Projektor de slides Televisor Aparelho de som Ventilador de pé	100-300 W (watt)	0,9-2,7 A
Freezer	400 VA (volt-ampere)	3,6 A
Geladeira	150-400 VA	1,36-3,6 A
Retroprojektor	1200 W	10,9 A
Secador de cabelos	500-1200 W	4,5-10,9 A
Forno residencial	4500 W	40,9 A
Torneira elétrica	2800-4500 W	25,5-40,9 A
Chuveiro	4000-6500 W	36,4-59,1 A
Aspirador de pó (residencial)	500-1000 W	4,5-9,1 A
Condicionador de ar (janela)	900-3600 W	8,2-32,7 A
Lavadora de roupas (residencial)	770 VA	7 A
Ferro elétrico Torradeira	600-1100 W	5,4-10 A

1.3.3 Associação de cargas elétricas



Figura 5 Circuitos com cargas em série.

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n$$

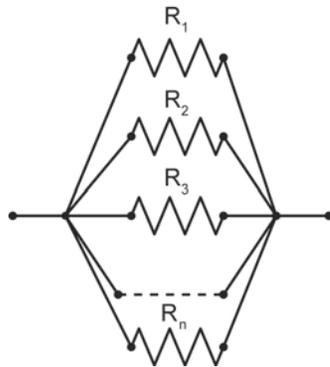
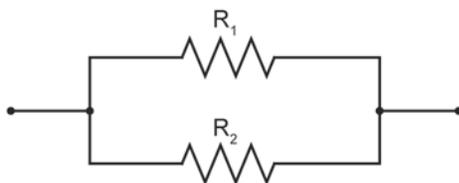


Figura 6 Circuitos com cargas em paralelo.

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n}$$

Se $n = 2$:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \Rightarrow R_{eq} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$



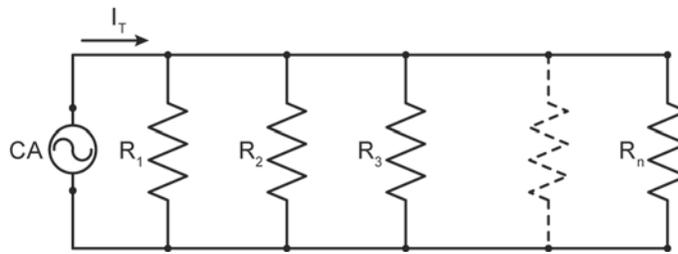


Figura 7 Instalações residenciais (todos os aparelhos ligados em paralelo).

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n}$$

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{\frac{U_1^2}{P_1}} + \frac{1}{\frac{U_2^2}{P_2}} + \frac{1}{\frac{U_3^2}{P_3}} + \dots + \frac{1}{\frac{U_n^2}{P_n}}$$

Como $U_1 = U_2 = \dots = U_n$ em paralelo,

$$R_{eq} = \frac{U^2}{P_1 + P_2 + \dots + P_n} \quad I_T = \frac{U}{R_{eq}} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{U}$$

Exemplo: queda de tensão nos condutores.

Considerar duas cargas ligadas em paralelo, sendo uma lâmpada incandescente de 200 W/110 V e um chuveiro de 4000 W/110 V. O condutor utilizado é um cabo com secção de 1,5 mm² com resistência elétrica de 0,01 Ω/m e comprimento total de 2 x 15 m. O desenho desse circuito está na Figura 8.

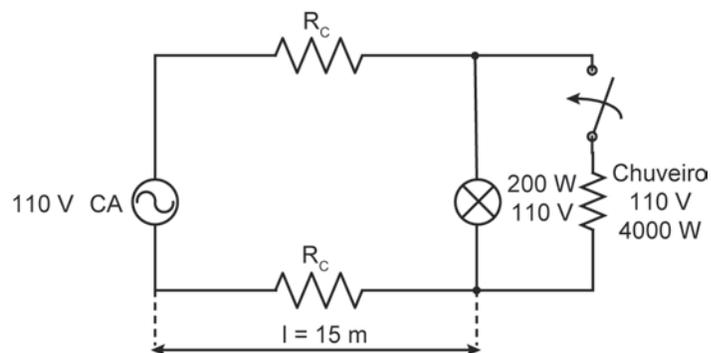


Figura 8 Circuito equivalente.

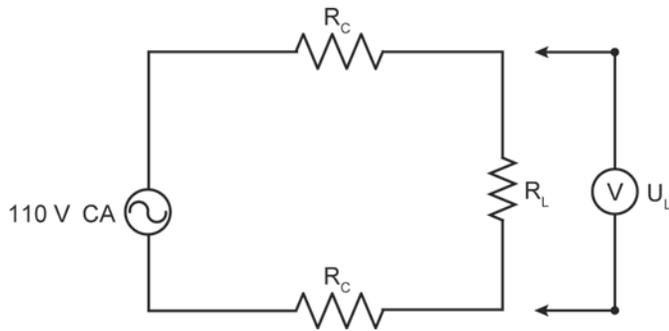


Figura 9 Chuveiro desligado.

$$R_{eq} = R_c + R_c + R_L$$

em que:

$$R_c = 0,01 \cdot 15 = 0,15 \, \Omega \text{ e } R_L = 110^2 / 200 = 60,5 \, \Omega$$

Assim,

$$R_{eq} = 0,3 + 60,5 = 60,8 \, \Omega$$

$$I = \frac{110}{60,8} = 1,8 \, A$$

$$\text{Tensão na lâmpada: } U_L = R_L \cdot I = 60,5 \cdot 1,8 = 109,5 \, V$$

$$\text{Queda porcentual na lâmpada: } \frac{110 - 109,5}{110} = 0,0045 \approx 0,45\%$$

Em instalações residenciais, esse valor não deve ultrapassar 4%.

$$\text{Queda de tensão nos condutores: } \Delta V_c = 2R_c \cdot I = 0,3 \cdot 1,8 = 0,54 \, V$$

$$\text{Potência dissipada nos condutores: } P = 2R_c \cdot I^2 = 0,3 (1,8)^2 = 0,98 \, W$$

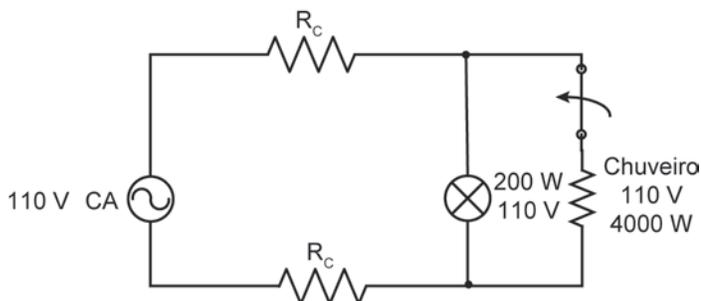


Figura 10 Chuveiro ligado.

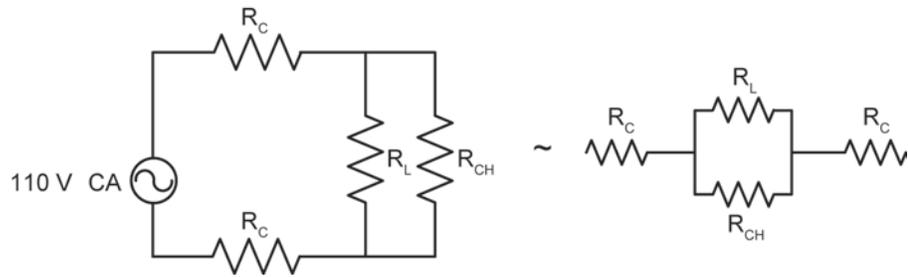


Figura 11 Circuito equivalente com o chuveiro ligado.

$$R_c = 0,15 \, \Omega$$

$$R_L = 60,5 \, \Omega$$

$$R_{ch} = \frac{(110)^2}{4000} = 3,02 \, \Omega$$

$$R_{eq} = R_c + \frac{R_L \cdot R_{ch}}{R_L + R_{ch}} + R_c = 0,15 + \frac{60,5 \cdot 3,02}{60,5 + 3,02} \cong 3,2 \, \Omega$$

$\underbrace{\hspace{10em}}_{2,9 \, \Omega}$

$$I = \frac{110}{3,2} = 34,4 \, A$$

Tensão na lâmpada e no chuveiro: $\Delta V = 2,9 \cdot 34,4 = 99,76 \, V$

Queda de tensão porcentual: $\frac{110 - 99,76}{110} = 0,093 \cong 9,3\%$

Potência dissipada na lâmpada: $P_L = \frac{U^2}{R_L} = \frac{(99,76)^2}{60,5} = 164,5 \, W \, (82\%)$

Potência dissipada no chuveiro: $P_{ch} = \frac{(99,76)^2}{3,02} = 3295,4 \, W \, (82\%)$

Queda de tensão nos condutores: $\Delta V_c = 0,3 \cdot 34,3 = 10,3 \, V$

Potência dissipada nos condutores: $P = 0,3 \cdot (34,4)^2 = 355 \, W$

Para uma corrente de 34 A, a secção do condutor deve ser de 6 mm².

Se U = 220 V:

$$R_{ch} = \frac{(220)^2}{4000} = 12,1 \Omega$$

$$R_L = \frac{(220)^2}{200} = 242 \Omega$$

$$R_{eq} = 0,15 + 0,15 + \frac{12,1 \cdot 242}{12,1 + 242} = 11,8 \Omega$$

$$I = \frac{220}{11,8} = 18,6 \text{ A}$$

Tensão na lâmpada e no chuveiro: $U_L = U_{ch} = U = R_{L+ch} \cdot I = 11,5 \cdot 18,6 = 213,9 \text{ V}$

Queda porcentual: $\frac{220 - 213,9}{220} = 0,027 \approx 3\%$

$$P_{ch} = \frac{(213,9)^2}{12,1} = 3781 \text{ W (94\%)}$$

$$P_L = \frac{(213,9)^2}{242} = 189 \text{ W (94\%)}$$

Fio que deve ser utilizado para corrente de 18,6 A $\Rightarrow S = 2,5 \text{ mm}^2$.

Exemplo: tensão nominal = 115 V (tensão efetiva). Calcular I_T , I_1 , I_2 , I_3 e I_4 .

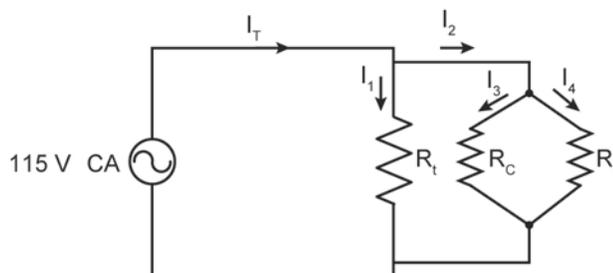


Figura 12 Circuito equivalente.



Figura 13 Tomadas de energia na prática.

Resolvendo:

$$I_T = I_1 + I_2 = I_1 + I_3 + I_4$$

$$R_T = \frac{U^2}{P} = \frac{(115)^2}{600} = 22 \, \Omega$$

$$R_C = \frac{(115)^2}{1000} = 13,2 \, \Omega$$

$$R_F = \frac{(115)^2}{1100} = 12 \, \Omega$$

$$R_{eq} = \frac{U^2}{P_T + P_C + P_F} = \frac{(115)^2}{2700} = 4,9 \, \Omega$$

$$I_T = \frac{115}{4,9} = 23,4 \, \text{A (total)}$$

$$I_1 = \frac{115}{22} = 5,2 \, \text{A}$$

$$I_3 = \frac{115}{13,2} = 8,7 \, \text{A}$$

$$I_4 = \frac{115}{12} = 9,6 \, \text{A}$$

} I_2

Se houvesse um benjamim (popularmente conhecido como “T”): $I_2 = 8,7 + 9,6 = 18,3 \, \text{A}$.

No entanto, o uso desse tipo de equipamento pode causar aquecimento e até um incêndio.

1.3.4 Condutores de energia

Conceito básico sobre condutores:

$$\text{Resistência: } R = \rho \frac{l}{S} [\Omega] \quad R = U/I$$

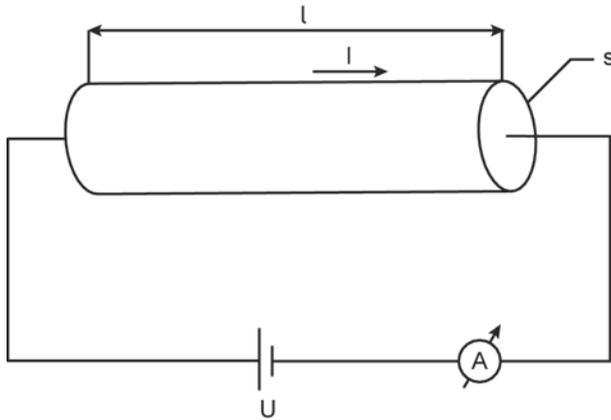


Figura 14 Circuito elétrico equivalente.

em que:

ρ = resistividade elétrica volumétrica [$\Omega \cdot m$] ou [$\Omega \cdot mm^2/m$]

l = comprimento do condutor [m]

S = área de secção transversal (mm^2)

$\sigma = 1/\rho$... condutividade elétrica [S/m] ou [$\Omega \cdot m$]⁻¹

Tabela 2 Resistividade elétrica de alguns materiais.

Material	ρ [$\Omega \cdot mm^2/m$] a 20 °C
Prata	0,0167
Cobre	0,0173
Ouro	0,0210
Alumínio	0,0278
Latão	0,0750

Variação de ρ com a temperatura:

$$\text{Nos metais } \rho \text{ aumenta com } T: \rho = \rho_0 [1 + \alpha (T - T_0)]$$

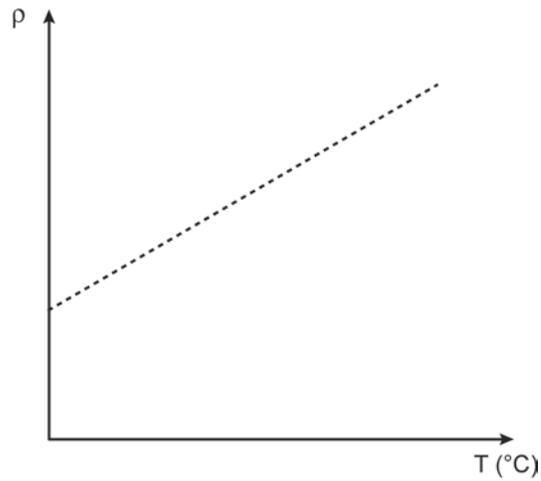


Figura 15 Gráfico da resistividade em função da temperatura.

em que:

α = coeficiente de temperatura relativo a T_0 (normalmente 20 °C)

$\alpha = 0,0034 / ^\circ\text{C}$... ouro

$0,0039 / ^\circ\text{C}$... cobre

$0,0038 / ^\circ\text{C}$... alumínio

$0,0018 / ^\circ\text{C}$... niquelinha (Ni, Cu, Mn)

$- 0,0004 / ^\circ\text{C}$... carbono

$0,0041 / ^\circ\text{C}$... prata

$0,0069 / ^\circ\text{C}$... níquel (99,9% Ni + Co)

Exemplo para o fio de cobre:

$R = 30 \Omega$ para $T = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$

Qual o valor de R para 80 °C?

$$\frac{R_{20}}{R_{80}} = \frac{\rho_{20} \frac{\ell}{S}}{\rho_{80} \frac{\ell}{S}} \Rightarrow R_{80} = \frac{\rho_{80}}{\rho_{20}} R_{20}$$

$$\frac{\rho_{80}}{\rho_{20}} = 1 + 0,0039(80 - 20) = 1,234$$

$$R_{80} = 1,234 \cdot R_{20} = 37 \Omega \cong 23\%$$

Tabela 3 Capacidade de condução de corrente de um condutor (no interior de um eletrodo a 30 °C).

Secção nominal (mm ²)	Dois condutores (A)	Três condutores (A)
1,5	17,5	15,5
2,5	24	21
4	32	28
6	41	36
10	57	50
16	76	68
25	101	89
35	125	111
50	151	134
70	192	171
95	232	207
120	269	239
150	309	275
185	353	314
240	415	369
300	472	420

1.3.5 Energia elétrica

1.3.5.1 Energia consumida

Metaforicamente, a potência elétrica refere-se à quantidade de músculos que uma máquina tem, e a energia a quanto esses músculos trabalham durante um período de tempo determinado.

Assim, energia é o resultado do produto da potência pelo tempo:

$$E = P \cdot t$$

Em eletricidade, a unidade usual de medida da energia é o kWh, com a potência elétrica em kW e o tempo em horas.

Outra unidade de medida de energia é o joule (J), sendo $1 \text{ J} = 1 \text{ W} \cdot \text{s}$ ou $1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$:

$$1 \text{ kWh} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J}$$

Exemplos: um ferro de solda elétrico de 150 W funciona 4 horas por dia. Quanta energia consome por mês?

$$P = 150 \text{ W}$$

$$t = 4 \cdot 30 = 120 \text{ h/mês}$$

$$E = P \cdot t = 150 \cdot 120 = 18000 \text{ Wh} = 18 \text{ kWh}$$

$$E = 150 \text{ J/s} \cdot 120 \text{ h} \cdot 3600 \text{ s/h} = 64,8 \cdot 10^6 \text{ J}$$

Quanta energia consome um forno elétrico de 800 W funcionando durante 4 horas?

$$P = 800 \text{ W} \quad t = 4 \text{ h}$$

$$E = P \cdot t = 0,8 \cdot 4 = 3,2 \text{ kWh}$$

$$E = 11,52 \cdot 10^6 \text{ J}$$

1.3.5.2 Transformação de energia elétrica em térmica

A energia E necessária para aquecer um corpo de massa m e calor específico c , de T_1 a T_2 , é dada por:

$$E = m \cdot c \cdot (T_2 - T_1) \left\{ \begin{array}{l} c_{\text{água}} = 4,18 \cdot 10^3 \frac{\text{W} \cdot \text{s}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \\ c_{\text{cobre}} = 0,39 \cdot 10^3 \frac{\text{W} \cdot \text{s}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \end{array} \right.$$

$E = R \cdot I^2 \cdot t = P \cdot t \Rightarrow$ Energia térmica fornecida por uma resistência R , percorrida por uma corrente I , durante um tempo t .

Se o rendimento do aquecedor for η :

$$E = P \cdot t \cdot \eta$$

Exemplo: que valor deve ter a resistência de um aquecedor para aquecer 2,5 litros de água de 20 a 100 °C em 8 minutos, com um rendimento de 90%? Tensão a ser usada: 220 V.

Dados:

$$U = 220 \text{ V}$$

$$m = 2,5 \text{ kg}$$

$$\eta = 0,9$$

$$t = 8 \text{ min} = 480 \text{ s}$$

$$\Delta T = 80 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$C = 4,18 \cdot 10^3 \text{ W} \cdot \text{s} / \text{Kg } ^\circ\text{C}$$

$$P = U^2/R, \quad P \cdot t \cdot \eta = E = m \cdot c \cdot \Delta T \Rightarrow P = \frac{m \cdot c \cdot \Delta T}{t\eta} = \frac{U^2}{R} \Rightarrow R = \frac{U^2 \cdot t \cdot \eta}{m \cdot c \cdot \Delta T}$$

$$R = \frac{(220)^2 \cdot 480 \cdot 0,9}{2,5 \cdot 4,18 \cdot 10^3 \cdot 80} = 25 \text{ } \Omega \Rightarrow P = \frac{U^2}{R} = \frac{(220)^2}{25} = 1936 \text{ W}$$

Que corrente atravessaria essa resist\encia?

$$I = U/R = 220/25 = 8,8 \text{ A}$$

1.4 Considera\c3\o5es finais

Nesta unidade, revisamos os conceitos b\asicos de eletricidade tendo-se uma fonte cont\inu\c3\aa de fornecimento de energia. Na pr\oxima unidade, iremos estudar os fundamentos da corrente alternada.

1.5 Exerc\c3\edios

1. Um resistor limita a corrente de um circuito em 4,5 A quando ligado a uma bateria de 9 V. Determine sua resist\encia.
2. Uma campanha residencial tem uma resist\encia de 8 Ω e precisa de uma corrente de 1,5 A para funcionar. Determine a tens\c3\ao necess\c3\aria para que a campanha toque.
3. Calcule a corrente exigida por uma l\amp;apada incandescente de 100 W cuja especifica\c3\o de funcionamento \c3\e de 120 V.
4. Calcule ainda a corrente exigida por uma l\amp;apada de 150 W funcionando em 120 V.

5. À medida que a potência aumenta, o que acontece com a corrente?
6. Qual a potência e a energia consumidas de uma linha de 110 V por um ferro elétrico de 22Ω em 3 horas?
7. Em uma certa comunidade, o custo médio da energia elétrica é de R\$ 0,35/kWh. Calcule o custo mensal do funcionamento de um chuveiro de 5400 W durante 0,5 h/dia e 30 dias/mês.

1.5.1 Respostas dos exercícios

1. 2Ω .
2. 12 V.
3. 0,83 A.
4. 1,25 A.
5. A corrente aumenta.
6. Potência de 550 W e energia de 1,65 kWh.
7. R\$ 28,35/mês.

1.6 Estudos complementares

1.6.1 Saiba mais

Para revisão completa de eletricidade em corrente contínua, recomenda-se estudar os capítulos 1, 2, 3, 4, 5 e 6 do livro:

GUSSOW, Milton. *Eletricidade básica*. São Paulo: Makron Books do Brasil, 1997.

1.6.2 Outras referências

<http://pt.wikipedia.org/wiki/Lei_de_ohm>

<<http://pt.wikipedia.org/wiki/resistor>>

<<http://pt.wikipedia.org/wiki/resistividade>>

<<http://www.falstad.com/circuit>>

UNIDADE 2

Fundamentos da corrente alternada

2.1 Primeiras palavras

Após a revisão dos conceitos básicos de eletricidade, vamos estender esses conhecimentos para a corrente alternada, a forma mais usual de consumo da energia elétrica. A grande vantagem técnica da corrente alternada sobre a corrente contínua está na possibilidade de alterar a sua amplitude (valor eficaz) pelo uso de transformadores.

2.2 Problematizando o tema

Para que possamos utilizar a energia elétrica com segurança em nossas residências, nos estabelecimentos comerciais, nas áreas industriais etc., faz-se necessário conhecer os fundamentos que norteiam esse tipo de energia limpa em relação às outras formas de energia de custo elevado.

Em uma instalação industrial, a energia elétrica apresenta os seguintes subsistemas de utilização:

- Sistemas de fornecimento de energia: compra de terceiros ou geração própria (cogeração).
- Motores elétricos para os diversos acionamentos.
- Sistemas de iluminação: lâmpadas a vapor metálico e de sódio, além das incandescentes e fluorescentes.
- Sistemas de aquecimento para transformação da matéria-prima.
- Sistemas de instrumentação elétrica: medir, registrar e controlar os processos.
- Sistemas de comunicação elétrica: telefonia, fax, rede de dados, correio eletrônico etc.

2.3 Texto básico para estudos

2.3.1 Tensão alternada

As situações mais frequentes em relação à eletricidade que um profissional da área deve estar apto a resolver estão localizadas nos subsistemas de utilização da energia elétrica, ou seja, nas indústrias, residências, escolas, hospitais etc.

A utilização da energia elétrica nesses locais, na maioria das vezes, se dá na forma de corrente alternada. Certamente os problemas mais comuns que deverão ser encontrados por esses profissionais envolvem a análise dos conceitos básicos de circuitos de corrente alternada.

Mas o que é corrente alternada? Como ela pode ser produzida? O que significa a geração da corrente em 60 Hz? Qual o significado físico de potência? Que tipos de cargas são encontrados em uma instalação elétrica? Quais são os efeitos dessas cargas em corrente alternada? Como se medem a corrente, a tensão e a potência nesses circuitos de corrente alternada?

Você provavelmente já sabe responder algumas dessas perguntas, outras pretendemos que você saiba responder no final desta unidade. Para isso propomos várias atividades, leituras e exercícios escritos sobre:

- introdução à corrente alternada;
- cargas resistivas em CA;
- cargas indutivas em CA;
- cargas capacitivas em CA.

2.3.1.1 Corrente alternada

A utilização da energia elétrica é feita em *tensão alternada*, pois a sua amplitude pode ser modificada, quase sem perdas, pelos transformadores.

Em alguns casos, a *corrente contínua* (CC) é utilizada para a alimentação de ônibus elétricos, em certos tipos de lâmpadas a arco, em motores de corrente contínua, elevadores, no acionamento de máquinas impressoras etc.

Devido à maior aplicação da *corrente alternada* (CA), enfatizaremos nosso estudo primeiramente em circuitos de corrente alternada monofásica e depois em circuitos de corrente alternada trifásica.

A forma mais comum de potência elétrica disponível no mundo é produzida por geradores que convertem energia mecânica em elétrica. A maioria desses geradores fornece uma tensão alternada (varia periodicamente de sentido e intensidade), cuja forma de onda é muito semelhante à mostrada na Figura 16. Essa forma de onda é comumente chamada de *senoide*, pois a equação que a descreve é dependente da função trigonométrica seno.

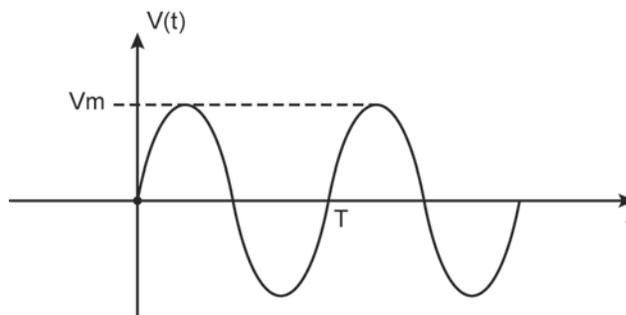


Figura 16 Forma de onda senoidal.

É necessário dizer que a senoide é de grande interesse aqui por ser a forma de onda de *tensão das linhas de alimentação* utilizadas para fins públicos (usualmente 220 ou 127 V, 60 Hz). Além disso, a senoide é relacionada a consideráveis fenômenos naturais e tem certas propriedades matemáticas que a tornam muito utilizada (pode ser diferenciada ou integrada e ainda fornece o mesmo resultado senoidal).

A senoide pode ser representada em uma forma simplificada, por meio de vetores. Um vetor que gira com velocidade constante, perpendicularmente ao seu eixo de rotação, pode representar de modo claro a variação senoidal de uma grandeza em função do tempo. Dessa maneira, quando trabalhamos com corrente alternada, temos que utilizá-la com notação vetorial ou por meio de representação cartesiana, valendo as relações trigonométricas usuais.

Quadro 1 Resumo de representação da grandeza elétrica "tensão" na forma vetorial.

Forma vetorial ou fasorial	Representação cartesiana
$\vec{V} = V \angle \theta$ <p>em que: $V_x = V \cos \theta$</p> $V_y = V \sin \theta$ $V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2}$	$\vec{V} = V_x + jV_y$ $\theta = \arctan \frac{V_y}{V_x}$

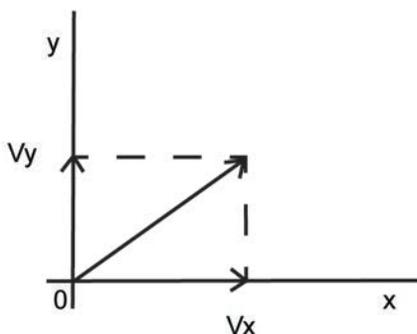


Figura 17 Transformação polar-cartesiana.

Portanto, a corrente alternada é uma grandeza vetorial e não podemos mais somar ou subtrair algebricamente como fazíamos com a corrente contínua.

No Brasil, a corrente alternada para instalações elétricas possui uma frequência de 60 Hz. No Paraguai, a frequência nominal das redes elétricas é de 50 Hz.

2.3.1.1.1 Defasamento angular

Se uma onda de tensão senoidal for aplicada a uma carga resistiva, a corrente resultante será uma corrente senoidal.

A Figura 18 mostra uma forma de onda senoidal de tensão e a resultante corrente senoidal superposta no mesmo eixo. Observe que conforme a tensão aumenta no sentido positivo, a corrente também aumenta, acompanhando-a. Quando a tensão é invertida, o mesmo acontece com a corrente. A passagem pelo eixo zero ocorre sempre no mesmo instante.

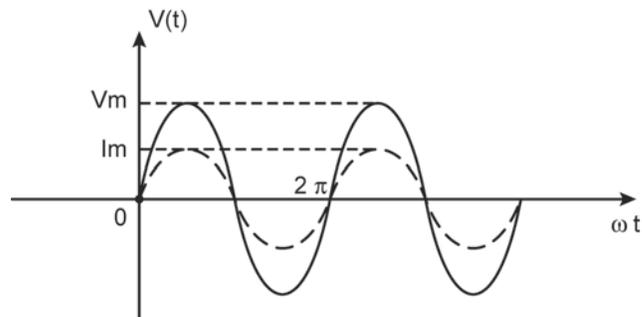


Figura 18 Onda de tensão e corrente em fase.

Quando duas formas de onda estão precisamente sincronizadas, diz-se que estão *em fase*. Para entrarem em fase, ambas as formas de onda devem passar pelos valores máximos e mínimos ao mesmo tempo e no mesmo sentido.

A Figura 19 mostra uma forma de onda de tensão $v(t)$ começando em 0. Conforme a onda de tensão $v(t)$ aumenta, atingindo o seu valor de pico positivo, a forma de onda de corrente $i(t)$ começa a crescer. Como essas formas de onda não passam pelos seus valores máximos e mínimos no mesmo instante, existe uma *diferença de fase* entre elas. Diz-se, então, que as duas formas de onda estão *defasadas*. Para as formas de onda da Figura 19, a diferença de fase é de 90° .

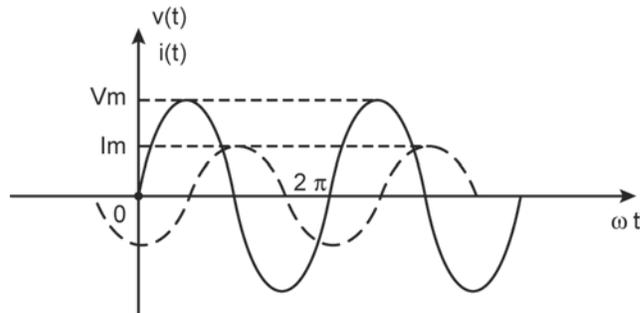


Figura 19 Formas de onda de tensão e corrente defasadas em 90° .

Para melhor definir essa diferença de fase entre as duas formas de onda, são utilizados os termos *avanço* e *atraso*. A quantidade de avanço ou atraso entre duas formas de onda é medida em graus. Voltando à Figura 19, verifica-se que a forma de onda $i(t)$ começa 90° depois da forma de onda de tensão $v(t)$. Assim, a forma de onda $i(t)$ está atrasada em 90° com relação à tensão $v(t)$. Essa relação poderia também ser descrita afirmando-se que a forma de onda $v(t)$ está adiantada 90° da forma de onda $i(t)$.

2.3.1.2 Cargas resistivas em circuitos de corrente alternada

Em um circuito de uma torneira elétrica (Figura 20), as formas de onda de corrente e tensão estão sempre em fase (Figura 21), portanto o ângulo de defasagem é zero, $\theta = 0^\circ$. A Lei de Ohm verifica-se independentemente de que sejam usados os valores instantâneos, de pico, eficazes ou corrente contínua, pois em toda a resistência da torneira se produz calor ao circular uma corrente. Esse tipo de característica (defasagem zero, $\theta = 0^\circ$) é próprio de circuitos resistivos ideais, como resistores de aquecimento (para fornos, ebulidores, chuveiros etc.), lâmpadas incandescentes, entre outros.

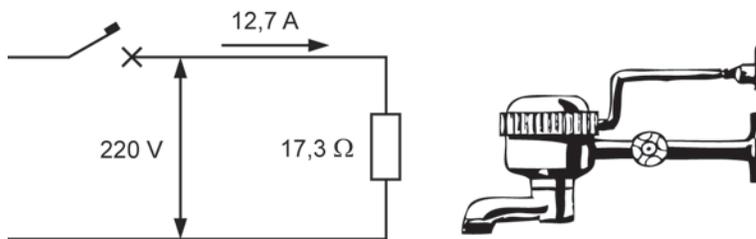


Figura 20 Esquema ilustrativo de um circuito resistivo.

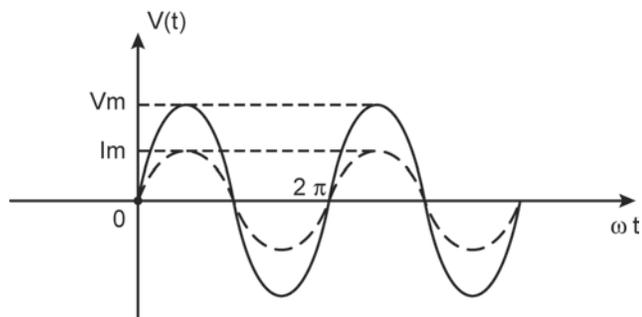


Figura 21 Forma de onda.



Figura 22 Diagrama de fasores.

- $v(t) = V_m \text{sen} \omega t$, em que V_m é o valor máximo ou de pico da senoide;
- $i(t) = \frac{V_m}{R} \text{sen} \omega t = I_m \text{sen} \omega t$. Com $\omega = 2\pi f$, sendo “f” a frequência da forma de onda alternada;
- $\theta = 0 \Rightarrow \cos \theta = 1$ e $\text{sen} \theta = 0$ (corrente em fase com a tensão).

Tensão eficaz: $V_{\text{ef}} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}$; corrente eficaz: $I_{\text{ef}} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$; fator de potência = $\cos \theta$.

2.3.1.2.1 Potência em circuitos resistivos de corrente alternada

A potência em corrente contínua é o produto da tensão pela corrente, isto é:

$$P = V \cdot I$$

Em tensão alternada, devido à defasagem entre a tensão e a corrente, aparece outro fator:

$$P = V \cdot I \cdot \cos \theta$$

Esta é definida como *potência ativa* ou *potência útil*. Trata-se da potência que está sendo transferida do gerador de energia para as cargas elétricas, ou seja, é a potência útil que está realizando trabalho.

Para a determinação da potência em corrente alternada, operamos sempre com os valores eficazes (que são lidos nos instrumentos de medida).

A fim de ilustrar melhor a potência em circuitos resistivos (oportunamente veremos em circuitos indutivos e capacitivos), vamos considerar uma resistência em um circuito de corrente alternada, por exemplo, um chuveiro elétrico. A tensão e a corrente nesse circuito estão em fase (Figura 23). A potência instantânea em um circuito é o produto da tensão pela corrente. Dessa maneira, multiplicando os valores instantâneos correspondentes à tensão e à corrente (multiplicação ponto a ponto das formas de onda), obtém-se um valor instantâneo de potência.

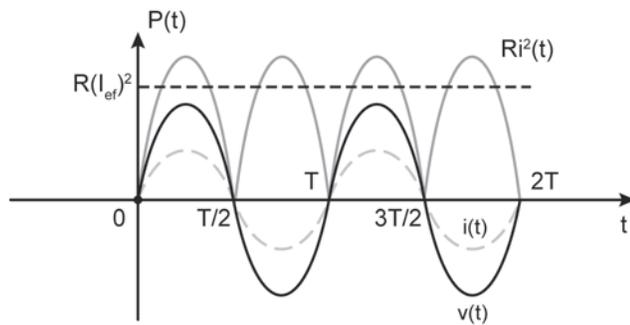


Figura 23 Potência em uma carga resistiva em corrente alternada.

Analisando a curva da potência obtida, observamos que ela é *sempre positiva*, já que a tensão e a corrente estão sempre simultaneamente positivas ou negativas. Essa *potência positiva* significa que a potência é transferida do gerador para o consumidor, ao passo que é a *potência útil* que se está consumindo ou transformando, realizando um trabalho útil. No caso do chuveiro elétrico é a potência que está sendo transformada em calor. Esta é a *potência ativa* do circuito.

Em circuitos resistivos de CA, a *potência ativa* também é calculada a partir de $VI \cos \theta$, mas como a defasagem é zero no caso ideal ($\theta = 0^\circ$), o $\cos \theta = 1$ então:

$$P = V \cdot I \quad \text{ou} \quad P = R \cdot I^2 \quad \text{ou} \quad P = \frac{V^2}{R}$$

Unidades utilizadas para a potência ativa:

- watt (W);
- múltiplos quilowatt (kW);
- megawatt (MW).

Todas essas expressões são diretamente aplicáveis a qualquer circuito resistivo, a qualquer trecho resistivo de um circuito, a qualquer circuito de corrente contínua e a qualquer circuito de CA (ou trecho do circuito) com defasagem 0° ou $\cos \theta = 1$ (ideal).

2.3.1.2.2 Circuitos com cargas em paralelo

Nas instalações elétricas, os circuitos são ligados em paralelo desde o quadro de distribuição. Nesses circuitos precisamos determinar a corrente total exigida pelos equipamentos elétricos a fim de dimensionarmos a seção dos condutores (bitola do cabo em mm^2) e a proteção (corrente nominal do disjuntor em amperes) do circuito.

Numa associação em paralelo, a cada um dos equipamentos elétricos estará aplicada a mesma tensão. A corrente total da associação será a soma das correntes individuais de cada equipamento.

Exemplo:

No circuito representado pela Figura 24, qual a corrente exigida para funcionar todas as cargas ao mesmo tempo?

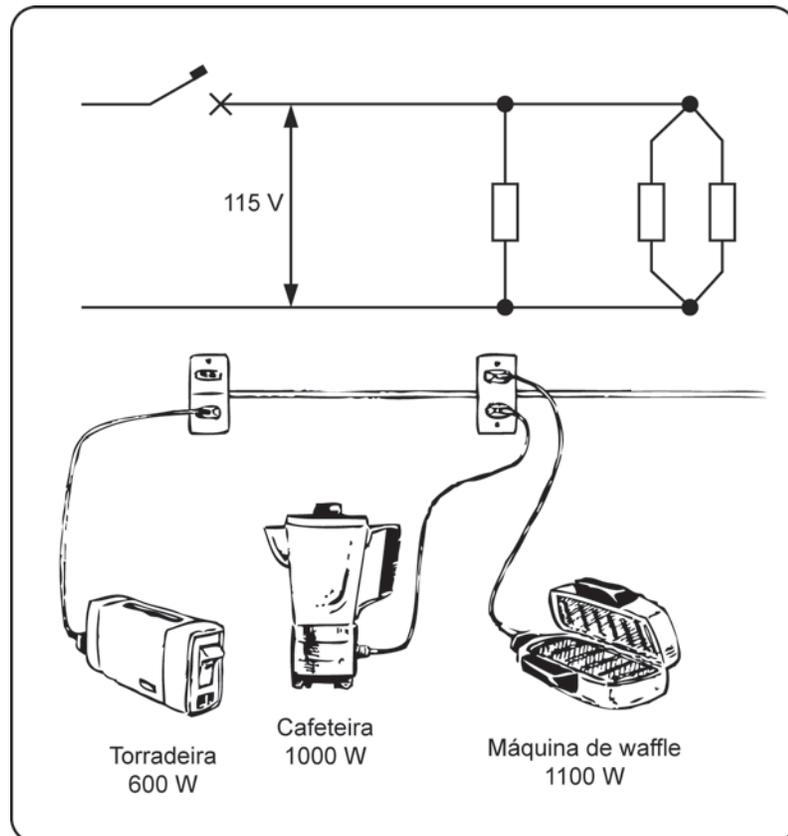


Figura 24 Instalação na prática e circuito equivalente.

Resolvendo:

$$P = VI \cos \theta, \text{ mas } \theta = 0^\circ, \text{ então } \cos \theta = 1 \text{ e } P = VI$$

$$P_T = P_1 + P_2 + P_3 = 600 \text{ W} + 1000 \text{ W} + 1100 \text{ W} = 2700 \text{ W}$$

$$I_r = \frac{P_T}{V} = \frac{2700}{115} = 23,5 \text{ A} \Rightarrow I_r = 23,5 \text{ A}$$

Dessa maneira, a corrente exigida para funcionar todas as cargas ao mesmo tempo é de 23,5 A. É esse valor que será considerado para dimensionar a secção do condutor e a proteção do circuito.

2.3.1.3 Cargas indutivas em circuitos de corrente alternada

Muitos dos circuitos encontrados em instalações elétricas contêm bobinas ou indutâncias. Em alguns deles, como os que alimentam iluminação incandescente ou aquecedores a resistências (chuveiros, torneiras etc.), a indutância é tão pequena que pode ser ignorada. Em outros, como os que servem a motores, reatores de lâmpadas a vapor, transformadores etc., a indutância é bastante significativa.

A indutância (símbolo L) é medida em uma unidade chamada Henry (H) e representa fisicamente uma oposição à mudança de corrente (variação). Em outras palavras, a corrente através de um indutor não pode ser alterada instantaneamente.

Se o condutor estiver enrolado na forma helicoidal, compondo uma bobina, a indutância aumentará devido à concentração do fluxo magnético em seu interior. Esse aumento é ainda mais significativo um núcleo de ferro no interior da bobina, o que contribui para uma maior concentração de fluxo magnético.

A oposição da bobina à passagem da corrente alternada é chamada de *reatância indutiva* (X_L). Ela é tanto maior quanto maior a indutância (L) e a frequência (f). Especificamente, um indutor puro atrasa a corrente em relação à tensão de 90° (Figura 25).

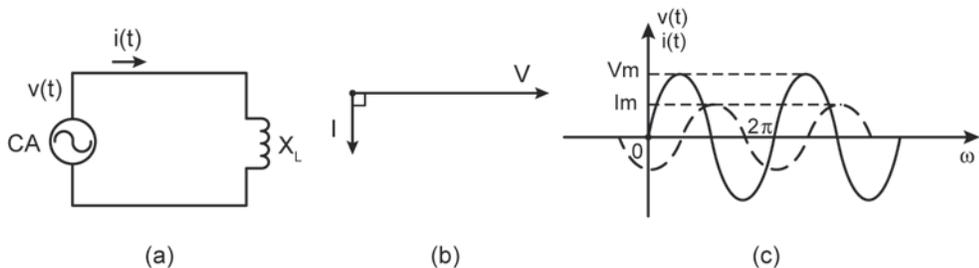


Figura 25 Esquemas ilustrativos de um circuito indutivo ideal: (a) circuito equivalente; (b) diagrama de fasores; (c) representação gráfica das formas de ondas da tensão e da corrente elétrica.

$$v(t) = V_m \sin \omega t$$

$$i(t) = \frac{V_m}{Z} \sin(\omega t - \theta) = I_m \sin(\omega t - \theta)$$

(corrente atrasada em relação à tensão de um ângulo θ)

$$\text{Tensão eficaz: } V_{ef} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}$$

$$\text{Corrente eficaz: } I_{ef} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

$$\text{Impedância: } Z = \frac{V_{ef}}{I_{ef}}$$

Fator de potência: $\cos \theta$.

Matematicamente podemos escrever a expressão da reatância indutiva (X_L) como sendo:

$$X_L = \omega L, \text{ com } \omega = 2\pi f$$

em que:

X_L = reatância indutiva em ohms (Ω);

L = indutância da bobina em Henry (H);

ω = velocidade angular da forma de onda em radianos por segundo (rad/s);

2π = constante aproximadamente igual a 6,28;

f = frequência da forma de onda alternada.

Em uma bobina real, ou indutor (representado na Figura 26 por uma bate-deira de bolo), quando alimentada por CA, além do efeito da indutância (reatância indutiva), aparece um aquecimento nos fios devido ao efeito joule. Portanto, uma bobina real pode ser representada por uma resistência ôhmica e uma reatância indutiva (pode-se considerar que estão em série, como na Figura 26).

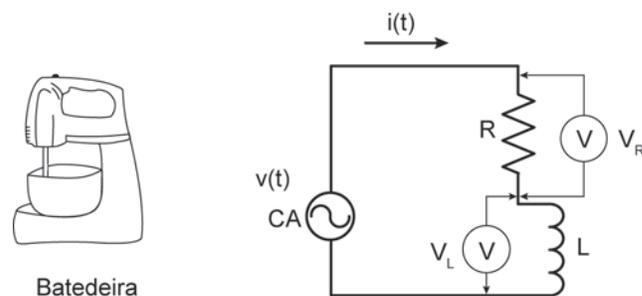


Figura 26 Instalação na prática e circuito equivalente.

A corrente alternada através da resistência está em fase com a tensão; a corrente através da indutância está atrasada em 90° em relação à tensão. A *resistência* (R) e a *reatância* (X_L), que se opõem à passagem dessas correntes, podem ser consideradas defasadas em 90° .

A oposição total à corrente, isto é, a *impedância* (Z), é calculada a partir dos valores da corrente alternada e da tensão alternada. Nela estão a *resistância ôhmica* e a *reatância*.

Unidade da impedância (Z) = Ω

2.3.1.3.1 Representação da impedância: triângulo da impedância

A impedância (Z) pode ser também calculada graficamente por meio do triângulo retângulo com as grandezas elétricas envolvidas (resistância e reatância indutiva).

Na montagem em série, conhecendo-se a corrente e as tensões nos componentes, temos:

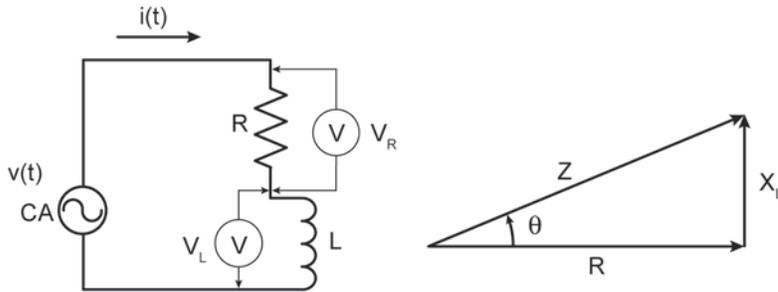


Figura 27 Circuito com resistor e indutor em série.

$$R = \frac{V_R}{i} \quad X_L = \frac{V_L}{i} \quad Z = \frac{V}{i}$$

As resistências são proporcionais às tensões correspondentes, portanto o triângulo retângulo é semelhante ao das tensões (apenas dividimos os lados do triângulo por um fator, no caso a corrente do i do circuito). O ângulo de defasagem θ continua sendo o mesmo.

A impedância (Z) pode ser escrita também como:

$$Z_x = R = Z \cos \theta$$

$$Z_y = X_L = Z \sin \theta$$

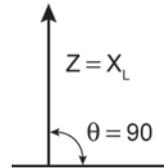
$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$$

$$0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} \quad \Rightarrow \quad 0 \leq \cos \theta \leq 1$$

Em um circuito indutivo puro:

$$R = 0 \quad Z = jX_L = Zy \quad \text{e} \quad \theta = 90^\circ$$

Lembre-se que θ é o ângulo de defasagem entre a tensão e a corrente, portanto o triângulo da impedância será assim representado:



2.3.1.3.2 Potência em um circuito puramente indutivo

Um indutor puro não pode dissipar potência. Para ver isso mais claramente, considere a Figura 28, em que as formas de onda de tensão e corrente em um indutor estão esboçadas na parte superior e a forma de onda da potência instantânea na parte inferior. Note que I está atrasada de V de 90° , conforme é a característica de um indutor. A forma de onda P é novamente gerada ponto por ponto pela multiplicação das curvas V e I .

Para $t = 0 \rightarrow P = 0$ desde que $v = 0$, isso é também verdadeiro para 180° e 360° . O produto VI também pode ser zero para 90° e 270° , quando a curva I cruza o eixo zero. Então a curva P tem pontos nulos para $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ e 360° , o que está indicado pela frequência dupla da curva P da Figura 28.

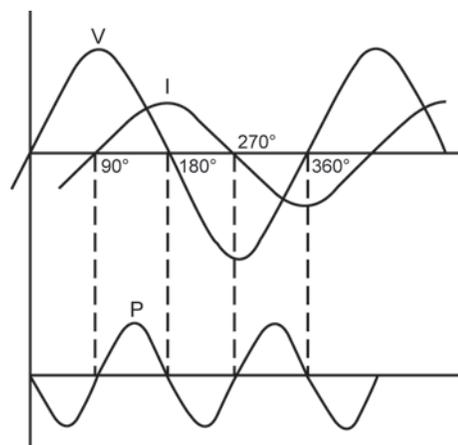


Figura 28 Representação gráfica da potência.

Fonte: Zanin & Shimbo (2008).

Note que a curva P é simétrica ao eixo zero e, portanto, tem valor médio igual a zero. Isso significa que uma indutância pura não dissipa potência. De um

ponto de vista físico, o indutor absorve potência quando P é positiva, mas retorna essa energia armazenada quando P se torna negativa. Essa potência que tem valor médio igual a zero é definida como *potência reativa*.

2.3.1.3.3 Potência em um circuito indutivo real ($\theta < 90^\circ$)

Para entendermos a potência em um circuito indutivo real (defasagem menor que 90°), analisemos um circuito com uma bobina (indutância pura mais resistência) alimentada por uma fonte de tensão alternada (Figura 29). Ao realizarmos as medidas de potência, tensão e corrente (lidas respectivamente no wattímetro, voltímetro e amperímetro) obtivemos:

$$V = 100 \text{ V} \quad I = 0,8 \text{ A} \quad \text{e} \quad P = 40 \text{ W}$$

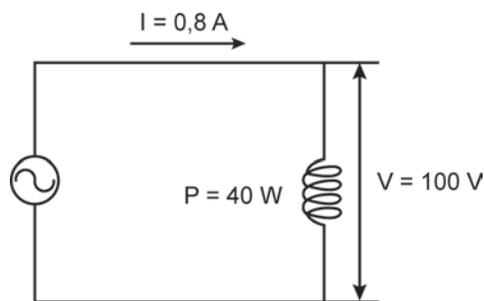


Figura 29 Esquema de um circuito com uma bobina (indutância pura mais resistência).

$$P = V \cdot I = 100 \cdot 0,8 = 80 \text{ VA}$$

$$P_{\text{lida}} = 40 \text{ W}$$

Ao compararmos o produto da tensão (100 V) pela corrente (0,8 A) com a indicação do medidor de potência (40 W), notamos que a potência calculada é maior que a indicada pelo wattímetro.

Ao analisarmos a representação gráfica da tensão, corrente e potência, verificamos que a curva P não é simétrica ao eixo zero, portanto não tem valor médio igual a zero (notar que o ângulo de defasagem é menor que 90°).

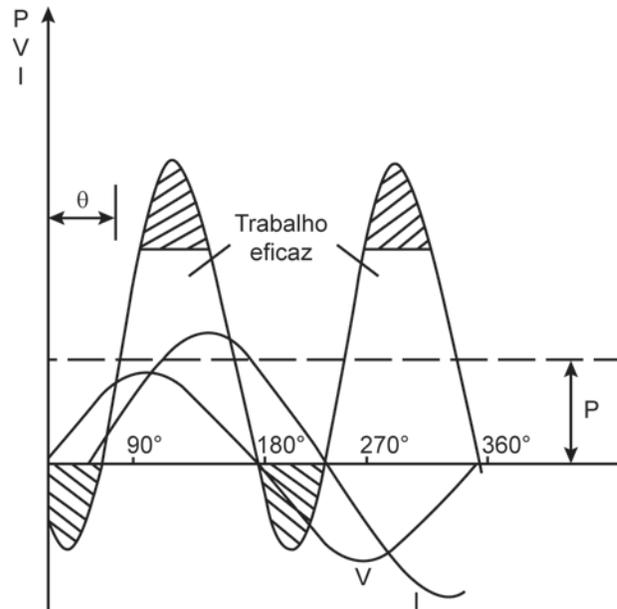


Figura 30 Representação gráfica da tensão, corrente e potência em um circuito indutivo real (indutância pura mais resistência).

Fonte: Zanin & Shimbo (2008).

Em circuitos de corrente alternada, com diferença de fase menor que 90° , ao multiplicarmos os valores das medidas de *corrente pela tensão* obtemos uma *potência aparente*. A unidade dessa potência aparente é dada em:

Volt-ampere (VA) ou múltiplos kilovolt-ampere (kVA)

A potência aparente não tem significado físico, ela é apenas um artifício matemático que facilita os cálculos, sendo importantíssima no dimensionamento de transformadores, projetos etc.

Potência aparente $\Rightarrow S = V \cdot I$ unidade: VA ou kVA

A leitura realizada no medidor de potência (wattímetro) é a potência que está realizando trabalho, é o valor médio de P, como já foi definido: trata-se da *potência ativa* (P) dada em watts (W) ou quilowatts (kW). Essa potência está sendo consumida pela *resistência* da bobina em forma de aquecimento.

Potência ativa $\Rightarrow P = V \cdot I \cdot \cos \theta$ unidade: W ou kW

⇓

lida no wattímetro

A componente da potência P que caminha para frente e para trás na linha, resultando em média zero, é, como já foi colocado, *incapaz* de realizar trabalho útil: é a *potência reativa* (Q). Essa potência aparece na *reatância* da bobina. Ela é responsável pela formação dos campos magnéticos do enrolamento.

Potência reativa $\Rightarrow Q = V \cdot I \cdot \text{sen } \theta$ unidade: VA_r ou kVA_r

Portanto, em uma bobina real temos as três potências: ativa, reativa e aparente. E isso é característico de qualquer equipamento que possui enrolamento ou bobina, por exemplo: máquinas elétricas, transformadores, batedeiras, geladeiras, máquinas de lavar etc.

Da mesma forma que construímos o triângulo das impedâncias, podemos construir o triângulo das potências. Para isso basta multiplicarmos o triângulo da impedância por I^2 .

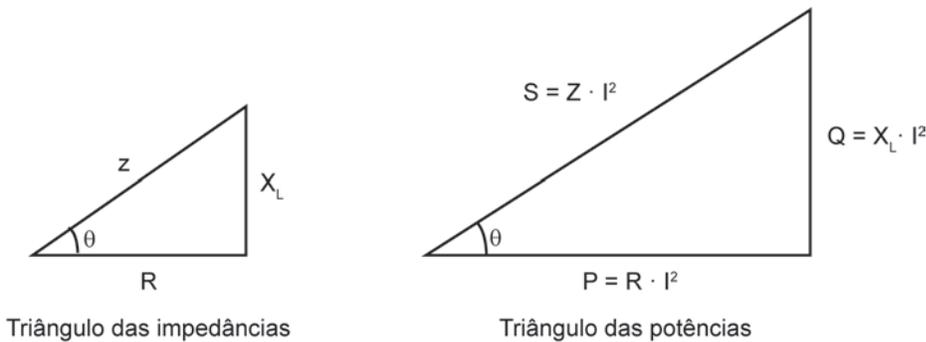


Figura 31 Triângulos das impedâncias e das potências em um circuito indutivo real.

Potência aparente: $S = V \cdot I = Z \cdot I^2$

Potência ativa: $P = V \cdot I \cdot \text{cos } \theta = R \cdot I^2$

Potência reativa: $Q = V \cdot I \cdot \text{sen } \theta = X_L \cdot I^2$

A potência aparente, que é a hipotenusa do triângulo, é uma quantidade complexa, com uma componente real igual à potência em watts (P) e uma componente imaginária igual à potência reativa (Q) em VA_r (lê-se volt-ampere reativo).

$S = S_x + j \cdot S_y$, em que $S_x = P = V \cdot I \cdot \text{cos } \theta$

$S_y = Q = V \cdot I \cdot \text{sen } \theta$

Portanto: $S = V \cdot I \cdot \text{cos } \theta + jV \cdot I \text{sen } \theta = VI$ defasado de θ° ou $S = P + j \cdot Q$ ou $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$

O conceito de *potência complexa* ou *aparente* fornece outro método para resolução de problemas de corrente alternada. Os cálculos seguem as regras da álgebra complexa e as técnicas dos vetores. Também são aplicados os métodos gráficos.

O traçado do triângulo das potências é um valioso auxílio na visualização.

Relembrando: o termo $\cos \theta$ é denominado *fator de potência do circuito*, e é a relação entre a potência ativa e a potência aparente.

$$\text{Circuito indutivo ideal: } \theta = \frac{\pi}{2} \Rightarrow \cos \theta = 0 \text{ e } \sin \theta = 1$$

$$Z = X_L, P = 0 \text{ e } S = Q = VI \quad S = Q$$

2.3.1.3.4 Análise de um circuito

O circuito mostrado na Figura 32 está alimentando duas tomadas: na primeira está ligada uma torradeira e na segunda uma bateadeira. As duas cargas estão em paralelo.

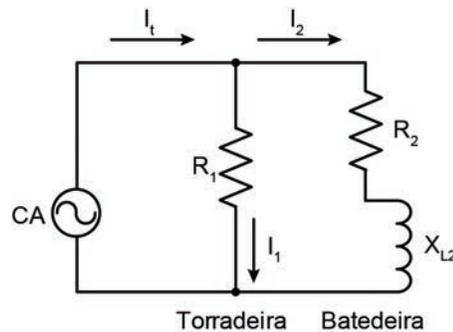


Figura 32 Circuito indutivo e resistivo na prática.

No trecho do circuito correspondente à torradeira, a corrente I_1 , através da resistência R_1 do aparelho, está em fase com a tensão de alimentação do circuito (o fator de potência desse trecho é um (1,0) circuito resistivo). No trecho correspondente à bateadeira, a corrente I_2 , através da resistência R_2 do motor, em série com sua reatância indutiva X_{L2} está atrasada em um ângulo θ_1 em relação a U . O cosseno de θ_1 é o fator de potência do motor.

A corrente total I é a resultante de I_1 e I_2 (soma vetorial, $I_L = \sqrt{(I_1 + I_R)^2 + I_L^2}$) e está atrasada em um ângulo θ em relação à tensão U . O cosseno θ é o fator de potência do circuito.

Da mesma forma se comportam as potências. No entanto, como já foi dito, para se ter uma melhor visualização do sistema é interessante trabalhar com os triângulos das potências.

Exemplo: uma determinada indústria precisa comprar um transformador para alimentar as seguintes cargas:

- fornos com 10 kW;
- motores com 10 kVA e $\cos \theta = 0,50$.

Qual o valor da potência a ser considerado para a compra do transformador?

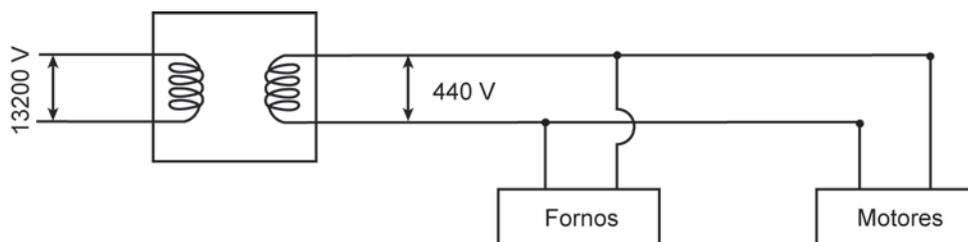


Figura 33 Circuito equivalente.

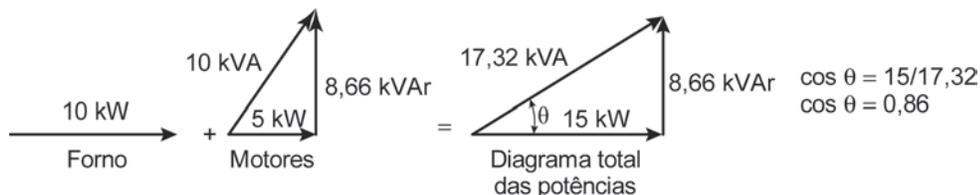


Figura 34 Diagrama das potências.

O transformador deverá ter capacidade suficiente para suprir a potência dos fornos e dos motores, portanto necessitamos calcular as potências totais. Uma maneira de visualizar o que está acontecendo é por meio dos diagramas das potências. Assim, o transformador a ser comprado necessita ter uma potência maior que 17,32 kVA e FP maior que 0,86. Para se escolher o transformador, deve-se adequar esses valores aos fornecidos pelos catálogos dos fabricantes. Assim, um transformador de 30 kVA teria condições de alimentar essas duas cargas elétricas.

2.3.1.4 Cargas capacitivas em circuitos de corrente alternada

Todo circuito elétrico, não importa a sua complexidade, apresenta não mais que três propriedades elétricas básicas: resistência, indutância e capacitância. Por isso, uma completa compreensão de cada uma dessas propriedades é uma etapa necessária para o perfeito conhecimento de como funcionam os equipamentos elétricos.

Até o momento, estudamos as resistências e as indutâncias. A última das três propriedades, a capacitância, será estudada agora.

Dois materiais condutores separados por um material não condutor (dielétrico) apresentam a propriedade denominada *capacitância*, uma vez que essa combinação é capaz de armazenar uma carga elétrica. Como vimos anteriormente, a indutância é definida como a propriedade de um circuito de se opor às variações de corrente. A capacitância é a propriedade de um circuito se opor às variações de tensão. A capacitância armazena energia no campo eletrostático, enquanto a indutância armazena energia no campo magnético. O dispositivo usado nos circuitos elétricos para armazenar carga em virtude da presença do campo eletrostático é denominado *capacitor*.

Na seleção ou substituição de capacitores para um determinado circuito, devemos considerar:

- o valor da capacitância desejada;
- a tensão aplicada através de suas placas.

Se a tensão aplicada for excessiva, o dielétrico pode não suportar a pressão elétrica, ocorrendo então um arco elétrico entre as placas que o destrói.

A unidade de capacitância é o Farad (F) e seus submúltiplos: microFarad (μF) ou picoFarad (pF)

A oposição ao fluxo de corrente em um circuito é a reatância capacitiva (X_c). Ela é inversamente proporcional à frequência e à capacitância, ou seja:

$$X_c = \frac{1}{\omega C}, \text{ com } \omega = 2\pi f$$

em que:

X_c = reatância capacitiva em ohms (Ω);

C = capacitância do capacitor em Farad (F);

ω = velocidade angular da forma de onda em radianos por segundo (rad/s);

2π = constante aproximadamente igual a 6,28;

f = frequência da forma de onda alternada.

Especificamente, um capacitor ideal adianta a corrente em relação à tensão de 90° (Figura 35).

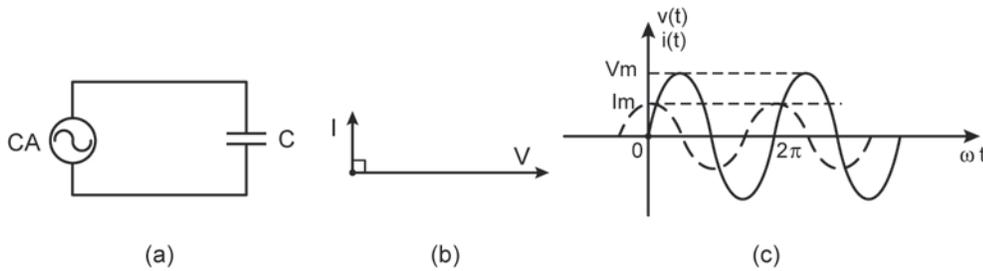


Figura 35 Esquemas ilustrativos de um circuito capacitivo ideal: (a) circuito equivalente; (b) diagrama de fasores da tensão e corrente; (c) representação gráfica das formas de onda da tensão e da corrente elétrica no tempo.

em que:

$$v(t) = V_m \text{sen} \omega t$$

$$i(t) = \frac{V_m}{Z} \text{sen}(\omega t + \theta) = I_m \text{sen}(\omega t + \theta) \text{ (corrente adiantada em relação à tensão de um ângulo } \theta \text{)}$$

$$\text{Tensão eficaz: } V_{\text{ef}} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}$$

$$\text{Corrente eficaz: } I_{\text{ef}} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

$$\text{Impedância: } Z = \frac{V_{\text{ef}}}{I_{\text{ef}}}$$

$$\text{Fator de potência: } \cos \theta$$

A Figura 35 se refere a um capacitor ideal, entretanto, na prática, esse caso nunca ocorre, pois não existe um capacitor completamente livre de perdas. Quando um capacitor está ligado a uma tensão alternada, entre as suas placas forma-se um campo elétrico. Durante cada período da corrente alternada, o isolamento é reeletrizado duas vezes. Para isso é necessária uma quantidade de trabalho que representa para o capacitor maior perda (calor). As perdas fazem com que o ângulo de defasagem entre a tensão e a corrente fique menor que 90°.

Existem diversos circuitos equivalentes para representar as perdas em um capacitor, um deles pode ser representado por um resistor ligado em série com

o capacitor (Figura 36). Uma maneira mais fácil para visualizar o problema é por meio dos diagramas fasoriais ou triângulos de impedâncias.

Em algumas exceções, as perdas podem ser desprezadas e o capacitor pode ser considerado como uma reatância pura.

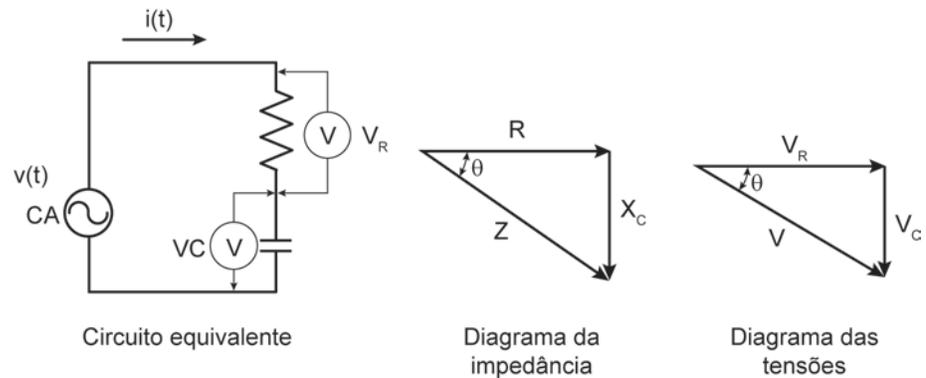


Figura 36 Esquemas ilustrativos de um circuito capacitivo real.

A impedância (Z) é calculada a partir dos valores da corrente e da tensão alternada ($Z = V/I$). Nela estão contidas a resistência ôhmica e a reatância capacitiva.

2.3.1.4.1 Potência em um circuito capacitivo ideal

Um capacitor ideal não pode dissipar nenhuma potência. Para visualizar mais claramente, considere a Figura 37. Em (a) estão representadas as formas de onda da corrente e da tensão; em (b) a forma de onda da potência instantânea. A forma de onda P , como já sabemos, é gerada ponto a ponto pela multiplicação das formas de onda v (tensão) e i (corrente).

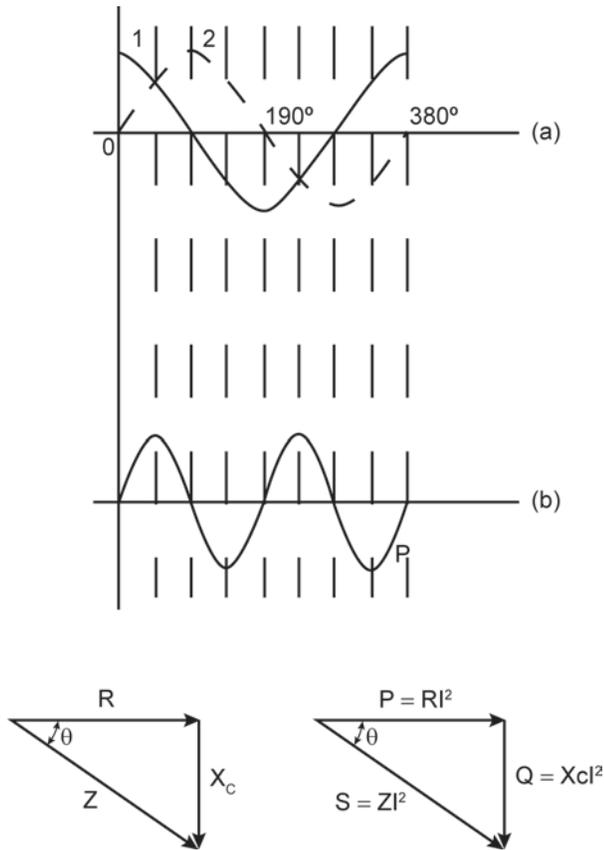


Figura 37 Representação gráfica da potência.

Fonte: Zanin & Shimbo (2008).

Analisando a forma P da Figura 37, verificamos que ela apresenta frequência dupla em relação às formas de onda da tensão e da corrente e é simétrica em relação ao eixo zero. Fisicamente, isso significa que o capacitor está armazenando energia quando P é positiva e que esta retorna à fonte quando P é negativa. Essa energia é incapaz de realizar trabalho útil, pois o seu resultado é, em média, zero. Ela é também a *potência reativa* (kVAr) e aparece na capacitância, sendo responsável pela formação dos campos elétricos.

2.3.1.4.2 Potência em circuito capacitivo com perdas

Em um circuito capacitivo real já sabemos que a defasagem é menor que 90° , ou seja, a corrente está adiantada em relação à tensão de um ângulo menor que 90° devido a perdas que ocorrem no dielétrico. Com a exceção de que para o capacitor o efeito é contrário, podemos considerar, para ele, as mesmas observações feitas sobre o indutor. Assim, o diagrama das potências e das impedâncias pode ser representado como:

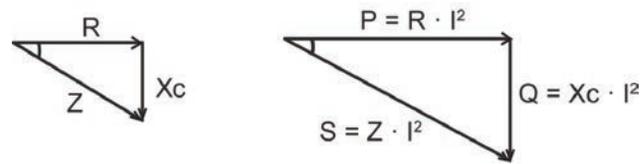


Figura 38 Diagrama das impedâncias e das potências em um circuito formado por um capacitor e uma resistência.

Potência aparente: $S = V \cdot I = Z \cdot I^2$ unidade: VA ou kVA;

Potência ativa: $P = V \cdot I \cos \theta = R \cdot I^2$ unidade: W ou kW;

Potência reativa: $Q = V \cdot I \sin \theta = X_c \cdot I^2$ unidade: VAR ou kVAR;

Fator de potência: $\cos \theta = P/S$.

Uma maior *aplicação do capacitor* em instalações elétricas, tanto de baixa-tensão como de alta-tensão, é para a *correção do baixo fator de potência*. Em outra unidade, veremos que a concessionária de energia cobra uma sobretaxa para quem tem $FP < 0,92$. Como a maioria das cargas é indutiva, um baixo fator de potência é facilmente alcançado.

2.4 Considerações finais

Tratamos nesta unidade dos fundamentos de tensão e corrente alternada. Para uma melhor fixação do conteúdo, o assunto será resumido a seguir.

- Circuito puramente resistivo:

$$v(t) = V_m \sin \omega t$$

$$i(t) = \frac{V_m}{R} \sin \omega t = I_m \sin \omega t \text{ com } \omega = 2\pi f$$

$\theta = 0 \Rightarrow \cos \theta = 1$ e $\sin \theta = 0$ (corrente em fase com a tensão)

$$\text{Tensão eficaz: } V_{ef} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}$$

$$\text{Corrente eficaz: } I_{ef} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

Fator de potência: $\cos \theta$

Potências envolvidas:

$$P = V \cdot I \cdot \cos \theta = VI \text{ (potência ativa – watt)}$$

$$S = V \cdot I \text{ (potência aparente – VA)}$$

$$Q = V \cdot I \cdot \sin \theta = 0 \text{ (potência reativa – VA}_r\text{)}$$

- Circuito indutivo real:

$$V(t) = V_m \sin \omega t$$

$$I(t) = \frac{V_m}{Z} \sin(\omega t - \theta) = I_m \sin(\omega t - \theta) \text{ (corrente atrasada em relação à tensão de um ângulo } \theta \text{)}$$

$$\text{Tensão eficaz: } V_{\text{ef}} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}$$

$$\text{Corrente eficaz: } I_{\text{ef}} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

$$\text{Impedância: } Z = \frac{V_{\text{ef}}}{I_{\text{ef}}}$$

$$\text{Fator de potência: } \cos \theta$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = (\Omega), \text{ em que } X_L = \omega L \text{ (reatância indutiva em } \Omega \text{)}$$

$$R = Z \cos \theta \text{ e } X_L = Z \sin \theta \quad 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} \Rightarrow 0 \leq \cos \theta \leq 1$$

$$P = V \cdot I \cdot \cos \theta$$

$$S = V \cdot I$$

$$Q = V \cdot I \cdot \sin \theta$$

- Circuito indutivo ideal:

$$\theta = \frac{\pi}{2} \Rightarrow \cos \theta = 0 \text{ e } \sin \theta = 1$$

$$Z = X_L, P = 0 \text{ e } S = Q = V \cdot I$$

$$S = Q$$

- Circuito capacitivo real:

$$\text{Tensão eficaz: } V_{\text{ef}} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}$$

$$\text{Corrente eficaz: } I_{\text{ef}} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

$$\text{Impedância: } Z = \frac{V_{\text{ef}}}{I_{\text{ef}}}$$

Fator de potência: $\cos \theta$

$$Z = \sqrt{R_2^2 + X_c^2} \text{ (}\Omega\text{)}, \text{ em que } X_c = \frac{1}{\omega C} \text{ (reatância capacitiva -}\Omega\text{)}$$

$$R = Z \cos \theta \text{ e } X_c = Z \sin \theta$$

$$-\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq 0 \Rightarrow 0 \leq \cos \theta \leq 1 \text{ e } -1 \leq \sin \theta \leq 0$$

Potências envolvidas:

$$S = V \cdot I$$

$$P = V \cdot I \cdot \cos \theta$$

$$Q = V \cdot I \cdot \sin \theta$$

- Circuito capacitivo ideal:

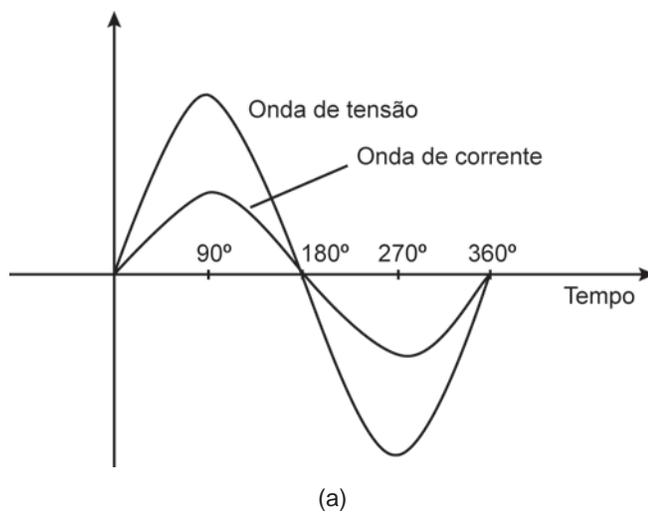
$$\theta = -\frac{\pi}{2} \Rightarrow \cos \theta = 0 \text{ e } \sin \theta = -1$$

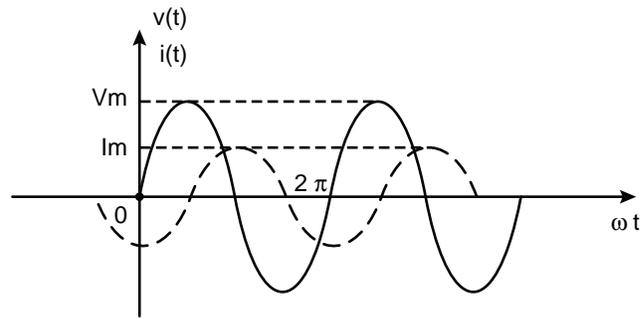
$$Z = X_c, P = 0 \text{ e } S = Q = V \cdot I \qquad S = -Q$$

2.5 Exercícios

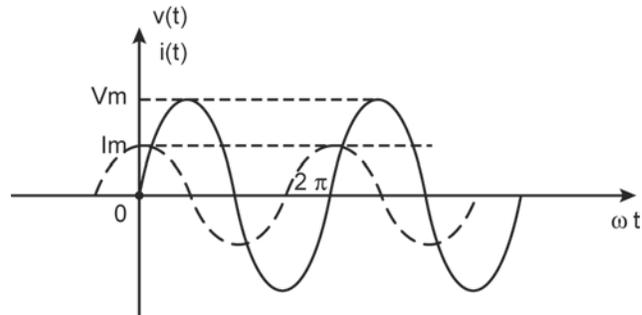
1. O que é corrente alternada?
2. Especifique o ângulo de defasagem entre a tensão e a corrente em um circuito:

- a) puramente resistivo;
 - b) capacitivo ideal;
 - c) indutivo ideal.
3. Que frequência é utilizada na geração de energia elétrica no Brasil?
 4. O que você entende por impedância de um circuito?
 5. Dê o significado físico de potência ativa e sua unidade de medida.
 6. Cite alguns aparelhos que consomem só potência ativa.
 7. Dê o significado físico da potência reativa e sua unidade de medida.
 8. Qual é a unidade da potência aparente?
 9. O que é fator de potência?
 10. Cite alguns aparelhos que possuem fator de potência menor que a unidade.
 11. A análise das formas de onda da tensão e da corrente em função do tempo de um circuito permite determinar o tipo de carga instalada. Analise as figuras a seguir e responda a que tipo de carga (resistiva, indutiva ou capacitiva) cada uma corresponde.





(b)



(c)

12. Uma lâmpada de um tipo especial necessita de uma tensão de 32 V e de uma corrente de 40 A para funcionar. Se a tensão disponível for de 127 V, que valor deverá ter a resistência colocada em série com essa lâmpada para que ela funcione?
13. Uma geladeira que consome 400 W está conectada em 127 V. Determine a resistência, a impedância e a reatância dessa geladeira, considerando que ela absorve uma corrente de 5 A. Calcule as potências envolvidas e construa o diagrama das potências.
14. Em um edifício devem ser instaladas 200 lâmpadas fluorescentes de 220V/40W. Os reatores ligados em série com essas lâmpadas consomem 8 W cada. Considerando que cada conjunto de lâmpada mais reator possui fator de potência de 0,4 ($\cos \theta = 0,4$), determine a corrente total desse edifício quando todas as lâmpadas estiverem ligadas.
15. Refaça os cálculos da questão anterior considerando que o fator de potência de cada conjunto seja 0,9.
16. Para compensar um circuito que possui potência reativa de 1 kVAR, qual deve ser a capacitância do capacitor ideal utilizado? Considere 220 V e 60 Hz.
17. Uma máquina de soldar de 220 V possui $\cos \theta = 0,5$ e consome 10 A. Para aumentar o fator de potência para 0,9, qual a potência reativa do capacitor que deve ser instalado em paralelo com essa máquina?

18. Qual será a reatância da máquina citada na questão anterior?
19. Na fase de planejamento de uma indústria é necessário decidir se a energia elétrica será recebida em alta ou baixa-tensão. Um dos fatores que determina o nível de tensão é a potência total instalada. A alta-tensão só é fornecida quando a potência total é superior a 75 kW. Determine a potência total e verifique o nível de tensão que deverá ser solicitado, considerando uma indústria onde serão instalados os seguintes equipamentos:
- um forno de 10 kW;
 - um forno de 15 kW;
 - motores, no total de 30 kVA e com $\cos \theta = 0,5$;
 - estufas no total de 5 kW;
 - motores, no total de 15 kVA e com $\cos \theta = 0,6$;
 - iluminação, no total de 10 kW.
20. Uma indústria que possui motores de indução totalizando 150 kVA operando com $\cos \theta = 0,6$ recebe uma carta da concessionária de energia elétrica solicitando o aumento do fator de potência para um valor igual ou superior a 0,92, caso contrário seria cobrada uma sobretaxa. Após estudos realizados para aumentar o FP optou-se por substituir uma caldeira a óleo combustível por uma caldeira elétrica de 30 kW ligada em paralelo com os motores.
- Determine o novo fator de potência da instalação. O que você conclui?
21. Uma indústria possui máquinas elétricas com potência total de 100 kVA e fator de potência 0,65. A tensão de alimentação dessas máquinas é de 380 V. Com o objetivo de melhorar o FP, foram instalados capacitores ideais com potência total de 50 kVAr em paralelo com as máquinas.
- Determine o novo FP da instalação. O que você conclui?
22. Uma indústria precisa comprar um transformador para alimentar as seguintes cargas: fornos com 10 kW e motores com 10 kVA e $\cos \theta = 0,5$. Que potência e fator de potência devem ser considerados na compra?
23. Toda instalação deve possuir dispositivos de proteção (DP) para proteger a fiação e os equipamentos, interrompendo a corrente caso ocorra alguma anormalidade. Um circuito com chuveiro de 2800 W e cafeteira de 1000 W apresenta um DP com capacidade máxima de 25 A (a partir desse valor o dispositivo interrompe a corrente, desligando o circuito da rede).

- a) Se o circuito for alimentado por uma tensão de 120 V, o dispositivo suportará?
- b) E se a tensão for de 220 V (supondo que os equipamentos possuam chave seletora de 120 para 220 V)?
24. Uma indústria possui as seguintes cargas ligadas em paralelo:
- carga 1 = {50 W e FP = 0,5};
- carga 2 = {216,5 VAR e 125 W};
- carga 3 = {150 VA e FP = 0,5};
- carga 4 = {125 W e 276 VAR};
- carga 5 = {708,9 VAR, com ângulo entre a tensão e a corrente de 80°}.
- Somente a carga 4 é capacitiva, as outras são indutivas.
- a) Determine o FP dessa indústria.
- b) Para que esse fator de potência seja corrigido para 0,92, qual a potência reativa do capacitor ideal que deve ser instalado em paralelo com as cargas?
- c) Determine a capacitância desse capacitor (considere $f = 60$ Hz).
- d) Se a tensão de alimentação é de 220 V, qual a corrente máxima exigida pela indústria antes e após a instalação do capacitor?

2.5.1 Respostas dos exercícios

1. É aquela que varia com o tempo, geralmente de forma senoidal, repetindo 60 ciclos por segundo ou 60 Hz.
2. a) $\theta = 0^\circ$;
b) $\theta = -90^\circ$;
c) $\theta = 90^\circ$.
3. 60 Hz.
4. É a oposição total que a corrente alternada sofre ao circular num circuito, sendo medida em ohm (Ω).
5. Potência ativa, ou potência útil, é aquela potência que está sendo transferida do gerador de energia para o consumidor. Watt.
6. Chuveiros, ebulidores, fornos a resistência, torradeiras, aquecedores de ambiente resistivos.

7. É responsável pela formação dos campos magnéticos dos enrolamentos das bobinas e dos campos elétricos nas armaduras dos capacitores. Volt-ampere reativo (VAr) ou kVAr.
8. Volt-ampere (VA) ou kVA.
9. É a relação entre a potência ativa e a potência aparente ou a porcentagem da potência aparente que está sendo transformada em trabalho útil.
10. Motores, transformadores, batedeiras, geladeiras, máquinas de lavar.
11. (a) carga resistiva; (b) carga indutiva; (c) carga capacitiva.
12. $R = 2,375 \Omega$.
13. $R = 16 \Omega$, $Z = 25,4 \Omega$, $X_L = 19,72 \Omega$, $Q = 493,2 \text{ VAr}$ e $S = 635 \text{ VA}$.
14. $I = 109,09 \text{ A}$.
15. $I = 48,48 \text{ A}$.
16. $C = 54,8 \mu\text{F}$.
17. $Q_c = 1372 \text{ VAr}$.
18. $35,28 \Omega$.
19. $P = 64 \text{ kW}$. O nível de tensão deverá ser em baixa-tensão.
20. $FP = 0,71$. A medida adotada não aumentará o fator de potência da instalação para 0,92.
21. $FP = 0,93$. Trata-se de uma medida eficiente na correção do fator de potência da instalação.
22. $S = 17,32 \text{ kVA}$ e $FP = 0,86$.
23. a) $I = 31,67 \text{ A}$, não suportará.
b) $I = 17,27 \text{ A}$, suportará.
24. a) $FP = 0,498$.
b) $Q = 654,10 \text{ kVAr}$.
c) $C = 35,84 \mu\text{F}$.
d) $I_{\text{antes}} = 4,54 \text{ A}$ e $I_{\text{depois}} = 2,64 \text{ A}$.

2.6 Estudos complementares

2.6.1 Saiba mais

Para revisão completa sobre cargas elétricas em corrente alternada, recomendamos estudar os capítulos 11, 12, 13 e 14 do livro:

GUSSOW, Milton. *Eletricidade básica*. São Paulo: Makron Books do Brasil, 1997.

2.6.2 Outras referências

<http://pt.wikipedia.org/wiki/corrente_alternada>

<<http://pt.wikipedia.org/wiki/capacitor>>

<<http://pt.wikipedia.org/wiki/indutor>>

<http://pt.wikipedia.org/wiki/circuito_rlc>

UNIDADE 3

Geração, transmissão e distribuição de
energia elétrica

3.1 Primeiras palavras

Nesta unidade, vamos aprender que existe uma tendência mundial a utilizar fontes renováveis de energia devido à economia e à preservação ambiental.

Vamos entender, também, como a energia elétrica é transmitida desde a sua geração até as unidades consumidoras nas residências, lojas e fábricas.

3.2 Problematizando o tema

O sistema elétrico de geração, transmissão e distribuição da energia elétrica é denominado *Sistema Elétrico de Potência* (SEP). Uma usina geradora de energia elétrica no Rio Grande do Sul está interligada por meio de redes aéreas com as demais usinas geradoras de energia do Brasil. Esse sistema recebe a denominação de *Sistema Interligado Nacional* (SIN). Assim, é possível aumentar a confiabilidade do SEP e alimentar regiões que estejam em períodos de seca, por exemplo.

3.3 Texto básico para estudos

A distribuição da energia elétrica no mundo não é homogênea. Um terço de toda a população mundial não tem acesso à energia elétrica; isso significa que dois bilhões de pessoas vivem, literalmente, no escuro. Metade dessas pessoas está no continente africano. Por outro lado, os Estados Unidos consomem um quarto de toda a energia elétrica produzida no mundo. Isso faz do país o segundo maior consumidor *per capita*, perdendo apenas para o Canadá.

O Brasil tem o maior potencial hídrico do mundo, abrangendo 15% do total das reservas mundiais de água doce. Mais de 90% da fonte de energia elétrica nacional é hídrica.

3.3.1 Conceito de energia

Energia é a quantidade de trabalho que um sistema é capaz de fornecer. Ela não pode ser criada, consumida ou destruída, apenas transformada. Por exemplo, quando abastecemos o carro com combustível, a energia química contida na gasolina ou no álcool transforma-se em movimento (energia cinética), em calor, (energia térmica) e em barulho (energia sonora).

Quando convertemos uma forma de energia em outra, parte dela é dissipada em outros tipos (calor, por exemplo). A relação entre a energia que entra no sistema de conversão e a que sai chama-se *rendimento*.

Há sistemas com alto rendimento (maior que 80%), como os motores elétricos, transformadores, entre outros; e sistemas com baixo rendimento (menor que 20%), como os motores de combustão interna.

As unidades de medida de energia são: joule (J), watt-hora (Wh) e caloria (cal). Sendo:

$$1\text{J} = 1[\text{W} \cdot \text{s}] = 4,1868 \text{ cal}$$

Quando tratamos de energia elétrica, a medida mais comum é o quilowatt-hora (kWh) ou megawatt-hora (MWh).

Não podemos confundir energia com potência. Embora sejam conceitos correlatos, a potência (medida em watt e seus múltiplos) é a quantidade de energia transferida por unidade de tempo (joule dividido por segundo). Ela pode ser medida em qualquer instante de tempo. Por outro lado, a energia precisa ser medida durante um intervalo de tempo (uma hora, um dia, um mês, um ano etc.).

Em outras palavras, a potência refere-se ao “montante de músculos” que a máquina tem e a energia ao “quanto esses músculos trabalharam” durante um período de tempo determinado.

3.3.2 Fontes de energia elétrica

As principais fontes de energia elétrica são: hídrica, térmica, nuclear, geotérmica, eólica, mareomotriz e fotovoltaica (também conhecida como solar).

3.3.2.1 Fontes renováveis e não renováveis de energia

A energia não renovável (também conhecida como convencional) recebe esse nome porque se baseia na queima de elementos que não podem ser repostos na natureza em curto prazo, por exemplo, o petróleo. Esse tipo de energia é poluente e contribui para o efeito estufa por meio da produção de dióxido de carbono (CO_2); e para a formação de chuva ácida, por meio do dióxido de enxofre (SO_2) e dos hidrocarbonetos (HC). Outros exemplos de fontes não renováveis de energia são: nuclear, gás natural, carvão mineral, xisto e turfa.

As fontes de energia renováveis (fontes limpas) são aquelas cujo elemento principal é facilmente repostos na natureza. Alguns exemplos são: hidráulica, eólica, dos oceanos, geotérmica, biomassa (madeira, cana-de-açúcar, resíduos agrícolas, carvão vegetal, óleos vegetais e biogás) e solar.

Há uma tendência mundial em substituir as fontes não renováveis pelas renováveis. A preservação ambiental é a razão principal, além da própria economia.

Hoje estamos sofrendo as consequências das alterações climáticas em todo o planeta, como aquecimento global, inundações, buracos na camada de ozônio, furacões, estações irregulares, temperaturas extremas, secas, desertificação, entre outras. Certamente esses fenômenos seriam minimizados, até mesmo eliminados, se utilizássemos apenas fontes renováveis de energia.

No Brasil, mais de 90% da fonte de energia elétrica é hídrica. Nem poderia ser diferente, afinal o país tem o maior potencial hídrico do mundo, abrangendo 15% do total das reservas mundiais de água doce.

3.3.2.2 Usinas hidrelétricas

As usinas hidrelétricas funcionam pela transformação da energia mecânica da queda-d'água em cinética de rotação do eixo de um gerador que a transforma em energia elétrica.

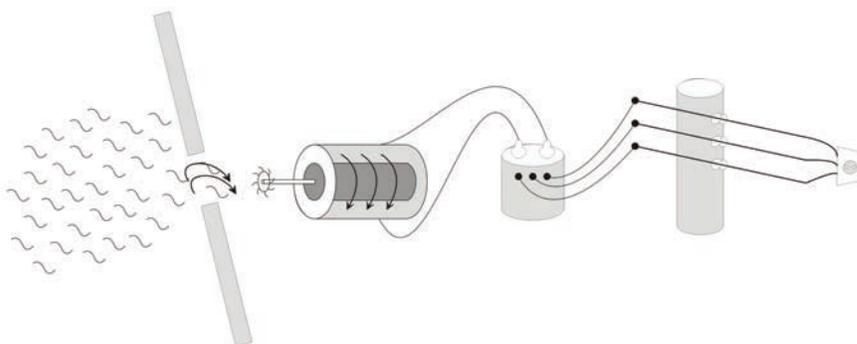


Figura 39 Energia hidrelétrica.

Os principais impactos negativos de uma usina hidrelétrica são:

- inundação de áreas agricultáveis;
- perda de fauna e flora;
- aumento de doenças de veiculação hídrica;
- perda da biodiversidade;
- efeitos sociais de relocação.

Os principais impactos positivos são:

- produção de energia;
- retenção de água regionalmente;
- aumento de água potável;
- aumento de potencial de irrigação;
- recreação e turismo;
- produção de peixes;
- possibilidade de trabalho para a população local.

3.3.2.3 Usinas termelétricas

O princípio de funcionamento das usinas termelétricas é simples. Com a queima de combustíveis, como carvão, petróleo e atualmente biomassa, o calor gerado aquece a água transformando-a em vapor. Este é conduzido em alta pressão por uma tubulação e faz girar as pás da turbina, cujo eixo está acoplado ao gerador. Novamente a energia cinética do movimento é transformada em elétrica.

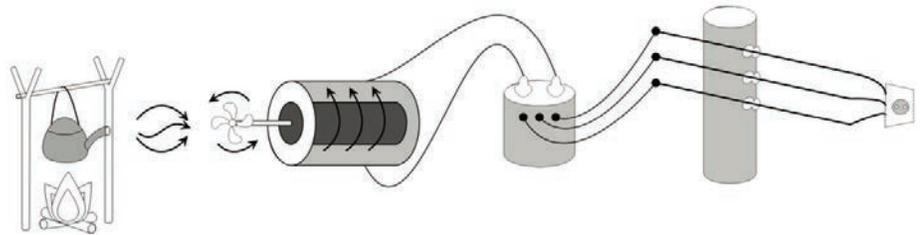


Figura 40 Energia termelétrica.

3.3.2.4 Usinas nucleares

A usina nuclear funciona com o mesmo princípio das termelétricas, ou seja, gera eletricidade com o vapor-d'água. A única diferença é que a energia para aquecer a água vem de uma reação nuclear em vez da queima de combustível.

A principal preocupação com esse tipo de energia é a segurança, principalmente após o acidente de Chernobyl.

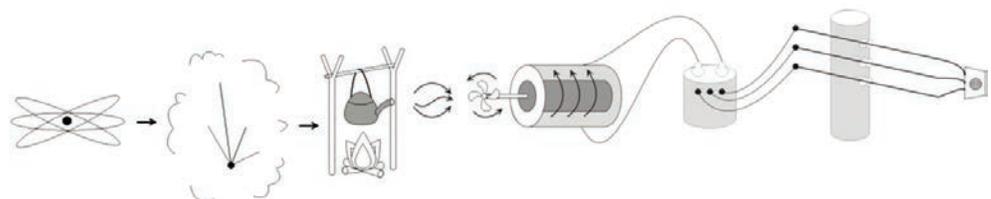


Figura 41 Energia nuclear.

3.3.2.5 Energia eólica

A energia eólica é produzida pela transformação da energia cinética dos ventos em elétrica. A conversão é feita por um gerador acoplado a pás que giram na presença do vento no alto de um poste.

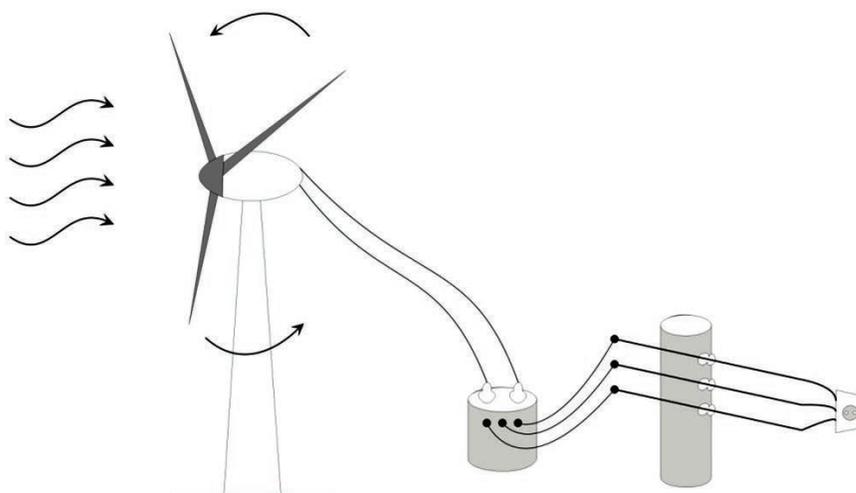


Figura 42 Energia eólica.

3.3.3 Geração e cogeração de energia elétrica

A geração é a transformação de qualquer tipo de energia mecânica em energia elétrica. Para isso, temos duas máquinas que funcionam em conjunto: a primária e o gerador.

A máquina primária é aquela que transforma a fonte principal de energia em energia cinética, mais precisamente em energia mecânica de rotação. Por exemplo, a turbina de uma hidrelétrica, que transforma a energia da queda-d'água em rotação do eixo de um gerador.

O gerador é uma máquina que transforma a energia mecânica de rotação aplicada ao seu eixo em energia elétrica.

A cogeração de energia pode ser definida como um processo de produção combinada de calor e energia elétrica (ou mecânica), a partir de um mesmo combustível, capaz de produzir benefícios sociais, econômicos e ambientais.

A atividade de cogeração contribui efetivamente para a racionalização energética uma vez que possibilita uma maior produção de energia elétrica e térmica a partir da mesma quantidade de combustível. A cogeração visa o reforço da energia disponível na concessionária. Basicamente, ela é feita com geradores

de energia a diesel e pode dividir toda a carga na planta consumidora ou até mesmo substituir por completo a concessionária de energia elétrica.

Na decisão de se fazer cogeração de energia elétrica, os seguintes fatores deverão ser analisados: preço do barril de óleo para geração, preço do MWh da energia na região, custo das instalações, custo de manutenção, demanda de energia etc.

3.3.3.1 Gerador de tensão trifásica

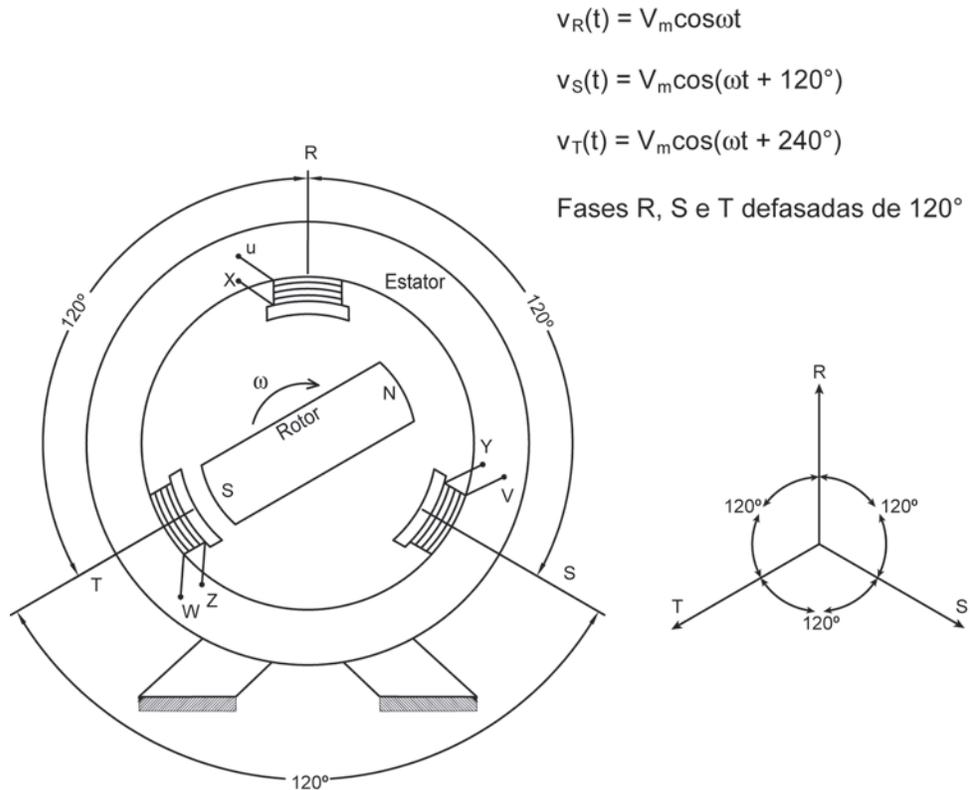


Figura 43 Corte de um gerador de tensão trifásica.

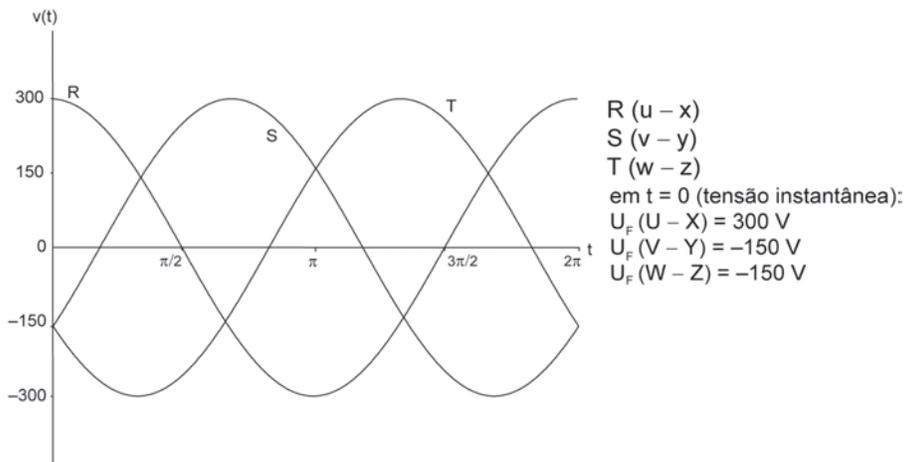


Figura 44 Formas de onda resultantes.

O estator do gerador possui três enrolamentos. As tensões alternadas (tensões de fase) estão defasadas uma em relação à outra. Em cada instante a soma das três tensões é zero. O enrolamento R está defasado 120° em relação a S e 240° em relação a T.

Representação:

Fases: U – X
 V – Y
 W – Z

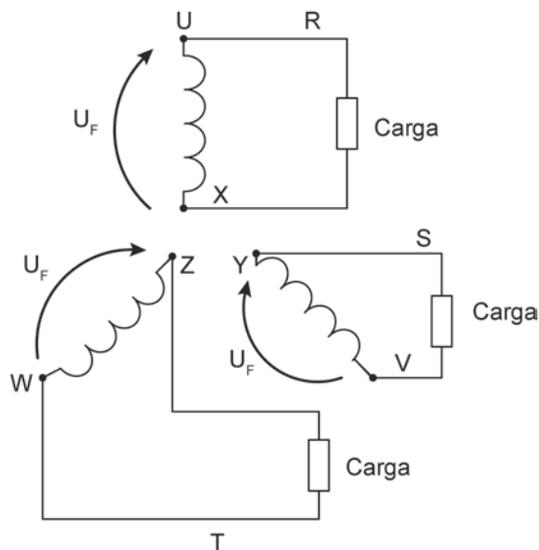


Figura 45 Tensão de fase U_F .

3.3.3.1.1 Ligação em estrela (Y)

Com $R_1 = R_2 = R_3 = 100 \Omega$ (carga trifásica equilibrada).

Condutores R, S e T:

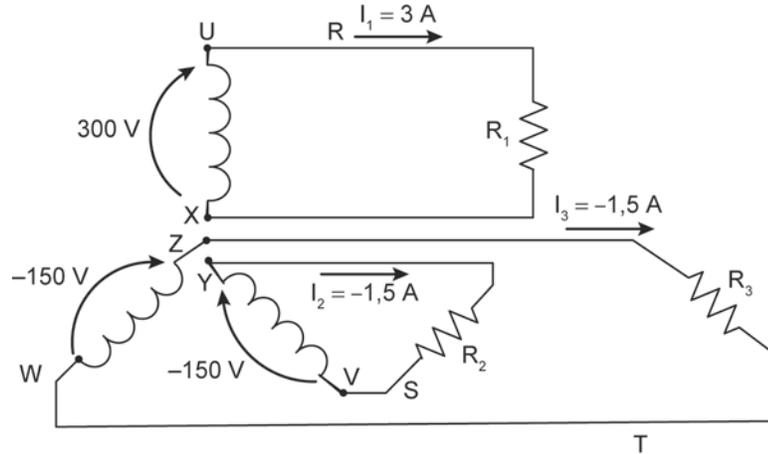


Figura 46 Ligação estrela.

$$I_1 = 3 \text{ A}$$

$$I_2 = I_3 = -1,5 \text{ A}$$

Em cada instante a soma das correntes é zero.

Rede trifásica com quatro fios – ligação encadeada $\Rightarrow X = Y = Z$

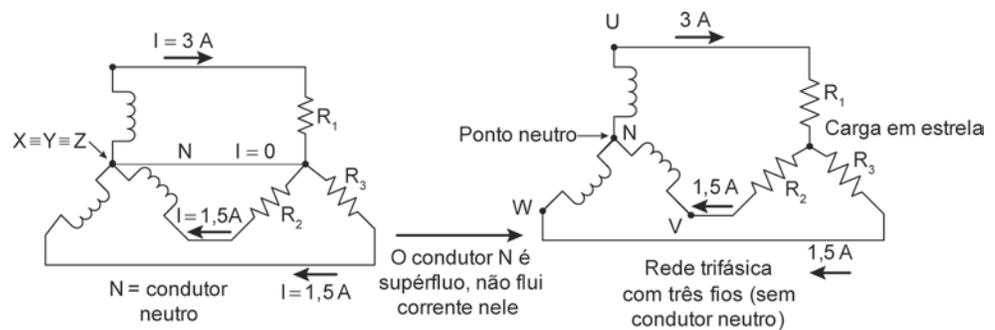


Figura 47 Ligações em estrela com e sem condutor neutro.

Relação entre as correntes e as tensões na ligação estrela sem condutor neutro.

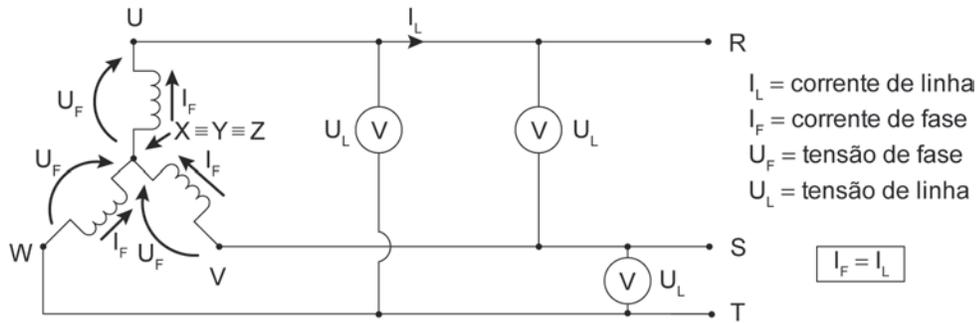


Figura 48 Ligação em estrela sem condutor neutro.

Tensão de linha: $\overline{U_L} = \overline{U_F} + \overline{U_F}$ (soma vetorial, geométrica ou fasorial).

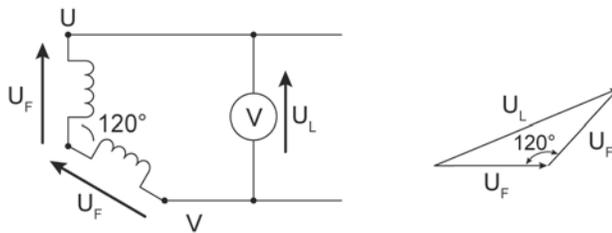


Figura 49 Tensões de linha e de fase na ligação estrela.

Cálculo de U_L :

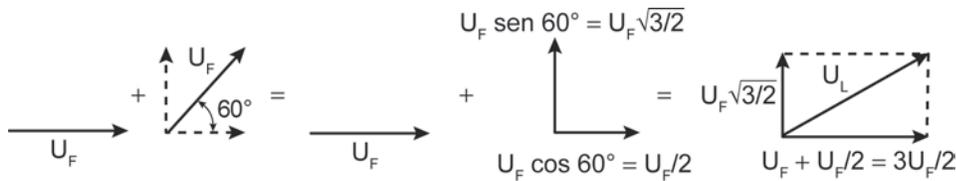


Figura 50 Diagrama fasorial da tensão de linha.

$$U_L = \sqrt{\left(\frac{\sqrt{3}}{2}U_F\right)^2 + \left(\frac{3}{2}U_F\right)^2} = \sqrt{3U_F^2} = \sqrt{3}U_F \Rightarrow \therefore U_L = \sqrt{3}U_F$$

As cargas em estrela podem ser ligadas à rede trifásica em estrela sem condutor neutro somente se elas carregarem igualmente os três ramos do gerador ($R_1 = R_2 = R_3$). Se a rede for carregada de maneira desigual, a tensão será distribuída desigualmente entre as resistências, podendo haver sobretensão em uma delas.

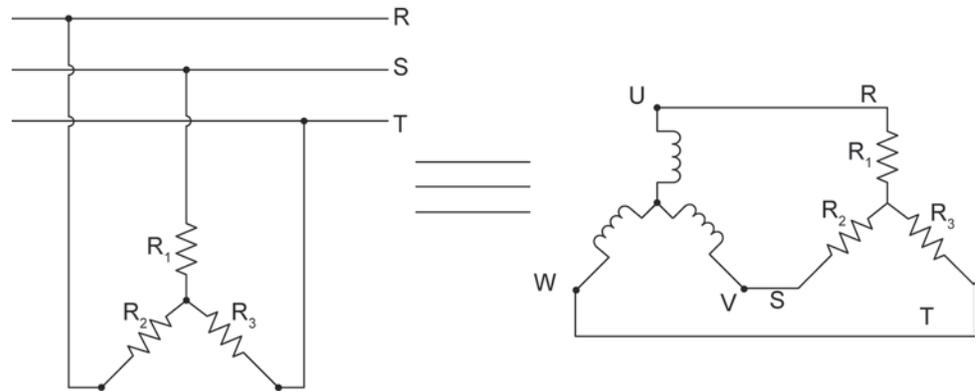


Figura 51 Circuito em estrela equilibrado.

Exemplos:

- forno elétrico com três resistores iguais;
- motor que possui três enrolamentos do estator iguais.

Cargas que podem ser ligadas e desligadas (lâmpadas, geladeira etc.) devem ser ligadas entre fios externos (U_L).

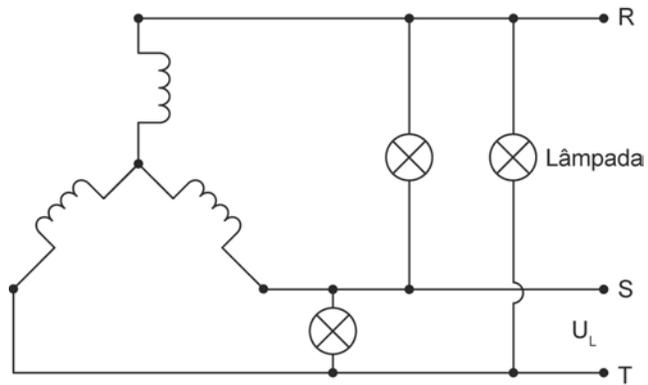


Figura 52 Exemplo de cargas ligadas na configuração estrela.

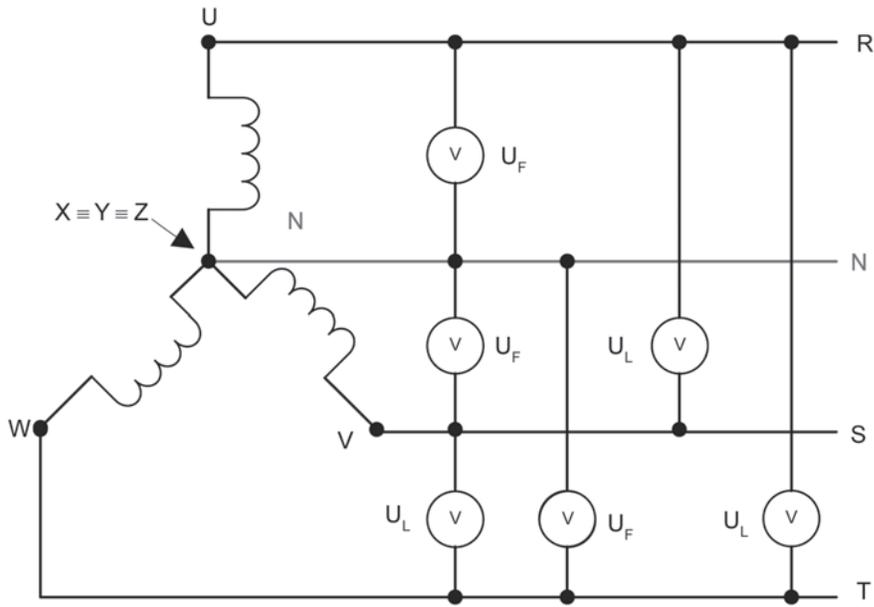


Figura 53 Ligação estrela com condutor neutro.

O consumidor residencial tem a sua disposição duas tensões diferentes:

- $U_F/U_L = 127/220$ V (rede de distribuição trifásica normalizada);
- $U_L = 220$ V – tensão entre duas fases (tensão de linha);
- $U_F = 127$ V – tensão entre fase e neutro (tensão de fase).

O consumidor industrial tem a sua disposição duas tensões diferentes:

- $U_F/U_L = 220/380$ V (rede de distribuição trifásica industrial);
- $U_L = 380$ V – tensão entre duas fases (tensão de linha);
- $U_F = 220$ V – tensão entre fase e neutro (tensão de fase).

Transformador ligado em estrela:

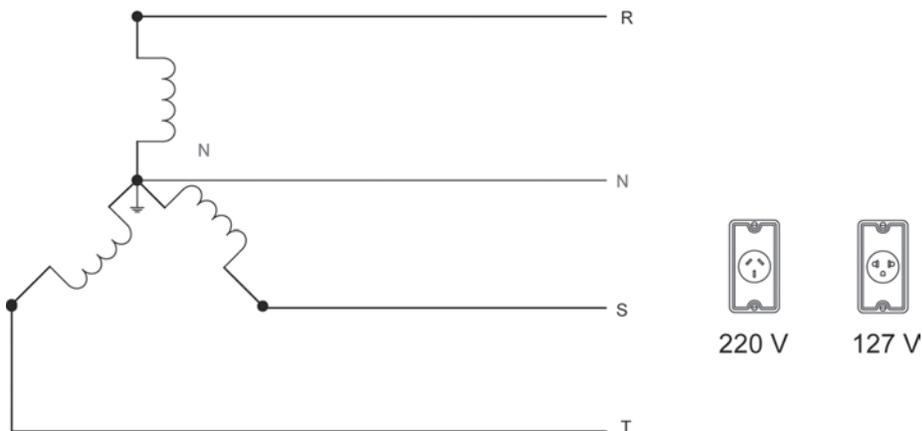


Figura 54 Esquema de um transformador ligado em estrela com neutro acessível.

Motores elétricos trifásicos e consumidores de alta potência (fornos, estufas, aquecimento, entre outros, com $P > 18 \text{ kW}$) são normalmente ligados nas três fases.

Lâmpadas, aparelhos eletrodomésticos, ferramentas elétricas etc. são normalmente ligados entre dois condutores de fase (U_L) ou entre um condutor de fase e um condutor neutro (U_F).

Normalmente, no Brasil:

- instalações residenciais e comerciais: 127/220 V, em que $U_L = 220 \text{ V}$ e $U_F = 127 \text{ V}$;
- instalações industriais: 220/380 V, em que $U_L = 380 \text{ V}$ e $U_F = 220 \text{ V}$.

Exemplo: cada fase de um gerador ligado em estrela libera uma corrente de 30 A para uma tensão de fase de 254 V e um fator de potência de 80% indutivo.

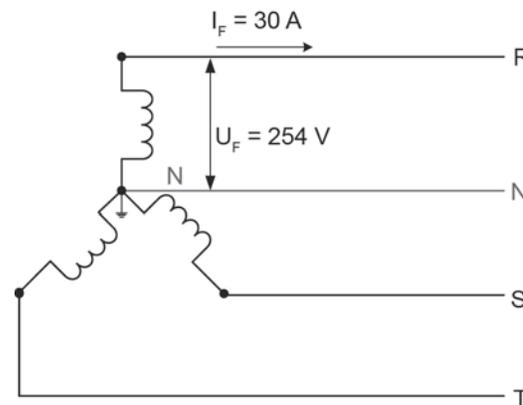


Figura 55 Gerador ligado em estrela.

- Qual a tensão no terminal do gerador?
- Qual a potência ativa desenvolvida em cada fase?
- Qual a potência ativa trifásica total desenvolvida?

Respostas:

$$\text{a) } U_L = \sqrt{3} \cdot U_f \Rightarrow U_L = \sqrt{3} \cdot 254 \Rightarrow U_L = 440 \text{ V}$$

$$\text{b) } P = U_f \cdot I_f \cdot \cos \theta \Rightarrow P = 254 \cdot 30 \cdot 0,80 \Rightarrow P = 6096 \text{ W}$$

$$\text{c) } P_T = 3 \cdot P_f \Rightarrow P_T = 3 \cdot 6096 \Rightarrow P_T = 18288 \text{ W}$$

3.3.3.1.2 Ligação em triângulo (D)

Redes trifásicas com ligação em triângulo raramente são empregadas em circuitos consumidores.

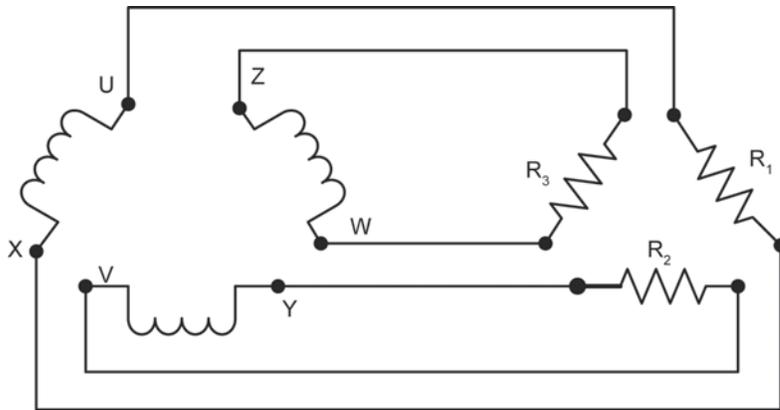


Figura 56 Ligação em triângulo.

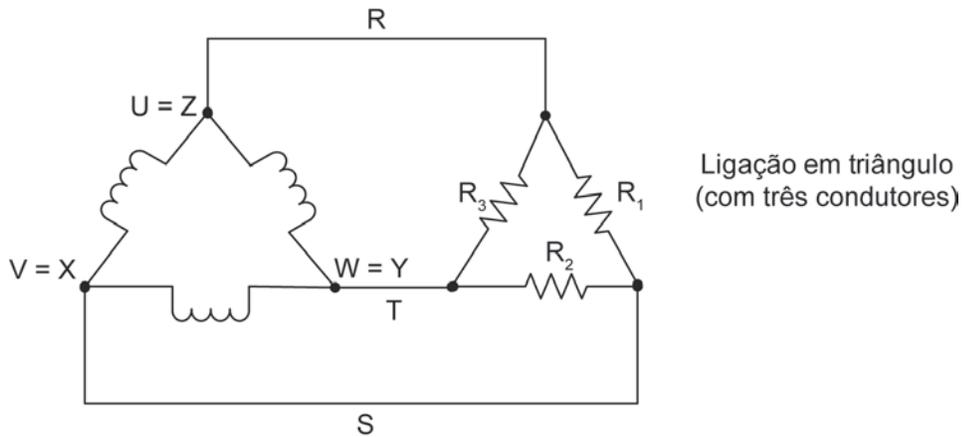


Figura 57 Ligação em triângulo (com três condutores).

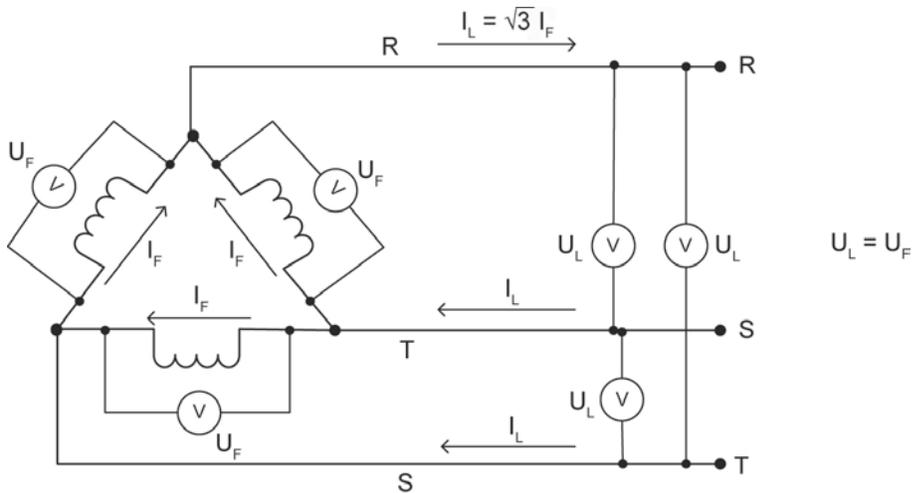


Figura 58 Tensões e correntes na ligação em triângulo.

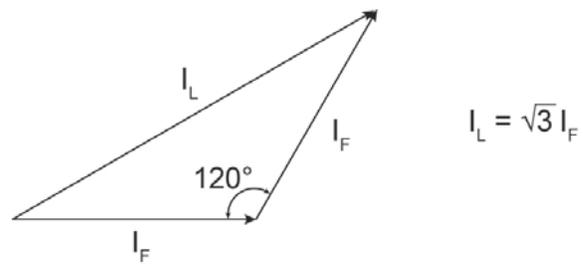


Figura 59 Diagrama fasorial das correntes de linha e de fase.

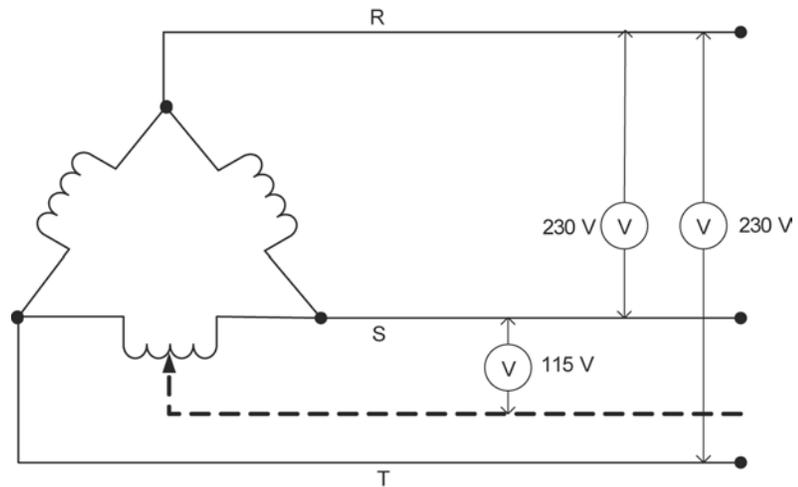


Figura 60 Ligação em triângulo com quatro condutores.

3.3.3.1.3 Potência da corrente trifásica nas ligações estrela e triângulo

A potência ativa (P) da corrente trifásica é igual à soma das potências ativas das correntes alternadas das três fases.

$$\text{Ligação estrela (Y): } \begin{cases} U_F = \frac{U_L}{\sqrt{3}} \\ I_L = I_f \end{cases}$$

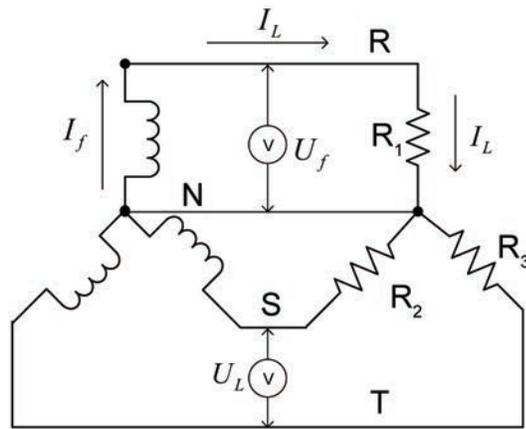


Figura 61 Ligação em estrela com neutro.

Na carga equilibrada das fases ($R_1 = R_2 = R_3$), a potência é dada por:

$$P = 3 \cdot U_f \cdot I_L \cdot \cos \theta = 3 \cdot \frac{U_L}{\sqrt{3}} \cdot I_L \cdot \cos \theta = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \cos \theta - \text{potência ativa (watt)};$$

$$S = 3 \cdot U_f \cdot I_L = 3 \cdot \frac{U_L}{\sqrt{3}} \cdot I_L = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L - \text{potência aparente (VA)};$$

$$Q = 3 \cdot U_f \cdot I_L \cdot \sin \theta = 3 \cdot \frac{U_L}{\sqrt{3}} \cdot I_L \cdot \sin \theta = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \sin \theta - \text{potência reativa (VA)}.$$

Vantagens do circuito trifásico:

$$1) P = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \cos \theta \Rightarrow \text{trifásico}$$

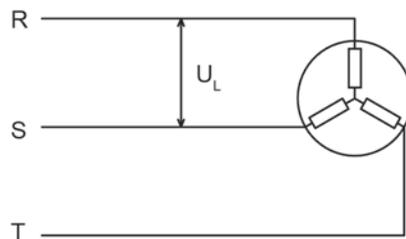


Figura 62 Tensão de linha em carga ligada em estrela.

$P = U I \cos \theta \Rightarrow$ monofásico ou bifásico \Rightarrow duas opções:

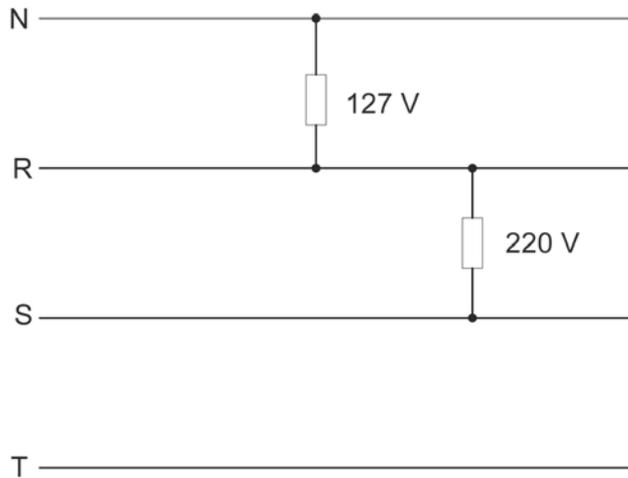


Figura 63 Tensões entre fases e entre fase e neutro.

Apesar do número de linhas passar de dois para três (50%), a potência aumenta em 1,73 (73%).

2) As máquinas trifásicas (motores e geradores) têm vantagens de operação, sendo sempre preferidas quando a potência supera alguns kW (os motores trifásicos têm conjugado constante e, por isso, vibram menos que os monofásicos). Há também um melhor aproveitamento de material nos transformadores trifásicos: o núcleo de ferro destes é mais leve, para uma mesma potência.

Para uma mesma potência ativa, a corrente exigida por uma máquina trifásica é 1,73 vezes menor.

Ligação em triângulo (D):

$$\begin{cases} U_F = U_L \\ I_f = \frac{I_L}{\sqrt{3}} \end{cases}$$

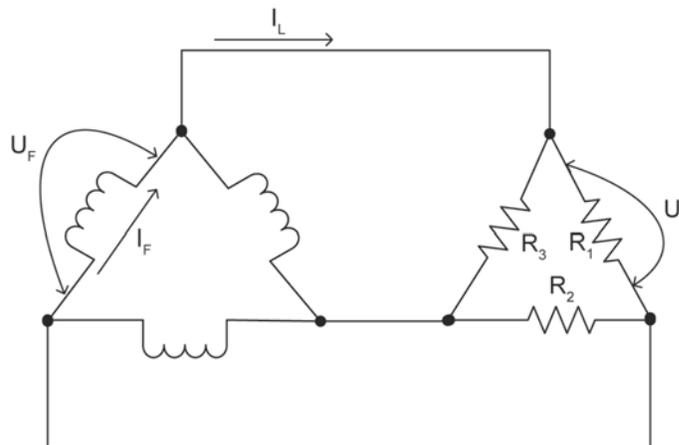


Figura 64 Ligação em triângulo.

$$P = 3 \cdot U_L \cdot I_f \cdot \cos \theta = 3 \cdot U_L \cdot \frac{I_L}{\sqrt{3}} \cdot \cos \theta = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \cos \theta - \text{potência ativa (watt)};$$

$$S = 3 \cdot U_L \cdot I_f = 3 \cdot U_L \cdot \frac{I_L}{\sqrt{3}} = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L - \text{potência aparente (VA)};$$

$$Q = 3 \cdot U_L \cdot I_f \cdot \sin \theta = 3 \cdot U_L \cdot \frac{I_L}{\sqrt{3}} \cdot \sin \theta = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \sin \theta - \text{potência reativa (VA)}.$$

Exemplo: qual a potência ativa recebida (de entrada) por um motor trifásico que, quando ligado a uma tensão de linha de 380 V, recebe uma corrente de 12 A e apresenta um fator de potência 0,80?

$$U_L = 380 \text{ V}$$

$$I_L = 12 \text{ A}$$

$$\cos \theta = 0,80$$

$$P = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \cos \theta \quad \Rightarrow \quad P = 1,73 \cdot 380 \cdot 12 \cdot 0,80 = 6,30 \text{ kW}$$

3.3.4 Transmissão de energia elétrica

A transmissão da energia do gerador para os grandes centros consumidores é feita em corrente alternada, uma vez que podemos elevar os níveis de tensão por meio de transformadores e obter perdas menores de energia/potência.

A potência elétrica é dada pelo produto $U \times I$, sendo U igual à tensão elétrica em volts, I igual à corrente elétrica em amperes e P igual à potência em watts.

Aumentar a corrente implicaria em cabos com secção transversal maior (maior bitola), o que também aumentaria o peso e levaria à necessidade de torres maiores e mais robustas. Multiplique o custo disso por milhares e milhares de quilômetros de linhas de transmissão.

A alternativa é aumentar a tensão, pois o produto $P = U \times I$ aumenta na mesma proporção, aumentando a potência disponível sem aumentar as dimensões dos cabos e torres.

Os níveis das tensões elétricas dependem de cada região e de cada *link* de transmissão. Os geradores de Itaipu, por exemplo, geram energia a, aproximadamente, 13,8 kV (13800 V). Um transformador elevador aumenta essa tensão para até 500 kV, o valor da transmissão. Há ainda outros níveis de tensão para transmissão. Os mais comuns são: 230 kV, 500 kV, 750 kV e até 1000 kV.

Os níveis de tensão elétrica, de acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2013), são classificados em:

- *baixa-tensão*: < 1000 V;
- *média-tensão*: de 1000 V até 69 kV;
- *alta-tensão*: acima de 69 kV.

Nas linhas de transmissão aéreas são usados, geralmente, cabos nus de alumínio com alma de aço, os quais ficam suspensos em torres metálicas através de isoladores. Já nas linhas de transmissão subterrâneas, são utilizados cabos isolados com borracha etileno-propileno (EPR).

Grandes consumidores, tais como complexos industriais de grande porte, são alimentados pelas concessionárias de energia elétrica a partir das linhas de transmissão. Nesses casos, as etapas posteriores de abaixamento da tensão são levadas a efeito pelo próprio consumidor.

3.3.5 Distribuição e utilização de energia elétrica

Nos centros urbanos (cidades), a energia é novamente transformada em uma subestação abaixadora do nível de tensão de transmissão para 13,8 kV ou 11,9 kV. É com esse valor que a tensão chega aos postes dentro das cidades.

Até esse ponto, a linha chama-se linha primária. No poste, um transformador reduz a tensão para 127/220 V, de onde partem as linhas de distribuição secundária.

A última etapa de um sistema elétrico é a utilização. Ela ocorre, via de regra, nas instalações elétricas, em que a energia gerada nas usinas é transportada pelas linhas de transmissão e distribuição e transformada, pelos equipamentos de utilização, em energia mecânica, térmica e luminosa, para ser finalmente utilizada.

O consumidor final de energia pode ser residencial, com valores nominais de tensão em 127 V/220 V, ou industrial, em 220 V/380 V e 254 V/440 V.

3.4 Considerações finais

Tratamos nesta unidade do Sistema Elétrico de Potência, desde a geração até a transmissão, distribuição e utilização da energia elétrica. Vimos também que os geradores e os transformadores trifásicos de energia podem ser ligados basicamente de duas formas distintas: em estrela (Y) ou em triângulo (D).

3.5 Exercícios

1. Qual é a diferença entre potência e energia?
2. O que são fontes renováveis e não renováveis de energia? Cite exemplos.
3. Que tipo de conversão de energia ocorre em uma usina hidrelétrica?
4. Em uma usina de açúcar e álcool, existe a geração de energia elétrica tendo-se como combustível o bagaço da cana. Explique como esse processo ocorre.
5. Qual a potência aparente de um transformador com secundário ligado em triângulo, sabendo-se que sua tensão de linha é 220 V e sua corrente de fase é 10 A?
6. Onde e como o condutor neutro aparece nos sistemas de energia elétrica?
7. Cada fase de um gerador trifásico ligado em triângulo (D) alimenta uma corrente com carga máxima de 100 A numa tensão de 240 V e com um fator de potência de 0,60 indutivo. Calcule:
 - a) a tensão de linha U_L ;
 - b) a corrente de linha I_L ;
 - c) a potência trifásica em kVA;
 - d) a potência trifásica em kW.

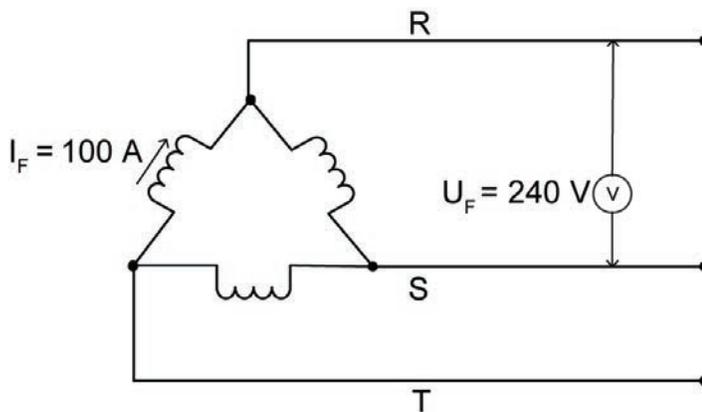


Figura 65 Circuito equivalente.

8. Três resistências de 20Ω cada estão ligadas em estrela a uma linha trifásica de 240 V, funcionando com um fator de potência de uma unidade. Calcule:

- a) a corrente através de cada resistência;
- b) a corrente da linha;
- c) a potência consumida pelas três resistências.

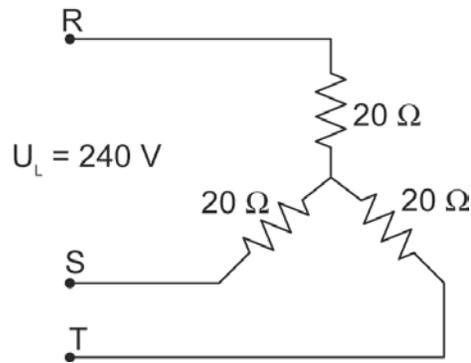


Figura 66 Circuito equivalente.

9. Repita o exercício anterior, agora para o caso em que as três resistências estejam ligadas em triângulo.

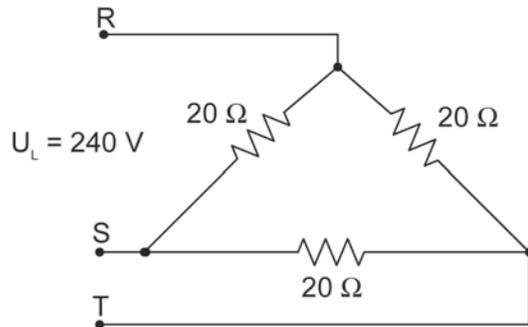


Figura 67 Circuito equivalente.

10. Quais as especificações de corrente do primário e do secundário de um transformador trifásico de 500 kVA abaixador de tensão de um triângulo de 480 V para uma estrela de 120/208 V?

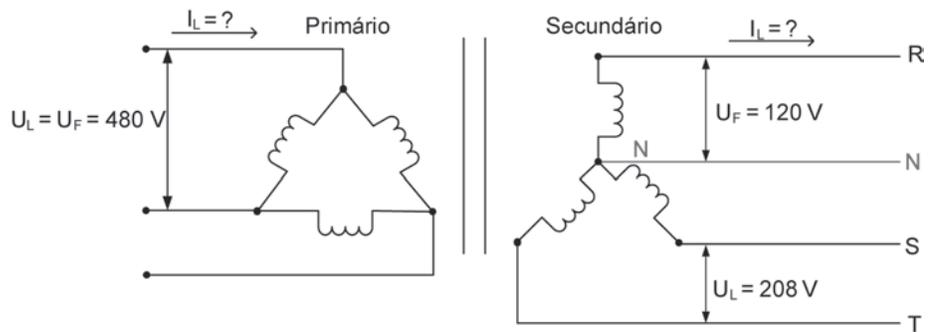


Figura 68 Circuito equivalente.

11. Se a tensão de fase ou do enrolamento no secundário for de 120 V, qual a tensão da linha do secundário para ligações estrela e triângulo de um transformador trifásico?
12. Um gerador ligado em triângulo fornece 100 V como tensão da linha e 25 A como corrente da linha. Quais os valores da tensão e da corrente para cada enrolamento ou fase?
13. Um gerador ligado em estrela fornece 40 A para cada linha e tem uma tensão de fase de 50 V. Calcule a corrente através de cada fase e a tensão da linha.
14. Um sistema trifásico com carga equilibrada conduz 30 A com um fator de potência de 0,75. Se a tensão da linha for de 220 V, qual a potência liberada?
15. Calcule os kW e os kVA consumidos por um motor trifásico com um fator de potência de 86% quando ele estiver consumindo 25 A em 240 V.
16. Um sistema trifásico fornece 34,2 A a uma tensão de linha de 208 V para uma carga equilibrada com 89% de fator de potência. Calcule a especificação do transformador em kVA.
17. Quais são os níveis típicos de tensão na geração, transmissão e distribuição da energia elétrica?

3.5.1 Respostas dos exercícios

1. Potência é a quantidade de energia transferida por unidade de tempo. Sua unidade de medida é o watt, que equivale ao joule por segundo. Energia é a quantidade de trabalho efetivamente realizado. Em outras palavras, a potência refere-se ao montante de “músculos” que um sistema tem. Já a energia, ao quanto esses “músculos” trabalharam.
2. Fontes renováveis de energia são aquelas cujo combustível pode ser repostado na natureza com facilidade. Por exemplo: energia hídrica, eólica, solar, entre outras. Fontes não renováveis são aquelas que utilizam combustíveis fósseis à base de hidrocarbonetos, por exemplo, petróleo.
3. A energia potencial de milhões de litros d’água represados em uma barreira converte-se em cinética na queda-d’água, movimentando os eixos das turbinas e, conseqüentemente, gerando energia elétrica.
4. O bagaço de cana é queimado em uma caldeira para geração de vapor, que, por sua vez, aciona uma turbina a vapor e, através de um redutor de velocidade, aciona o eixo do gerador de energia elétrica.

5. $S = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L$, em que $U_L = U_F = 220 \text{ V}$ e $I_L = \sqrt{3} \cdot I_F$;
 $S = \sqrt{3} \cdot U_F \cdot \sqrt{3} \cdot I_F = 3 \cdot U_F \cdot I_F \Rightarrow S = 3 \cdot 220 \cdot 10 = 6600 \text{ VA}$.
6. Geralmente no transformador do poste na rede secundária e por meio de uma derivação do secundário ligado em estrela em conjunto com hastes de aterramento.
7. a) $U_L = U_F = 240 \text{ V}$;
 b) $I_L = \sqrt{3} \cdot I_F \Rightarrow I_L = \sqrt{3} \cdot 100 = 173 \text{ A}$;
 c) $S = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \Rightarrow S = \sqrt{3} \cdot 240 \cdot 173 = 71,9 \text{ kVA}$;
 d) $P = S \cdot \cos \theta \Rightarrow P = 71,9 \cdot 0,6 = 43,1 \text{ kW}$.
8. a) $I_F = ?$; $U_F = U_L / \sqrt{3} \Rightarrow U_F = 138,6 \text{ V}$;
 $I_F = U_F / R \Rightarrow I_F = 138,6 / 20 \Rightarrow I_F = 6,93 \text{ A}$;
 b) $I_L = I_F = 6,93 \text{ A}$
 c) $P = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \Rightarrow P = \sqrt{3} \cdot 240 \cdot 6,93 \Rightarrow P = 2880 \text{ W}$.
9. a) $I_F = U_F / 20 \Rightarrow I_F = 240 / 20 = 12 \text{ A}$;
 b) $I_L = \sqrt{3} \cdot I_F \Rightarrow I_L = \sqrt{3} \cdot 12 = 20,8 \text{ A}$;
 c) $P = \sqrt{3} \cdot 240 \cdot 20,8 \Rightarrow P = 8640 \text{ W}$.
10. Primário: $S = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L = 500000 \Rightarrow I_L = 500000 / \sqrt{3} \cdot 480 = 601,4 \text{ A}$;
 Secundário: $S = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L = 500000 \Rightarrow I_L = 500000 / \sqrt{3} \cdot 208 = 1388 \text{ A}$.
11. $Y_L \Rightarrow U_L = \sqrt{3} U_{FL} \Rightarrow U_L = 207,8 \text{ V}$;
 $D_L \Rightarrow U_L = U_F = 120 \text{ V}$.
12. $U_L = U_F = 100 \text{ V}$ e $I_F = I_L / \sqrt{3} \Rightarrow I_F = 25 / \sqrt{3} = 14,43 \text{ A}$.
13. $I_F = I_L = 40 \text{ A}$ e $U_L = \sqrt{3} U_{FL} \Rightarrow U_L = \sqrt{3} \cdot 50 = 86,6 \text{ V}$.
14. $P = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \cos \theta \Rightarrow P = \sqrt{3} \cdot 220 \cdot 30 \cdot 0,75 = 8573 \text{ W}$.
15. $S = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L = \sqrt{3} \cdot 240 \cdot 25 = 10,4 \text{ kVA}$ e $P = S \cdot \cos \theta = 10,4 \cdot 0,86 = 8,94 \text{ kW}$.
16. $P = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \cos \theta = \sqrt{3} \cdot 208 \cdot 34,2 \cdot 0,89 = 10,97 \text{ kW}$ e $S = 12,32 \text{ kVA}$.
17. Geração e distribuição até 13,8 kV e transmissão de 69 até 1000 kV.

3.6 Estudos complementares

3.6.1 Saiba mais

Para aprofundar os conhecimentos adquiridos nesta unidade, recomendamos estudar o capítulo 17 do livro:

GUSSOW, Milton. *Eletricidade básica*. São Paulo: Makron Books do Brasil, 1997.

Recomendamos estudar também os capítulos 1 e 2 do livro:

CAPELLI, Alexandre. *Energia elétrica para sistemas automáticos da produção*. São Paulo: Érica, 2007. 320 p.

3.6.2 Outras referências

<http://pt.wikipedia.org/wiki/Geração_de_eletricidade>

<http://pt.wikipedia.org/wiki/Sistema_trifásico>

<http://pt.wikipedia.org/wiki/Energia_renovável>

<http://pt.wikipedia.org/wiki/Energia_elétrica>

<http://pt.wikipedia.org/wiki/Transmissão_de_energia_elétrica>

UNIDADE 4

Instalações elétricas

4.1 Primeiras palavras

Nas instalações elétricas de baixa-tensão encontram-se os pontos terminais de utilização da energia elétrica, de forma que qualquer usuário corre o risco de tomar um choque. Nesta unidade vamos aprender os cuidados e as normas técnicas que precisam ser seguidas para termos uma instalação elétrica segura.

4.2 Problematizando o tema

Um condutor de energia pelo qual percorre uma corrente elétrica acima daquela permitida pela norma ou um contato elétrico deficiente são fontes de aquecimento que resultam em problemas para o funcionamento normal da instalação e podem até ser a causa de um incêndio. Em nosso país, infelizmente, as instalações elétricas são executadas, em certos casos, por profissionais não qualificados para esses serviços. Em noticiários a respeito de incêndios em edificações é comum atribuir ao curto-circuito a causa do incidente.

4.3 Texto básico para estudos

4.3.1 Generalidades

A norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) que trata do assunto em estudo denomina-se *NBR 5410 – Instalações Elétricas de Baixa-Tensão*. Foi revisada em 2004 e passou a valer a partir de 31 de março de 2005.

Uma instalação elétrica é o conjunto de materiais elétricos constituídos para a utilização da energia elétrica com segurança.

São consideradas instalações de baixa-tensão aquelas alimentadas com tensão alternada acima de 50 V e abaixo de 1000 V.

Os materiais elétricos de uma instalação necessários ao seu funcionamento são:

- a) *equipamentos de alimentação da instalação*, como geradores, transformadores e baterias;
- b) *equipamentos de utilização transformando a energia elétrica em uma outra forma de energia que seja utilizável*, como motores, resistores, luminárias etc.;

- c) *condutores elétricos*, geralmente de cobre ou alumínio com isolamento apropriada e seus elementos de proteção mecânica como eletrodutos, perfilados, eletrocalhas ou leitos para interligação entre os equipamentos de alimentação e de utilização;
- d) *equipamentos de proteção dos circuitos*, como disjuntores, dispositivos fusíveis e relés digitais;
- e) *equipamentos de comando*, como contadores e relés eletromecânicos.

Quando nos referimos às instalações elétricas, usamos alguns termos que são rotineiros na linguagem usual de eletrotécnica:

- *Comando*: é a ação humana ou de dispositivo automático que modifica o estado ou condição de determinado equipamento. Como exemplo temos o acionamento de um interruptor de uma luminária fluorescente.
- *Manobra*: é a mudança na condição elétrica de um equipamento em resposta a um determinado comando elétrico. Como exemplo temos o desligamento automático de um motor elétrico através de seu relé térmico devido a uma sobrecarga em seu eixo.
- *Cargas*: são os equipamentos de utilização que absorvem a potência dos equipamentos de alimentação da instalação. Para cargas com potência nominal acima de 1270 VA, na tensão de 127 V, precisamos de um circuito independente desde o quadro de distribuição.
- *Circuito em carga*: acontece quando o equipamento está sendo utilizado e há corrente elétrica circulando pelos condutores.
- *Circuito em vazio*: acontece quando o equipamento está energizado, mas não está transferindo potência. É o caso típico de um transformador de força que permanece ligado durante o período da madrugada, mas não fornece corrente para as cargas ligadas em seu enrolamento secundário.
- *Falta elétrica*: é uma fuga expressiva de corrente entre duas ou mais partes de uma instalação que estejam sob potenciais diferentes. Como exemplo, dois condutores de fases diferentes encostando um no outro, ou um condutor energizado em contato com um invólucro metálico ligado à terra. Uma falta pode ser direta quando há contato físico entre elas, ou não direta quando não há contato físico e sim um arco entre as partes. Um curto-circuito é uma falta direta entre condutores energizados entre fases, entre fases e neutro, ou entre fases e terra.

- *Sobrecorrente*: é uma corrente que excede um valor nominal pré-fixado como a capacidade de condução de corrente de um condutor. Um disjuntor termomagnético com corrente nominal de 20 A protege um circuito com cabo elétrico de secção de 2,5 mm², uma corrente permanente de 22 A nesse circuito é considerada uma sobrecorrente.

Nas instalações elétricas, as sobrecorrentes podem ser de dois tipos:

- as correntes de *sobrecarga*, que são sobrecorrentes produzidas por excesso de cargas elétricas ligadas em um mesmo circuito. Nesse caso a proteção do circuito deve atuar para a proteção dos condutores de ligação desse circuito;
- as correntes de *falta*, que são as fugas de correntes que fluem de um condutor para outro e/ou para a terra, no caso de uma falta. Em particular, quando a falta é direta e entre condutores vivos, falamos em corrente de curto-circuito.

As correntes de sobrecarga podem ser causadas por:

- subdimensionamento de circuitos durante o projeto elétrico das instalações;
- substituição de equipamentos de utilização por outros de maior potência ou inclusão de equipamentos de utilização não previstos inicialmente;
- motores elétricos que estejam acionando cargas mecânicas excessivas em seu eixo e conseqüentemente com potência elétrica acima da sua potência nominal.

As correntes de sobrecarga devem ser eliminadas no menor tempo possível, sob pena de provocarem, por aquecimento, uma redução na vida útil dos condutores.

As correntes de curto-circuito, por sua vez, são superiores às correntes nominais e se não forem interrompidas instantaneamente podem provocar o superaquecimento e a inutilização dos condutores, além de poderem ocasionar o início de um incêndio.

A corrente de fuga é a corrente que flui para a terra ou para elementos condutores estranhos à instalação devido à imperfeição da isolação dos condutores elétricos de energia.

Na prática sempre existe, em qualquer circuito elétrico, uma corrente de fuga, uma vez que não há isolantes perfeitos. No entanto, em condições

normais, as correntes de fuga são extremamente baixas (só detectáveis por miliamperímetros muito sensíveis) e não chegam a causar influências prejudiciais à instalação.

4.3.2 Condutores de energia elétrica

Um condutor elétrico pode ser denominado de cabo ou fio e é utilizado para transportar energia elétrica entre os equipamentos de alimentação e os equipamentos de utilização. Em eletrônica, informática e telecomunicações são também utilizados para transmitir sinais elétricos.

O cobre e o alumínio são os metais mais usados na fabricação de condutores elétricos, tendo em vista suas propriedades físicas de condutividade e seu custo quando comparado ao de outros metais. O cobre tem sido muito utilizado em condutores providos de isolação. O alumínio é usado na forma de cabos nus para transmissão e distribuição de energia elétrica. Atualmente, devido ao custo mais elevado do cobre, as concessionárias de distribuição de energia elétrica estão dando preferência para a utilização dos cabos de alumínio com isolação.

Um *fio* é um elemento metálico maciço e flexível que é identificado pela sua secção transversal nominal em milímetros quadrados. Assim, temos disponíveis no mercado fios com as seguintes secções: 0,5; 0,75; 1; 1,5; 2,5; 4; 6; e 10 mm².

Um *cabo* é um condutor em forma de corda ou encordoado formado por um conjunto de fios dispostos helicoidalmente, isolados ou não entre si, podendo o conjunto ser isolado ou não. Isto torna o condutor mais flexível em relação ao condutor sólido ou fio. Temos disponíveis no mercado cabos com as seguintes secções: 0,5; 0,75; 1; 1,5; 2,5; 4; 6; 10; 16; 25; 35; 50; 70; 95; 120; 150; 185; e 240 mm².

Um *condutor compactado* é um cabo no qual foram reduzidos os interstícios entre os fios componentes, por compressão mecânica ou trefilação.

A *isolação* de um condutor é formada pelos materiais isolantes utilizados para isolar eletricamente a parte metálica do condutor em relação ao ambiente que o circunda.

Os materiais utilizados como isolação, além de alta resistividade, devem possuir alta rigidez dielétrica, sobretudo quando empregados em tensões elétricas superiores a 1 kV.

Os principais materiais empregados na isolação de condutores são:

- Polímeros termoplásticos: cloreto de polivinila (PVC), polietileno (PE), polipropileno etc.

- Polímeros termofixos: polietileno reticulado (XLPE), borracha etileno-propileno (EPR), borracha de silicone etc.
- Outros materiais: papel impregnado, fibra de vidro etc.

A *cobertura* de um condutor é um revestimento externo não metálico e contínuo, sem função de isolação, destinado a proteger o fio ou cabo contra influências externas.

Um *cabo unipolar* ou *singelo* é um cabo constituído de um único condutor isolado e dotado, no mínimo, de cobertura.

Um *cabo multipolar* é constituído de dois ou mais condutores isolados e dotado, no mínimo, de cobertura. Os condutores isolados constituintes dos cabos unipolares e multipolares são chamados de *veias*. Os cabos multipolares contendo dois, três e quatro veias são chamados, respectivamente, de cabos bipolares, tripolares e tetrapolares.

Nas coberturas dos condutores podem ser utilizados vários materiais, sendo os mais comuns:

- Polímeros termofixos, como neoprene, polietileno clorossulfonado (hypalon), borracha de silicone etc.
- Polímeros termoplásticos, tais como PVC, polietileno, poliuretano etc.

Os fios e cabos são caracterizados por sua *secção nominal*, grandeza referente ao condutor respectivo. A *secção nominal* não corresponde a um valor estritamente geométrico (área da secção transversal do condutor), e sim a um valor determinado por uma medida de resistência. É o que se poderia chamar de *secção elétrica efetiva*. As *secções nominais* são dadas em milímetros quadrados, de acordo com uma série definida pela IEC e internacionalmente aceita, reproduzida na Tabela 4.

Tabela 4 Série métrica IEC (secções nominais em mm²).

0,5	16	185
0,75	25	240
1	35	300
1,5	50	400
2,5	70	500
4	95	630
6	120	800
10	150	1000

Tensões de isolamento nominais dos fios e cabos são as tensões para as quais eles foram projetados. Essas tensões são designadas pelo par de valores V_0/V , associados a sistemas trifásicos, sendo V_0 o valor eficaz da tensão entre condutor e terra ou blindagem da isolação (tensão fase-terra), e V o valor eficaz da tensão entre condutores (tensão fase-fase). O valor de V é utilizado para classificar os cabos quanto à tensão, sendo:

- cabos de baixa-tensão: $V \leq 1$ kV;
- cabos de média-tensão: 1 kV $< V \leq 35$ kV;
- cabos de alta-tensão: $V > 35$ kV.

4.3.2.1 Temperatura

Os fios e cabos providos de isolação são caracterizados por três temperaturas, medidas no condutor propriamente dito. Uma em regime permanente, outra em regime de sobrecarga e uma outra em regime de curto-circuito.

A temperatura no condutor em regime permanente (ou em serviço contínuo) é a temperatura alcançada em qualquer ponto do condutor em condições estáveis de funcionamento. A cada tipo (material) de isolação corresponde uma temperatura máxima para serviço contínuo, designada por Θ_z .

A temperatura no condutor em regime de sobrecarga é a temperatura alcançada em qualquer ponto do condutor nesse tipo de regime. Para os cabos de potência, estabelece-se que a operação em regime de sobrecarga, para temperaturas máximas especificadas em função da isolação, designada por Θ_{sc} , não deve superar 100 horas durante doze meses consecutivos, nem superar 500 horas durante a vida do cabo.

A temperatura no condutor em regime de curto-circuito é a temperatura alcançada em qualquer ponto do condutor durante esse regime. Para os cabos de potência a duração máxima de um curto-circuito, no qual o condutor pode manter temperaturas máximas especificadas em função da isolação, designada por Θ_{cc} , é de 5 segundos.

A Tabela 5 indica os valores de Θ_z , Θ_{sc} e de Θ_{cc} dados pelas normas em função dos materiais usados na isolação.

Tabela 5 Temperaturas características dos fios e cabos em função do material da isolação.

Material	Θ_z (°C)	Θ_{sc} (°C)	Θ_{cc} (°C)
PVC	70	100	160
EPR	90	130	250
XLPE	90	130	250

4.3.2.2 Capacidade de condução de corrente

A capacidade de condução de corrente (I_z) de um condutor diz respeito à corrente elétrica máxima que pode ser conduzida pelo condutor, em condições técnicas especificadas, sem que a sua temperatura ultrapasse a temperatura máxima para serviço contínuo.

Nos fios e cabos providos de isolamento, a capacidade de condução de corrente depende dos seguintes fatores:

- material do condutor;
- secção ou bitola do condutor;
- material da isolamento (que determina a temperatura máxima em regime permanente);
- temperatura ambiente;
- agrupamento de circuitos;
- agrupamento de condutos (eletrodutos, eletrocalhas, perfilados ou leitos).

Antes de decidir como abastecer os pontos de utilização de energia, devemos escolher a maneira de instalar os condutores elétricos. A NBR 5410/2004, em sua tabela 33, apresenta 75 métodos de instalação dos condutores elétricos.

Como exemplo de dimensionamento dos condutores pela capacidade de condução de corrente, podemos utilizar a Tabela 6 para condutores de cobre isolados 750 V e instalados em eletroduto de secção circular ou em eletrocalha, com isolamento de PVC, à temperatura ambiente de 30 °C.

Tabela 6 Capacidade de condução de corrente para isolamento de PVC.

Secção nominal (mm ²)	Capacidade de condução de corrente (A)	
	Dois condutores carregados	Três condutores carregados
1,5	17,5	15,5
2,5	24	21
4	32	28
6	41	36
10	57	50
16	76	68
25	101	89
35	125	110
50	151	134

Tabela 6 Continuação...

Secção nominal (mm ²)	Capacidade de condução de corrente (A)	
	Dois condutores carregados	Três condutores carregados
70	192	171
95	232	207
120	269	239
150	309	275
185	353	314
240	415	370

Para condutores de cobre isolados 0,6/1 kV e instalados em eletroduto de secção circular ou em eletrocalha, com isolamento de EPR ou XLPE, à temperatura ambiente de 30 °C, podemos tomar como exemplo a Tabela 7.

Tabela 7 Capacidade de condução de corrente para isolamento EPR ou XLPE.

Secção nominal (mm ²)	Capacidade de condução de corrente (A)	
	Dois condutores carregados	Três condutores carregados
1,5	23	20
2,5	31	28
4	42	37
6	54	48
10	75	66
16	100	88
25	133	117
35	164	144
50	198	175
70	253	222
95	306	269
120	354	312
150	407	358
185	464	408
240	546	481

A norma NBR 5410/2004, em sua tabela 47, prevê a secção mínima dos condutores conforme o tipo de instalação. Para circuitos de iluminação, podemos utilizar cabos de cobre isolados com secção mínima de 1,5 mm². Para circuitos de força ou de tomadas de corrente, podemos utilizar cabos de cobre isolados com secção mínima de 2,5 mm².

Tabela 8 Secções mínimas do condutor neutro.

Secção dos condutores de fase em mm ²	Secção reduzida do condutor neutro em mm ²
S < 25	S
35	25
50	25
70	35
95	50
120	70
150	70
185	95
240	120
300	150
400	185

Fonte: ABNT (2004).

Tabela 9 Secções mínimas do condutor de proteção.

Secção dos condutores de fase S em mm ²	Secção mínima do condutor de proteção correspondente em mm ²
S ≤ 16	S
16 < S ≤ 35	16
S > 35	S/2

Fonte: ABNT (2004).

Exemplo de dimensionamento de circuito pelo critério da capacidade de corrente: deseja-se instalar um forno elétrico trifásico em uma padaria com as seguintes especificações técnicas:

- potência: 15 kW;
- tensão nominal: 220 V.

Qual a bitola do condutor a ser utilizado nessa instalação?

Solução:

Inicialmente calculamos a corrente de projeto I_b :

$$I_b = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \theta} \Rightarrow I_b = \frac{15.000}{\sqrt{3} \cdot 220 \cdot 1} \Rightarrow I_b = 39,36 \text{ A}$$

Consultando a tabela de capacidade de corrente para cabos com isolamento de PVC, temos a bitola de 10 mm², que admite uma corrente de até 50 A para três condutores carregados, como neste caso. Assim, pela capacidade de corrente, o condutor com bitola de 10 mm² atende a esse tipo de carga elétrica.

4.3.2.3 Queda de tensão admissível

Os aparelhos que utilizam energia elétrica são projetados para trabalharem em determinadas tensões nominais com uma tolerância pequena. Essas quedas de tensão ocorrem em função da distância entre a carga e o medidor e a potência da carga. As quedas de tensão admissíveis são dadas em porcentagem da tensão nominal ou de entrada:

$$\text{Queda de tensão percentual} = \frac{\text{tensão de entrada} - \text{tensão na carga}}{\text{tensão de entrada}} \cdot 100$$

A norma de instalações elétricas de baixa-tensão, NBR 5410/2004, admite os seguintes percentuais de queda de tensão:

Em qualquer ponto de utilização da instalação, a queda de tensão verificada *não deve ser superior* aos seguintes valores, dados em relação ao valor da tensão nominal da instalação:

- a) 7%, calculados a partir dos terminais secundários do transformador MT/BT, no caso de transformador de propriedade da(s) unidade(s) consumidora(s);
- b) 7%, calculados a partir dos terminais secundários do transformador MT/BT da empresa distribuidora de eletricidade, quando o ponto de entrega for aí localizado;
- c) 5%, calculados a partir do ponto de entrega, nos demais casos de ponto de entrega com fornecimento em tensão secundária de distribuição;
- d) 7%, calculados a partir dos terminais de saída do gerador, no caso de grupo gerador próprio.

(ABNT, 2004, p. 115)

Em nenhum caso a queda de tensão nos circuitos terminais pode ser superior a 4%.

Como referência para o dimensionamento de condutores pelo método da queda de tensão admissível para fios e cabos de cobre, isolamento 750 V, à temperatura ambiente de 30 °C, instalados em eletroduto aparente – embutido em alvenaria ou em eletrocalha – temos a tabela a seguir.

Tabela 10 Queda de tensão.

Secção nominal (mm ²)	Queda de tensão para $\cos \theta = 0,80$ (V/A.km)	
	Circuito monofásico	Circuito trifásico
1,5	23,3	20,2
2,5	14,3	12,4
4	8,96	7,79
6	6,03	5,25
10	3,63	3,17
16	2,32	2,03
25	1,51	1,33
35	1,12	0,98
50	0,85	0,76
70	0,62	0,55
95	0,48	0,43
120	0,40	0,36
150	0,35	0,31
185	0,30	0,27
240	0,26	0,23

Exemplo de dimensionamento de circuito pelo critério da queda de tensão: dimensionar o circuito alimentador principal de um apartamento situado no 13º andar, sabendo-se que o quadro de medidores encontra-se no pavimento térreo. A tensão necessária é de 220 V e a potência ativa total é de 14 kW. A distância entre o quadro de medidores e o quadro de distribuição de energia localizado no 13º andar é de 39 metros.

Solução: a corrente de projeto (I_b) nesse caso é obtida pela fórmula a seguir:

$$I_b = \frac{P}{V} \Rightarrow I_b = \frac{14.000}{220} \Rightarrow I_b = 63,63 \text{ A}$$

Pelo critério da capacidade de corrente para dois condutores carregados, com isolamento de PVC, o condutor recomendado é de 16 mm².

Na Tabela 10, a queda de tensão para o condutor de 16 mm² é de 2,32 V/A.km.

Assim, a queda de tensão poderá ser calculada a partir da seguinte fórmula:

$$\Delta V = 2,32 \cdot 63,63 \cdot 0,039 = 5,75 \text{ V}$$

$$\text{Valor percentual} = 5,75 \cdot 100/220 = 2,6\%$$

Esse percentual atende às recomendações da norma NBR 5410/2004.

Se a queda de tensão calculada fosse maior que 4% seria necessário utilizar um condutor com seção maior ou igual a 25 mm².

4.3.2.4 Fator de demanda

Em instalações elétricas quaisquer, raramente são utilizados todos os pontos de luz ou tomadas de corrente ao mesmo tempo. É mais provável que isso aconteça em pequenas residências do que em grandes moradias.

Fator de demanda é o fator a ser aplicado na potência instalada para se obter a potência que será realmente utilizada em uma instalação elétrica:

$$FD = \frac{\text{potência utilizada}}{\text{potência instalada}} \cdot 100$$

O valor do fator de demanda (FD) depende do tipo de carga. Cada concessionária de energia elétrica tem a sua norma própria para o cálculo da demanda, sendo aconselhável consultá-la para aprovação dos projetos.

4.3.2.5 Eletrodutos

Os eletrodutos compõem um dos tipos de linhas elétricas de maior uso nas instalações elétricas embutidas ou aparentes.

Nas recomendações da NBR 5410/2004, os eletrodutos devem suportar as solicitações mecânicas, químicas, elétricas e térmicas a que forem submetidos nas condições da instalação.

As dimensões internas dos eletrodutos e de suas conexões devem permitir que, após a montagem da linha, os condutores possam ser instalados e retirados com facilidade. Para tanto, a área máxima a ser utilizada pelos condutores, incluindo o isolamento, deve ser de 40% no caso de três ou mais condutores.

Como referência para o dimensionamento de eletrodutos rígidos de PVC (NBR 6150, classe B, roscável) com ocupação máxima sugerida pela NBR 5410/2004, apresentamos a tabela a seguir:

Tabela 11 Condutores de cobre com isolamento PVC/70-750V.

Secção nominal (mm ²)	Número de condutores								
	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Tamanho nominal do eletroduto (mm)								
1,5	16	16	16	16	16	16	20	20	20
2,5	16	16	16	16	20	20	20	20	25
4	16	16	20	20	20	25	25	25	25
6	16	16	20	20	25	25	25	32	32
10	20	20	25	25	32	32	32	40	40
16	25	25	32	32	40	40	40	40	50
25	32	32	40	40	40	50	60	60	60
35	32	40	40	50	50	60	60	60	75
50	40	40	50	60	60	75	75	75	75
70	50	50	60	60	75	75	75	85	85
95	60	60	60	75	75	85	85	85	-
120	60	75	75	85	85	-	-	-	-
150	60	75	75	85	85	-	-	-	-
185	75	75	85	85	-	-	-	-	-
240	75	85	-	-	-	-	-	-	-

Exemplo de aplicação: admitindo-se um circuito com quatro condutores de cobre com isolamento PVC/70-750 V, bitola 50 mm², qual será o diâmetro do eletroduto rígido de PVC a ser utilizado?

Solução: para quatro condutores com secção nominal de 50 mm², o eletroduto a ser utilizado deverá ter o diâmetro de 50 mm.

4.3.3 Choque elétrico

A eletricidade pode matar uma pessoa por meio de um choque elétrico. Para entendermos melhor como isso pode acontecer, estabelecemos os conceitos a seguir.

Choque elétrico é o efeito patofisiológico resultante da passagem de uma corrente elétrica (corrente de choque) através do corpo de uma pessoa ou de um animal. No estudo da proteção contra choques elétricos, devemos considerar três elementos fundamentais: *parte viva*, *massa* e *elemento condutor estranho à instalação*:

- A *parte viva* de um componente ou de uma instalação é a parte condutora que apresenta diferença de potencial em relação à terra. Para as linhas elétricas, falamos em condutor vivo, termo que inclui os condutores fase e o condutor neutro.

- A *massa* de um componente ou de uma instalação é a parte condutora que pode ser tocada facilmente e que normalmente não é viva, mas que pode tornar-se viva em condições de faltas ou defeitos. Como exemplos de massa, podemos citar as carcaças e invólucros metálicos de equipamentos.
- Um *elemento condutor estranho à instalação* é um elemento condutor que não faz parte da instalação, mas nela pode introduzir um potencial, geralmente o da terra. É o caso dos elementos metálicos usados na construção de edifícios, das canalizações metálicas de gás, água, aquecimento, ar condicionado etc. e dos equipamentos não elétricos ligados na instalação, bem como dos solos e paredes não isolantes, entre outros.

Os choques elétricos numa instalação podem provir de dois tipos de contatos:

- os *contatos diretos*, que são os contatos de pessoas ou animais com partes vivas sob tensão;
- os *contatos indiretos*, que são os contatos de pessoas ou animais com massas que ficaram sob tensão devido a uma falha de isolamento.

Os *contatos diretos* são provocados, via de regra, por falha de isolamento, por ruptura ou remoção indevida de partes isolantes ou por atitude imprudente de uma pessoa com uma parte viva. Terminais de equipamentos não isolados, condutores e cabos com isolação danificada ou deteriorada e equipamentos de utilização antigos são as fontes mais comuns de choques por contatos diretos.

Os *contatos indiretos*, por sua vez, são particularmente perigosos, uma vez que o usuário que encosta a mão numa massa, por exemplo, na carcaça de um equipamento de utilização, não vai suspeitar de uma eventual energização acidental provocada por uma falta ou por um defeito interno no equipamento.

Os efeitos da passagem da corrente elétrica pelo corpo humano podem ser caracterizados por quatro fenômenos patológicos críticos: a *tetanização*, a *parada respiratória*, as *queimaduras* e a *fibrilação ventricular*.

- *Tetanização*: trata-se da paralisia muscular provocada pela circulação de corrente através dos tecidos nervosos que controlam os músculos. Superposta aos impulsos de comando da mente, a corrente os anula, podendo bloquear um membro ou o corpo inteiro. De nada valem, nesses casos, a consciência do indivíduo e sua vontade de interromper o contato.

- *Parada respiratória*: ocorre quando estão envolvidos na tetanização os músculos peitorais. Os pulmões são bloqueados e a função vital de respiração para. Trata-se de uma situação de emergência.
- *Queimaduras*: a passagem da corrente elétrica pelo corpo humano é acompanhada do desenvolvimento de calor por efeito joule, podendo produzir queimaduras. Nos pontos de entrada e saída da corrente, a situação torna-se mais crítica, tendo em vista, principalmente, a elevada resistência da pele e a maior densidade de corrente naqueles pontos. As queimaduras produzidas por corrente elétrica são as mais profundas e as de cura mais difícil, podendo mesmo causar a morte por insuficiência renal.
- *Fibrilação ventricular*: se a corrente atingir diretamente o músculo cardíaco, poderá perturbar seu funcionamento regular. Os impulsos periódicos que, em condições normais, regulam as contrações (sístole) e as expansões (diástole) são alterados, ou seja, o coração vibra desordenadamente e, em termos técnicos, perde o passo. A situação é de emergência extrema, pois cessa o fluxo vital de sangue para o corpo. Observe que a fibrilação é um fenômeno irreversível que se mantém mesmo quando cessa a causa e só pode ser anulada mediante o emprego de um equipamento chamado desfibrilador, disponível apenas em hospitais e prontos-socorros.

Tabela 12 Efeitos fisiológicos da corrente elétrica no corpo humano.

CA de 15 a 100 Hz; trajeto entre extremidades do corpo em pessoas de, no mínimo, 50 quilos de peso.	
Faixa de corrente	Reações fisiológicas habituais
0,1 a 0,5 mA	Leve percepção superficial; habitualmente nenhum efeito.
0,5 a 10 mA	Ligeira paralisia nos músculos do braço com início de tetanização; habitualmente nenhum efeito perigoso.
10 a 30 mA	Nenhum efeito perigoso se houver interrupção em, no máximo, 5 segundos.
30 a 500 mA	Sensação de falta de ar e tontura; possibilidade de fibrilação ventricular.
Acima de 500 mA	Traumas cardíacos persistentes; nesse caso o efeito é letal, se houver intervenção imediata de pessoal especializado com equipamento adequado.

4.3.3.1 Proteção contra choques elétricos

A NBR 5410 prescreve rigorosas medidas de proteção ativas e passivas. As medidas ativas consistem na utilização de dispositivos e métodos que proporcionam o seccionamento automático do circuito quando ocorrem situações de perigo

para os usuários. Os dispositivos diferencial-residuais (DR) são utilizados para essa finalidade.

As medidas passivas, por sua vez, consistem no uso de dispositivos e métodos que se destinam a limitar a corrente elétrica que pode atravessar o corpo humano ou a impedir o acesso às partes energizadas.

Tabela 13 Contatos diretos.

Proteção	Tipo de medida	Sistema	Tipo de pessoa
Total	Passiva	Isolação das partes vivas sem possibilidade de remoção	Comum
	Passiva	Invólucros ou barreiras removíveis apenas com chave ou ferramenta com intertravamento ou com uso de barreira intermediária	Comum
Parcial	Passiva	Obstáculos removíveis sem ferramenta	Advertida Qualificada
	Passiva	Distanciamento das partes vivas acessíveis	Advertida Qualificada
Complementar	Ativa	Circuito protegido por dispositivo DR de alta sensibilidade	Qualquer

Tabela 14 Contatos indiretos.

Tipo de medida	Sistema
Passiva (sem seccionamento automático do circuito)	Isolação dupla
	Locais não condutores
	Separação elétrica
	Ligações equipotenciais
Ativa (com seccionamento automático do circuito)	Esquema TN
	Esquema TT
	Esquema IT

4.3.4 Sistema de aterramento

Entendemos por aterramento a ligação intencional de um condutor à terra. Se essa ligação é feita diretamente, sem a interposição de qualquer impedância (ou resistência), falamos em aterramento *direto*. Se, ao contrário, entre o condutor e a terra insere-se uma impedância, dizemos que o aterramento é *não direto*.

Dois são os tipos de aterramento numa instalação:

- *aterramento funcional*: consiste na ligação à terra de um dos condutores do sistema (geralmente o neutro), com o objetivo de garantir o funcionamento correto, seguro e confiável da instalação;
- *aterramento de proteção*: consiste na ligação à terra das massas e dos elementos condutores estranhos à instalação, com o único objetivo de proporcionar proteção contra contatos indiretos.

Algumas vezes são realizados aterramentos conjuntos, funcionais e de proteção.

Os aterramentos são efetuados com eletrodos de aterramento, que são os condutores colocados em contato com a terra. Estes podem ser: hastes, perfis, barras, cabos nus, fitas etc. O termo eletrodo refere-se sempre ao condutor ou ao conjunto de condutores em contato com a terra e, portanto, abrange desde uma simples haste isolada até uma complexa malha de aterramento constituída de associação de hastes com cabos.

4.3.5 Dispositivo de proteção contra sobrecorrentes

Numa instalação elétrica deve-se garantir o bom funcionamento do sistema em quaisquer condições de operação, protegendo as pessoas, os equipamentos e a rede elétrica de acidentes provocados por alterações de correntes (sobrecargas ou curtos-circuitos).

Para o dimensionamento do dispositivo de proteção contra correntes de *sobrecarga*, as seguintes condições devem ser satisfeitas:

- 1) $I_b \leq I_n$;
- 2) $I_n \leq I_z$;
- 3) $I_2 \leq 1,45 I_z$.

em que:

I_b = corrente de projeto do circuito;

I_n = corrente nominal do dispositivo de proteção;

I_z = capacidade de condução de corrente de condutores vivos, de acordo com o tipo de instalação;

I_2 = corrente convencional de atuação dos dispositivos de proteção em função de I_n .

Para o dimensionamento do dispositivo de proteção contra correntes de *curto-circuito*, as seguintes condições devem ser atendidas:

1. sua capacidade de interrupção deve ser, no mínimo, igual à corrente de curto-circuito presumida no ponto de aplicação do dispositivo de proteção;
2. a integral de joule que o dispositivo deixa passar deve ser inferior ou igual à integral de joule necessária para aquecer o condutor, desde a temperatura máxima para o serviço contínuo até a temperatura limite de curto-circuito.

Os disjuntores termomagnéticos e os fusíveis são os dispositivos elétricos utilizados para proteção contra sobrecarga e curtos-circuitos.

4.3.5.1 Fusíveis

O fusível é composto, nas suas formas mais aperfeiçoadas, de um corpo de material isolante de suficiente resistência mecânica, dentro do qual se encontra o elemento de fusão (elo de fusão), que interromperá o circuito sob condições anormais.

4.3.5.1.1 Características elétricas

Das grandezas elétricas, as mais importantes no dimensionamento são:

- *Corrente nominal*: deve ser aquela corrente que o fusível suporta continuamente, sem se aquecer acima de limites especificados por norma e em função da qual se escolhe o material.
- *Corrente de curto-circuito*: corrente máxima que pode circular no circuito, e que deve ser desligada instantaneamente. Correlata à corrente de curto-circuito, tem-se a capacidade de ruptura, que é o valor de potência que o fusível é capaz de desligar com segurança.
- *Tensão nominal*: seu valor dimensiona a isolação do fusível.
- *Resistência de contato*: dependente do material e da pressão exercida. A resistência de contato entre a base e o fusível é a responsável por eventuais aquecimentos devido à resistência oferecida na passagem da corrente.

- Não se permite o uso de fusíveis remendados ou consertados, em virtude de geralmente não haver substituição adequada ao elo de fusão.
- A instalação dos fusíveis deve permitir o seu manejo sem perigo para o operador.
- A montagem deve processar-se em um receptáculo que evite a substituição de um fusível por outro de grandeza inadequada.

Em funcionamento, o fusível deve obedecer a uma característica de tempo de desligamento da corrente circulante, perfeitamente conhecida e inversamente proporcional, como mostra a Figura 70.

Observe que as duas grandezas em questão são inversamente proporcionais, o que, aliás, é uma condição necessária, porque quanto maior a corrente circulante, menor o tempo no qual o fusível terá que desligar.

Um elo de fusão empregado está representado na Figura 69.

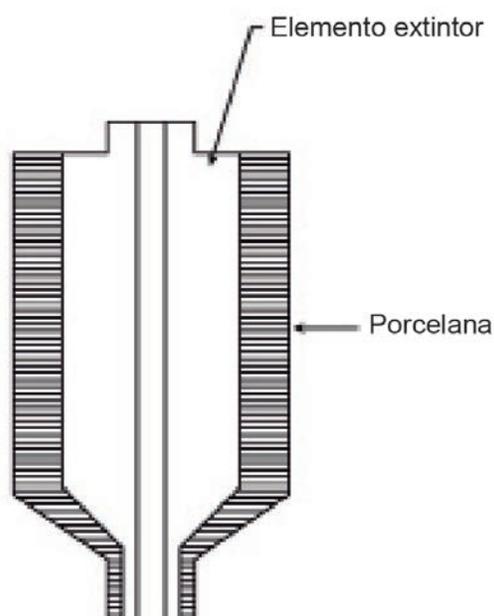


Figura 69 Tipo de elo de fusão e seu envoltório.

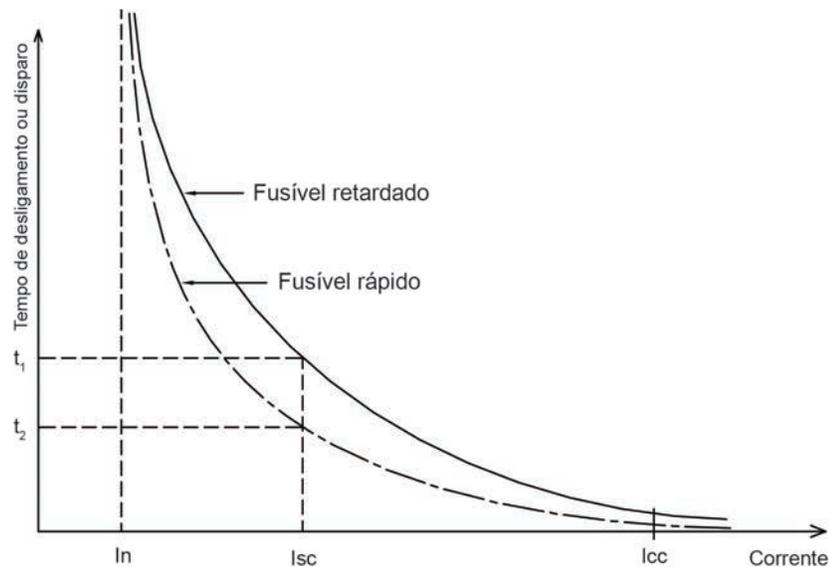


Figura 70 Curva característica de corrente: I_n = corrente nominal; I_{sc} = corrente de sobrecarga; e I_{cc} = corrente de curto-circuito.

4.3.5.1.2 Tipos de fusíveis

Os fusíveis podem ser classificados de acordo com critérios diversos. Desses critérios, os mais usados são:

- a) tensão de alimentação: alta-tensão ou baixa-tensão;
- b) característica de desligamento: efeito rápido ou efeito retardado.

4.3.5.1.2.1 Fusíveis rápidos e retardados

A necessidade desses dois tipos de fusíveis é uma consequência das condições de serviço. Os fusíveis sem retardamento destinam-se a circuitos em que não ocorre variação considerável de corrente entre a fase partida e a de regime normal de funcionamento. É o caso das cargas resistivas em geral, tais como lâmpadas incandescentes. Entretanto, cargas motoras necessitam, na fase de partida, de uma corrente de partida diversas vezes superior à corrente nominal. Pela análise da característica tempo-corrente do fusível rápido, pode-se observar que se teria frequentemente a queima do fusível rápido devido a essa corrente – o que não estaria de acordo com a função do fusível, pois a corrente de partida não apresenta nenhuma condição anormal. Por esse motivo, foram incluídos na linha de fusíveis aqueles com característica retardada, que suportam as sobrecorrentes devidas às correntes de partida, assim protegendo todas as cargas motoras e semelhantes.

Em grandeza de curto-circuito, a corrente de desligamento instantâneo é bem semelhante aos fusíveis rápidos porque, neste caso, a intensidade térmica é tal que o ponto de menor secção funde-se instantaneamente.

Como toda instalação domiciliar ou industrial possui atualmente cargas motoras, os fusíveis principais da entrada são, em princípio, do tipo que possibilita o retardamento ou retardados.

O retardamento é obtido por um acréscimo de massa na parte central do elo, em que este apresenta a menor condutância e em que, conseqüentemente, se dará a fusão. Esse acréscimo de massa absorve, durante certo tempo, parte do calor que se desenvolve na secção reduzida do elo, retardando a elevação de temperatura, cujo valor limite superior é a temperatura de fusão do metal usado no elo. Esse acréscimo de massa, entretanto, não atua praticamente perante uma corrente de partida, pois não há tempo para uma troca de calor.

Os fusíveis do tipo cartucho para tensão nominal de 500 V são encontrados no mercado com as seguintes dimensões e correntes nominais:

- 10,3 x 38 mm: 2, 4, 6, 8, 10, 16, 25 e 30 A;
- 14 x 51 mm: 20 e 32 A.

4.3.5.1.2.2 Fusíveis tipo Diazed

Fusíveis do tipo Diazed são compostos de um corpo de porcelana cilíndrico fechado nas suas extremidades por duas tampas metálicas, nas quais é soldado o elo de fusão ou preso por meio de anel de fixação próprio (ver Figura 72). O elo de fusão é, basicamente, de cobre, podendo ser revestido com outro metal, como o zinco, quando as características de desligamento o exigem, de acordo com os motivos já expostos anteriormente. Entre o elo de fusão e o corpo de porcelana (ou de esteatite, em alguns casos) é colocado o elemento extintor, que é areia. Esta preenche totalmente o espaço livre entre o elo e o corpo externo.

Os fusíveis Diazed são invioláveis, pois o fechamento do corpo da porcelana não mais permite uma reposição do fusível. Além do mais, são calibrados em uma das suas extremidades de acordo com o seu valor da corrente nominal mediante a variação adequada de uma das tampas metálicas de fechamento. Dessa forma, evita-se a troca indevida de um fusível menor por outro maior, mantendo-se, em consequência, as condições de segurança previstas no projeto da instalação.

Fusíveis Diazed são encontrados no mercado com correntes nominais de 2 A até 63 A, para tensões de até 500 V, nos tipos rápido e retardado.

Os valores nominais de corrente encontrados no mercado são: 2, 4, 6, 10, 16, 20, 25, 30, 35, 50 e 63 A.

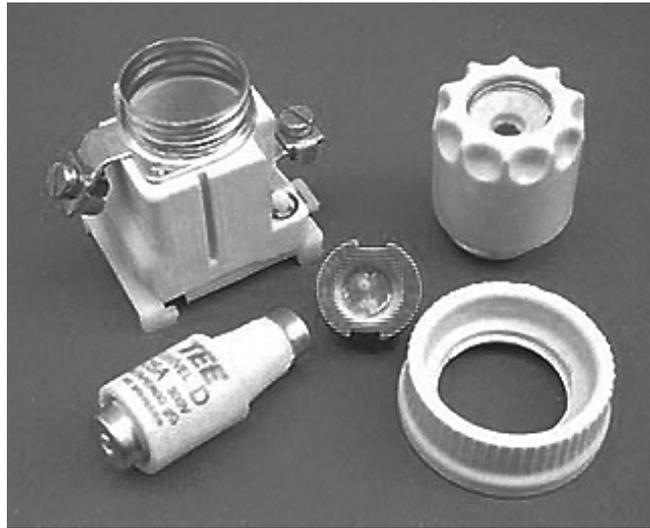


Figura 71 Fusível Diazed desmontado.

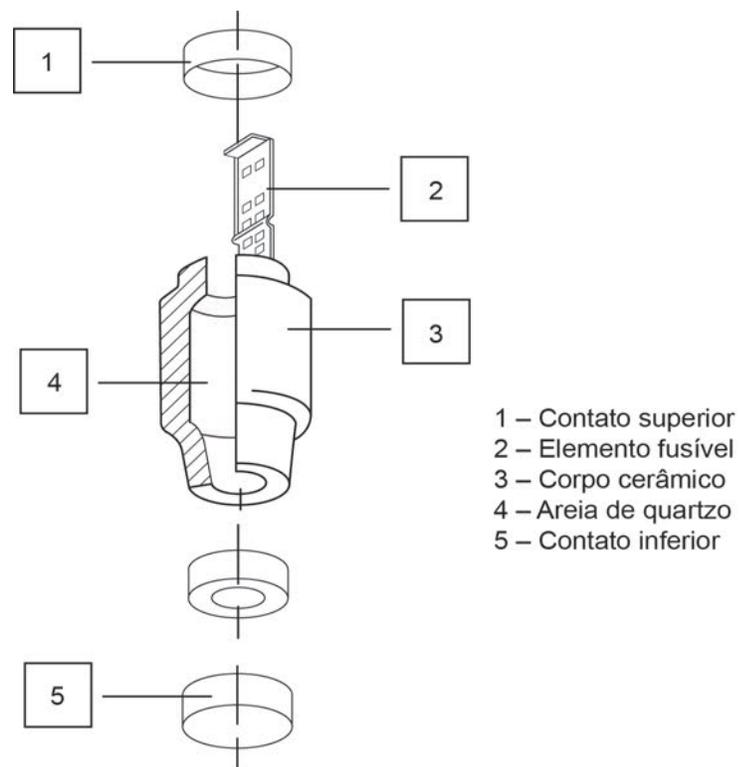


Figura 72 Representação gráfica de um fusível Diazed.

Fonte: Catálogo Siemens (1999).

Para correntes maiores são utilizados os fusíveis do tipo NH, os quais são encontrados no mercado com correntes nominais de até 800 A e tensão de 500 V.

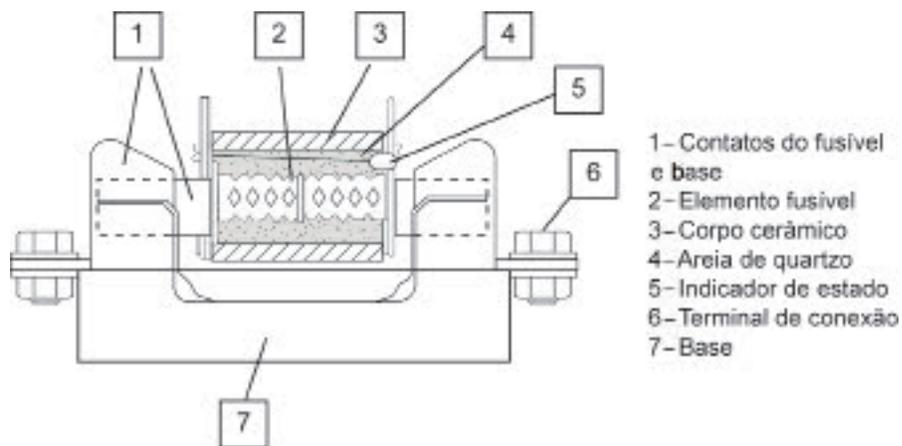


Figura 73 Fusíveis NH.

Fonte: Catálogo Siemens (1999).

Os valores nominais de corrente encontrados no mercado de materiais elétricos estão classificados de acordo com o tamanho da base NH. Assim, os tamanhos são: T00, T01, T02, T03 e T04. Para cada tamanho, temos uma faixa de valores nominais de corrente, conforme segue:

- T00: 16, 20, 25, 36, 50, 63, 80, 100 e 125 A (Base 160 A);
- T01: 80, 100, 125, 160, 200, 225 e 250 A (Base 250 A);
- T02: 200, 225, 250, 300, 315, 400 A (Base 400 A);
- T03: 350, 400, 500, 600 e 630 A (Base 630 A);
- T04: 800 A.

4.3.5.2 Disjuntores termomagnéticos em caixa moldada

Disjuntor termomagnético é um componente elétrico de manobra e de proteção, capaz de conduzir e interromper correntes normais do circuito, assim como conduzir por tempo especificado e interromper correntes em condições anormais do circuito, tais como as de sobrecarga e de curto-circuito.

Um disjuntor em caixa moldada consiste em um elemento de disparo termomagnético e um mecanismo de operação, com contatos e meios interruptores do arco, montados numa caixa isolante moldada.

O mecanismo de operação é de rápido fechamento e rápida abertura, de modo que os contatos não podem ser mantidos fechados em condições de curto-circuito ou sobrecarga.

O abafador do arco consiste em lâminas de metal espaçadas que extinguem o arco e absorvem o calor. O abafador envolve os contatos fixo e móvel.

4.3.5.2.1 Funcionamento

No Brasil existem no mercado disjuntores termomagnéticos em caixa moldada de origem norte-americana (GE, Eletromar etc.) e de origem europeia (Siemens, Legrand etc.). Os de origem norte-americana são peças maiores do que os de origem europeia.

Para ambos os tipos, a proteção contra sobrecargas é feita por meio de duas ou mais lâminas metálicas ligadas através de solda, com coeficiente de dilatação diferentes, sob pressão ou eletroliticamente. Como cada metal possui um coeficiente de dilatação diferente, ao serem aquecidos pela passagem da corrente, eles se curvam, acionando um dispositivo mecânico que abre os contatos.

Os disjuntores em caixa moldada de origem europeia são providos de bimetálico e mantêm sua corrente nominal até a temperatura de 40 °C, embora calibrados a 25 °C.

No que diz respeito aos disjuntores norte-americanos, durante alguns anos todos foram calibrados para 25 °C, o que significa que, para aplicação acima dessa temperatura, sua corrente nominal deveria ser corrigida (reduzida). Como, na maioria dos quadros de distribuição, a temperatura gira em torno de 40 °C, eram fabricados disjuntores especiais, calibrados a essa temperatura. A partir de meados da década de 1960, os padrões foram mudados e todos os disjuntores termomagnéticos em caixa moldada passaram a ser calibrados para 40 °C. Também passaram a ser fabricados disjuntores com bimetálico, semelhantes aos europeus.

A proteção contra curto-circuito é feita por lâmina de ferro (origem norte-americana) ou por uma bobina eletromagnética (origem europeia). No caso da lâmina de ferro, esta é atraída pelo forte campo magnético criado pela passagem da corrente, soltando o engate do disparo. Quando se emprega a bobina eletromagnética, esta magnetiza o núcleo de ferro que atua sobre o gatilho. Na Figura 74 é mostrado um corte de um disjuntor de origem europeia para instalações típicas residenciais e comerciais.

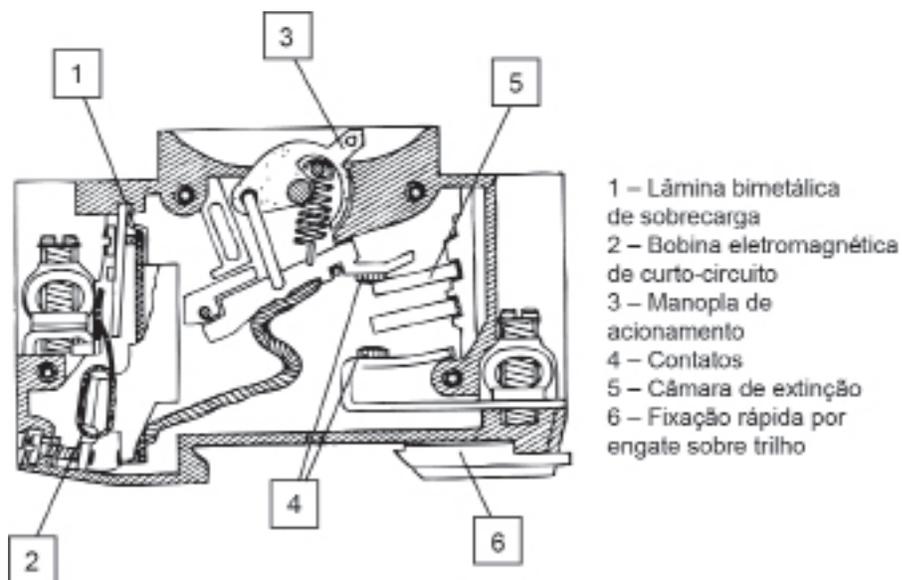


Figura 74 Disjuntor de origem europeia para instalações residenciais e comerciais.
 Fonte: Catálogo Siemens (1999).

Curvas características mais usuais

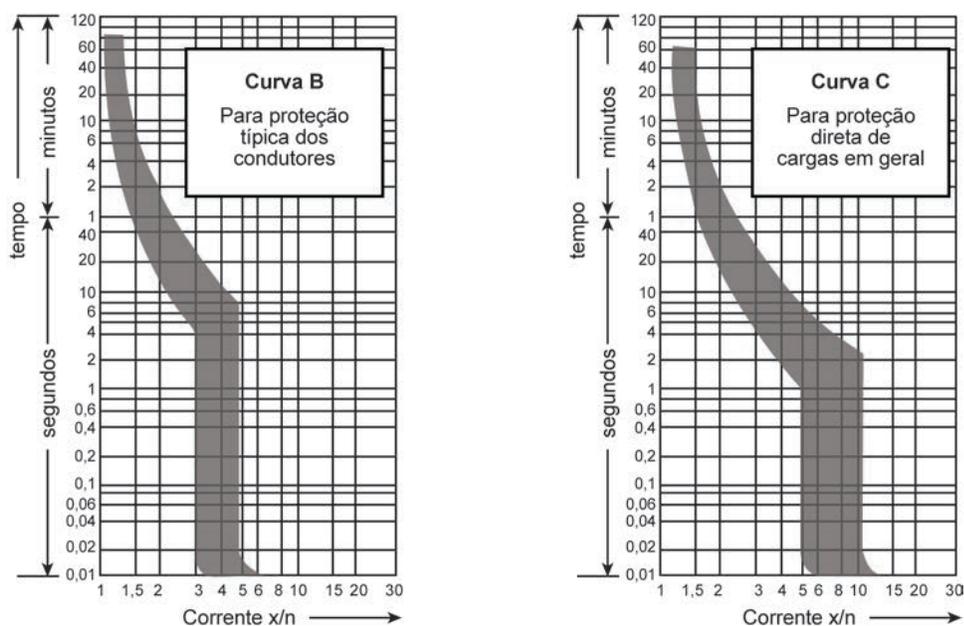


Figura 75 Curvas características mais usuais de tempo x corrente em disjuntores de origem europeia.

Fonte: Catálogo Siemens (1999).

4.3.5.2.2 Características nominais

Os disjuntores são caracterizados pela *corrente nominal*, pela *tensão nominal*, pela *capacidade de ruptura* e pelo *número de polos*.

4.3.5.2.3 Fusível e disjuntor termomagnético: características comparativas

O disjuntor termomagnético e o fusível exercem funções similares: interrompem a circulação de corrente de curto-circuito mediante a extinção do arco elétrico que se forma, sem perder suas características de isolante elétrico. Esse arco se estabelece entre as peças de contato do disjuntor ou no elemento fusível.

Em ambos os casos, a elevada temperatura que se faz presente leva a uma situação de risco que podemos assim caracterizar:

- A corrente de curto-circuito atinge valores da ordem de quiloampères (kA) que podem vir a circular no circuito. Como é bem superior à corrente nominal, só pode ser mantida por um tempo muito pequeno, sob pena de danificar ou mesmo destruir componentes de um circuito. Portanto, o seu tempo de desligamento deve ser extremamente curto.
- A corrente de curto-circuito tem influência tanto térmica (perda por efeito Joule) quanto eletrodinâmica (pelas forças de repulsão que se originam quando essa corrente circula entre condutores dispostos em paralelo), sendo, por isso mesmo, fator de dimensionamento da secção condutora de cabos e da fixação de barramentos de cobre presentes nos quadros de distribuição de energia.

Os valores nominais de corrente para disjuntores do tipo americano (linha preta) são os seguintes:

- *unipolar*: 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 50, 60 e 70 A;
- *bipolar*: 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 50, 60, 70, 90 e 100 A;
- *tripolar*: 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 50, 60, 70, 90, 100, 125, 150, 175, 200, 225, 250...

Os valores nominais de corrente para disjuntores do tipo europeu (linha branca – DIN) são os seguintes:

- *unipolar*: 2, 4, 6, 10, 16, 20, 25, 32, 40, 50, 63 e 70 A;
- *bipolar*: 2, 4, 6, 10, 16, 20, 25, 32, 40, 50, 63 e 70 A;
- *tripolar*: 4, 6, 10, 16, 20, 25, 32, 40, 50, 63, 70, 80, 90, 100, 125, 150, 175, 200, 225, 250...

Como referência para o dimensionamento de proteção das instalações elétricas, temos a Tabela 15, com as seguintes observações:

- Secção dos condutores vivos com isolamento em PVC/70 e tensão de 750 V.
- Corrente nominal (ou de ajuste) dos dispositivos de proteção contra correntes de sobrecarga, instalados em eletrodutos e eletrocalhas, temperatura ambiente de 30 °C, sendo:
 - D = disjuntores que atendem à NBR 5361 e cujas correntes nominais (ou de ajuste) são referidas à temperatura ambiente de 40 °C;
 - F = fusíveis tipo Diazed ou NH, de acordo com a IEC 269.

Tabela 15 Dimensionamento de dispositivos de proteção.

Secção nominal dos condutores vivos (mm ²)	Corrente nominal máxima dos dispositivos de proteção (A)			
	Dois condutores carregados		Três condutores carregados	
	D	F	D	F
1,5	15	10	15	10
2,5	20	16	20	16
4	30	25	25	20
6	40	35	35	32
10	50	50	50	40
16	70	63	60	50
25	100	80	70	80
35	125	100	100	100
50	150	125	125	100
70	175	160	150	125
95	225	200	200	160
120	250	200	225	200
150	300	250	275	250
185	350	315	300	250
240	400	315	350	315

Exemplos de aplicação:

1. Um circuito com 2 F (ou FN) constituído de dois condutores isolados em PVC/70-750 V de 4 mm², contido num eletroduto embutido em alvenaria, pode ser protegido contra correntes de sobrecarga por um disjuntor de até 30 A ou por fusíveis de até 25 A.
2. Um circuito de distribuição com 3 F que alimenta um quadro de energia com três cabos PVC/70 de 35 mm², contidos numa eletrocalha, pode ser protegido contra correntes de sobrecarga por um disjuntor de até 100 A ou por fusíveis de até 100 A.

4.4 Considerações finais

Uma instalação elétrica em desacordo com as diretrizes da NBR 5410 representa um risco potencial de acidente envolvendo choque elétrico, arco elétrico ou até mesmo um princípio de incêndio ocasionado por um condutor sobrecarregado de corrente elétrica. Não podemos nunca esquecer que a eletricidade pode matar, por isso é sempre importante tomar todas as medidas de segurança necessárias para a intervenção em serviços de eletricidade.

A NBR 5410/2004 apresenta a seguinte prescrição:

6.5.4.10 Os quadros de distribuição destinados a instalações residenciais e análogas devem ser entregues com a seguinte advertência:

1. Quando um disjuntor ou fusível atua, desligando algum circuito ou a instalação inteira, a causa pode ser uma sobrecarga ou um curto-circuito. Desligamentos frequentes são sinal de sobrecarga. Por isso, *nunca* troque seus disjuntores ou fusíveis por outros de maior corrente (maior amperagem) simplesmente. Como regra, a troca de um disjuntor ou fusível por outro de maior corrente requer, antes, a troca dos fios e cabos elétricos, por outros de maior seção (bitola).

2. Da mesma forma, *nunca* desative ou remova a chave automática de proteção contra choques elétricos (dispositivos DR), mesmo em caso de desligamentos sem causa aparente. Se os desligamentos forem frequentes e, principalmente, se as tentativas de religar a chave não tiverem êxito, isso significa, muito provavelmente, que a instalação elétrica apresenta anomalias internas, que só podem ser identificadas e corrigidas por profissionais qualificados. *A desativação ou remoção da chave significa a eliminação de medida protetora contra choques elétricos e risco de vida para os usuários da instalação.*

(ABNT, 2004, p. 158, grifos do autor)

4.5 Exercícios

1. Liga-se um voltímetro nos terminais secundários de um transformador de distribuição para medição da tensão entre duas fases. O maior valor de tensão será obtido quando o transformador estiver funcionando em vazio ou em plena carga?
2. Qual a diferença entre corrente de sobrecarga e corrente de curto-circuito?
3. Qual deve ser a seção do condutor de proteção quando os condutores-fase, de cobre, forem de 50 mm²?

4. Qual deve ser a queda de tensão máxima para um circuito terminal desde o quadro de distribuição de energia?
5. Um circuito trifásico a quatro fios tem os seguintes dados:
 $P = 65 \text{ kW}$;
 $U_L = 220 \text{ V}$ entre fases;
 $U_f = 127 \text{ V}$ entre fase e neutro;
Fator de potência = 85%.
Utilizando condutores isolados com PVC/70 em ambiente a $30 \text{ }^\circ\text{C}$, qual a secção escolhida pelo critério da capacidade de corrente?
6. Na entrada de uma instalação, mediu-se a tensão de 220 V e, no último ponto do circuito, 205 V . Qual a queda percentual de tensão nessa instalação?
7. Um interruptor comum deve apagar um circuito com 10 lâmpadas fluorescentes de 32 W cada, em 127 V . Usando reatores duplos de alto fator de potência que aumentam a carga em 20%, qual será a capacidade do interruptor?
8. Admitindo-se um circuito com três condutores carregados de 95 mm^2 e isolamento PVC/90-750 V, qual é o eletroduto adequado?

4.5.1 Respostas dos exercícios

1. O maior valor de tensão será obtido quando o transformador estiver funcionando em vazio.
2. O valor da corrente de curto-circuito é muito maior do que o da corrente de sobrecarga e devem ser eliminadas no menor tempo possível, sob pena de provocarem, por aquecimento, uma drástica redução da vida útil dos condutores.
3. O condutor de proteção deve ter bitola de 25 mm^2 .
4. Nas instalações elétricas de baixa-tensão, a queda de tensão máxima deve ser de 4%.

$$5. I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_L \cdot \cos \theta} \Rightarrow I = \frac{65.000}{\sqrt{3} \cdot 220 \cdot 0,85} \Rightarrow I = 201,24 \text{ A}$$

\Rightarrow Condutor de cobre de 95 mm^2 .

$$6. \Delta V = \frac{220 - 205}{220} \cdot 100\% \Rightarrow \Delta V = 6,82\%$$

$$7. I = \frac{10 \cdot 32 \cdot 1,20}{127} \Rightarrow I = 3,02 \text{ A}$$

\Rightarrow O interruptor deverá ser de 10 A.

8. Diâmetro de 60 mm.

4.6 Estudos complementares

4.6.1 Saiba mais

Como forma de estudo complementar é conveniente consultar as referências indicadas a seguir:

<<http://pt.wikipedia.org/wiki/Disjuntor>>

<<http://pt.wikipedia.org/wiki/Fusível>>

<http://pt.wikipedia.org/wiki/Choque_elétrico>

<<http://pt.wikipedia.org/wiki/Aterramento>>

UNIDADE 5

Eficiência energética

5.1 Primeiras palavras

Esta unidade apresenta:

- as técnicas do consumo inteligente da energia elétrica;
- sistema de tarifação, racionalização do consumo;
- correção do fator de potência.

5.2 Problematizando o tema

O gerenciamento da conta de energia elétrica de uma indústria tem um peso muito importante no custo final de um produto. Saber os itens que podem ser gerenciados e as medidas necessárias para não se ter sobretarifas no final do mês é o objetivo desta unidade. A concessionária de energia elétrica cobra da indústria o reativo excedente devido ao fator de potência inferior a 0,92. Vamos entender como isso acontece e por quê.

5.3 Texto básico para estudos

5.3.1 Definição de eficiência energética

Eficiência energética é uma filosofia de trabalho que visa otimizar a utilização da energia elétrica por meio de orientações, direcionamentos, ações e controle de recursos humanos, materiais e econômicos, reduzindo os índices globais e específicos da quantidade de energia necessária para a obtenção de um mesmo resultado ou produto.

Os projetos de eficiência energética são aqueles que resultam em economia e benefícios diretos para o consumidor, com ações de combate ao desperdício de energia elétrica, modernização de instalações e processos.

Para atingir a eficiência energética, basicamente, é preciso seguir os cinco passos apresentados na Figura 76.

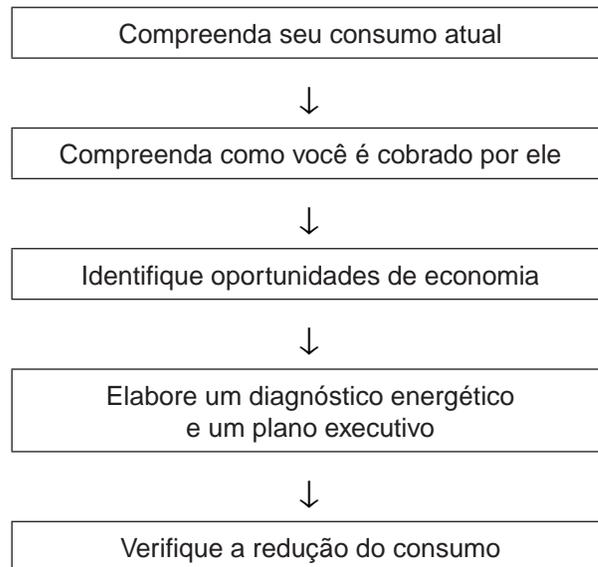


Figura 76 Eficiência energética.

5.3.2 Consumo, demanda, fator de carga e intervalo de integração

Para agir e elaborar projetos a fim de maximizar a eficiência energética, é preciso conhecer muito bem alguns conceitos fundamentais, entre eles: consumo, demanda, intervalo de integração e fator de carga:

- *Consumo*: energia gasta durante o tempo de utilização. Portanto, sua equação fundamental é $consumo = potência \times tempo$. É por essa mesma razão que sua unidade de medida é o Wh (watt-hora) ou seus múltiplos (kWh, MWh etc.).
- *Demanda*: medida das potências instantâneas solicitadas à concessionária de energia pelo consumidor e integradas em determinado intervalo de tempo, o período de integração (no Brasil corresponde a 15 minutos). Ele varia, em relação a outros países, entre 5 e 30 minutos. O conceito de demanda, portanto, só tem sentido quando relacionado à duração (término) desse intervalo de tempo.

É fato que alguns, erroneamente, utilizam o termo *demanda instantânea*, o qual na realidade não existe. O que existe é a *potência instantânea integrada*. Assim, em um mês tem-se 2880 intervalos de integração (30 dias \times 24 horas/15 minutos = 2880 intervalos), que servem de base de cálculo para parte da sua conta de energia.

Para entender melhor a diferença entre consumo e demanda, vamos a um exemplo: imagine que uma lâmpada de 100 W foi ligada às 18 h, mais uma às 19 h e, finalmente, outra às 20 h. Às 21 h, tudo foi desligado. Qual foi o consumo e qual foi a demanda?

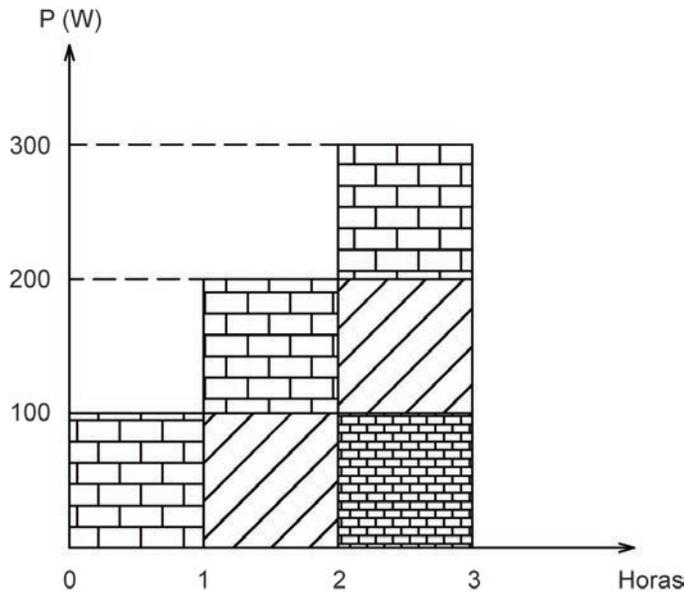


Figura 77 Gráfico da potência em função do tempo.

Bem, o consumo total no período (três horas) foi de 600 Wh ($1 \text{ h} \times 100 \text{ W} + 1 \text{ h} \cdot 200 \text{ W} + 1 \text{ h} \cdot 300 \text{ W}$). A demanda foi igual a 300 W (máximo valor exigido).

5.3.2.1 Por que se preocupar com a demanda e o período de integração?

Ainda nesta unidade será estudado o modo de tarifação em que os consumidores industriais podem se enquadrar. Entre todas as modalidades, um critério é comum: a demanda faturada (efetivamente cobrada) é a maior demanda registrada (medida) e não a média entre elas.

Em termos práticos, isso significa que se o consumidor ligar uma carga de alta potência (maior que as demais na instalação) no instante em que a medida ocorre, mesmo que por um breve momento, essa demanda será considerada na cobrança.

A Figura 78 ilustra um exemplo. O período considerado foi o das 7 às 18 h (45 medidas em intervalos de 15 minutos). Na média das demandas, tem-se 190 kW, porém a mais alta registrada foi 240 kW. Portanto, a demanda faturável é 240 kW, e não 190 kW.

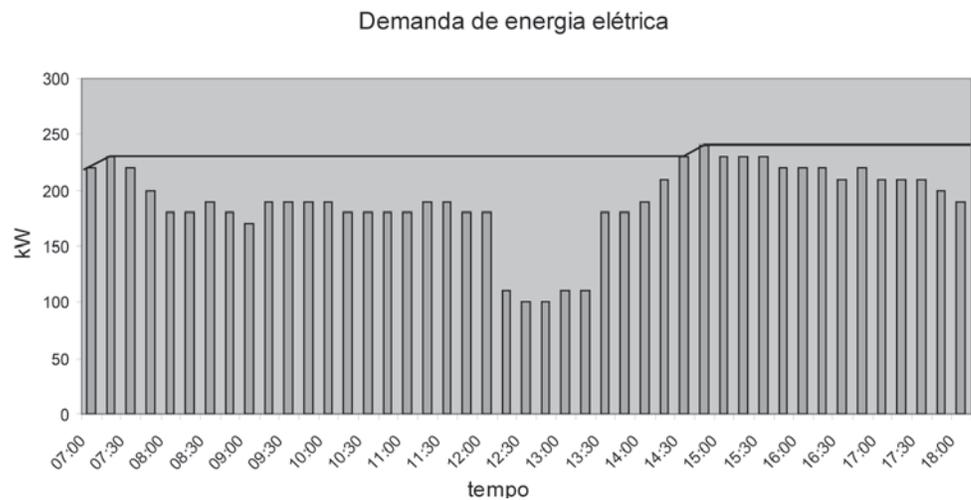


Figura 78 Demanda de energia elétrica.

Ratificamos que demanda é diferente de consumo. A demanda é um dos parâmetros da conta de energia elétrica e não ela toda. Por essa razão, a demanda é medida em (kW) e o consumo em (kWh). Em uma analogia com a cinemática (mecânica do movimento), é como se o consumo fosse o espaço percorrido e a demanda a velocidade média em 15 minutos.

5.3.2.2 Fator de carga (FC)

Trata-se de um índice que permite verificar a quantidade de energia elétrica que se utiliza de forma racional. Assim como o fator de potência, o de carga varia entre 0 e 1.

Ele pode ser expresso pela seguinte função básica:

$$\text{Fator de carga} = \frac{\text{consumo}[\text{KWh}]}{\text{demanda}[\text{KW}] \cdot 730 \text{ h}}$$

O valor de 730 h no denominador muda de acordo com a classe do consumidor, mas representa o número de horas médio em um mês genérico do ano (365 dias x 24 horas)/12 horas. Quanto mais próximo de um, melhor é a eficiência energética do sistema, porque mais próximos estão o consumo e a demanda. Se a demanda for muito maior que o consumo, há desperdício de dinheiro na conta de energia elétrica.

Para aumentar ao máximo o fator de carga, matematicamente deve-se reduzir a diferença entre o valor do consumo e da demanda, contudo quatro boas práticas colaboram para isso em campo:

1. fazer um cronograma de utilização dos equipamentos e anotar a potência e o período de trabalho de cada um;
2. diminuir, sempre que possível, os períodos ociosos de cada equipamento e operá-los de forma não simultânea;
3. não acionar simultaneamente motores que iniciem operação com carga;
4. verificar as condições técnicas das instalações e dar aos equipamentos manutenção periódica.

5.3.3 Tarifação da energia elétrica

O preço da energia elétrica difere nas diversas regiões do Brasil. Dependendo da localidade, tanto as tarifas como a metodologia de cálculo podem variar um pouco.

Para fins didáticos, utilizaremos como modelo a AES Eletropaulo, maior empresa de distribuição de energia da América Latina, compreendendo 24 municípios do Estado de São Paulo (incluindo a capital).

A tarifa pode ser *monômnia* ou *binômnia*.

A *monômnia* é aplicada em baixa-tensão (BT até 2,3 kV) e ocorre apenas em função do consumo direto medido em kWh.

Esse grupo de consumidores chama-se grupo B, e alguns exemplos clássicos são: residencial (B1), rural (B2), demais classes (B3) e iluminação pública (B4). Para esse grupo, a conta a ser paga depende única e exclusivamente do gasto efetivo, independentemente do horário e da época do ano.

Na tarifa binômnia, faturam-se o consumo (kWh) e a demanda (kW).

5.3.3.1 O que isso significa na prática?

A Resolução normativa nº 414, de 9 de setembro de 2010 (ANEEL, 2013a), divide as tarifas em *convencional* e *horossazonal*.

5.3.3.1.1 Tarifa convencional

Modalidade caracterizada pela aplicação de tarifas de consumo de energia elétrica e demanda de potência, independentemente das horas de utilização do dia e dos períodos do ano.

Na tarifa convencional, fatura-se apenas o valor total do consumo verificado em um período aproximado de 30 dias.

A tarifa convencional exige um contrato específico no qual o consumidor informa à concessionária a quantidade de potência máxima em kW que precisa para a sua instalação elétrica. Esse valor da demanda pretendida pelo consumidor será a demanda contratada, independentemente da hora do dia (ponta ou fora de ponta) ou período do ano (seco ou úmido).

Os consumidores do grupo A, que recebem energia em média-tensão, subgrupos A3a, A4 ou AS, são enquadrados na tarifa convencional quando a demanda contratada for inferior a 300 kW, desde que não tenha ocorrido, nos 11 meses anteriores, três registros consecutivos ou seis registros alternados de demanda superior a 300 kW.

A conta mensal de energia elétrica desses consumidores é composta da soma de parcelas referentes ao consumo em kWh, demanda em kW e ultrapassagem do valor contratado também em kW.

Calcula-se o consumo mensal com a multiplicação do consumo medido pela tarifa de consumo:

$$P (\text{consumo}) = \text{tarifa de consumo} \times \text{consumo medido}$$

Calcula-se a parcela de demanda com a multiplicação da tarifa de demanda pela demanda contratada ou pela demanda medida (a maior delas), caso esta não ultrapasse em 5% a demanda contratada:

$$P (\text{demanda}) = \text{tarifa de demanda} \times \text{demanda contratada}$$

A parcela de ultrapassagem é cobrada apenas quando a demanda medida ultrapassa 5% a contratada. Calcula-se multiplicando a tarifa de ultrapassagem pelo valor de demanda medida que supera a contratada:

$$P (\text{ultrapassagem}) = \text{tarifa de ultrapassagem} \times (\text{demanda medida} - \text{demanda contratada})$$

Na modalidade de tarifação convencional, a tarifa de ultrapassagem corresponde a três vezes a tarifa de demanda.

5.3.3.1.2 Tarifa horossazonal (THS)

Modalidade caracterizada pela aplicação de tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica e de demanda de potência de acordo com os postos horários, horas de utilização do dia, e os períodos do ano.

Essa tarifa destina-se a grandes consumidores e tem por finalidade reduzir a conta de energia elétrica por meio de duas técnicas: possibilidade de deslocamento de cargas para horários de menor carregamento e consumo para períodos do ano de maior disponibilidade. Os preços diferenciados permitem ao consumidor gerenciar despesas.

A tarifa horossazonal é representada pelo grupo A (alta-tensão), ou seja, consumidores ligados em tensão superior a 2,3 kV.

O grupo A é constituído de seis subgrupos:

- subgrupo A1: 230 kV ou mais;
- subgrupo A2: 88 kV a 138 kV;
- subgrupo A3: 69 kV;
- subgrupo A3a: 30 kV a 44 kV;
- subgrupo A4: 2,3 kV a 25 kV;
- subgrupo AS: subterrâneo.

Para compreender a razão pela qual há preços diferenciados de demanda e consumo de acordo com a utilização em determinados horários do dia e período do ano, é preciso analisar algumas definições:

- Horário de ponta:* esse horário é composto de um período de três horas consecutivas, das 17 h às 22 h, dependendo da região. Na área da CPFL Paulista, por exemplo, é das 18 h às 21 h. Esse horário é chamado de ponta porque há um pico no consumo de energia elétrica em virtude de fatores como: iluminação pública e residencial (período noturno), eletrodomésticos (TVs, chuveiros, ferro para passar roupa etc.) e empresas que funcionam 24 horas.
- Horário fora de ponta:* esse horário é composto de um período de 21 horas diárias complementares ao horário de ponta. Divide-se em dois períodos, capacitivo e indutivo, em razão das diferenças do tipo de carga reativa mais comum nesses horários. Na área da CPFL Paulista, por exemplo, o período capacitivo é das 00 h às 6 h e o indutivo é das 6 h às 00 h.

No decorrer do período, a natureza da carga muda de indutiva para capacitiva porque durante o dia as cargas mais utilizadas pelas indústrias constituem-se de motores e transformadores. À noite, reatores eletrônicos (capacitores internos) e lâmpadas fluorescentes estão mais presentes, e são cargas essencialmente capacitivas.

- *Demanda medida*: é o resultado da divisão do consumo medido pelo tempo de medição, visto que, para o faturamento, esse intervalo é de 15 minutos.
- *Demanda contratada*: é o valor de demanda obrigatória e continuamente disponibilizada pela concessionária conforme valor e período de vigência do contrato. Esse valor, contratado pelo consumidor, deve ser pago à concessionária, seja ou não utilizado.
- *Tolerância da demanda medida*: trata-se de um percentual sobre a demanda contratada (varia de acordo com a tensão de fornecimento) que, uma vez superado pelo consumidor, cabe a aplicação da tarifa de ultrapassagem em toda parcela que exceder respectivamente a demanda contratada.
- *Período seco*: compreende o intervalo de sete meses consecutivos situado entre os fornecimentos abrangidos pelas leituras dos meses de *maio a novembro* de cada ano.
- *Período úmido*: compreende o intervalo de cinco meses consecutivos situado entre os fornecimentos abrangidos pelas leituras dos meses de *dezembro* de um ano a *abril* do ano seguinte.

5.3.3.1.2.1 Tarifa horossazonal azul

Essa modalidade tarifária tem aplicação compulsória para unidades consumidoras atendidas em tensão igual ou superior a 69 kV (A1, A2 e A3), sendo **opcional** para os demais consumidores. Exige um contrato específico entre a distribuidora de energia e o consumidor, em que, entre outras cláusulas, destacam-se:

- Dois valores de demanda contratada (kW), um para o segmento de ponta e outro para o fora de ponta.
- Para cada período, aplica-se uma tarifa diferente, estando a tarifa de ponta na ordem de três vezes o valor de fora de ponta.

- Dentro do período de faturamento, a demanda faturável é o maior valor entre a demanda contratada e a medida em cada posto horário.
- Aplicam-se tarifas diferentes para os períodos de ponta e fora de ponta, em caso de ultrapassagem da demanda contratada.

Para o consumo de energia (kWh), existem tarifas com preços diferentes para os períodos de:

- Ponta Úmida (PU);
- Fora de Ponta Úmida (FPU);
- Ponta Seca (PS);
- Fora de Ponta Seca (FPS).

Na tarifa azul, portanto, utiliza-se da Tabela 16 como resumo do modelo tarifário:

Tabela 16 Resumo da tarifação horossazonal azul.

Horários do dia	Faturamento de maio a novembro (período seco)	Faturamento de dezembro a abril (período úmido)
Ponta – três horas	Consumo – Ponta Seca	Consumo – Ponta Úmida
18 h às 21 h	Demanda – Ponta Seca	Demanda – Ponta Úmida
Fora de ponta	Consumo Fora de Ponta Seca	Consumo Fora de Ponta Úmida
21 horas restantes	Demanda Fora de Ponta Seca	Demanda Fora de Ponta Úmida

O enquadramento dos consumidores do grupo A na tarifação horossazonal azul é obrigatório para os consumidores que recebem energia em alta-tensão ou que fazem parte dos subgrupos A1, A2 ou A3.

Essa modalidade tarifária também exige um contrato específico com a concessionária de energia no qual se estabelece o valor da demanda pretendida pelo consumidor no horário de ponta (demanda contratada na ponta) e o valor necessário de potência máxima nas horas fora de ponta (demanda contratada fora de ponta).

A conta de energia elétrica desses consumidores é composta da soma de parcelas referentes ao consumo mensal em kWh, demanda em kW e ultrapassagem da demanda contratada. Em todas as parcelas observa-se a diferenciação das tarifas entre horas de ponta e fora de ponta.

A parcela de consumo mensal em kWh se calcula pela expressão seguinte, observando nas tarifas o período do ano:

Preço médio no período de ponta:

$$P = (\text{tarifa de demanda ponta/fator de carga ponta} \times 66) + \text{tarifa de consumo}$$

Preço médio fora de ponta:

$$P = (\text{tarifa de demanda fora de ponta/fator de carga fora de ponta} \times 664) + \text{tarifa de consumo fora de ponta}$$

A parcela de ultrapassagem é cobrada apenas quando a demanda ultrapassa a demanda contratada acima dos limites de tolerância. Esses limites são de 5% para os subgrupos A1, A2, A3, A3a e A4.

5.3.3.1.2.2 Tarifa horossazonal verde

O enquadramento dos consumidores que recebem energia em média-tensão, grupo A, subgrupos A3a, A4 e AS na tarifa verde é opcional.

Essa modalidade tarifária também exige um contrato específico com a concessionária no qual se estabelece a demanda pretendida pelo consumidor (demanda contratada), independentemente da hora do dia (ponta ou fora de ponta). A conta de energia elétrica desses consumidores é composta da soma das parcelas referentes ao consumo mensal em kWh (na ponta e fora dela), demanda em kW e ultrapassagem da demanda contratada.

A parcela de consumo mensal em kWh é calculada pela expressão seguinte, observando nas tarifas o período do ano:

Preço médio no período de ponta:

$$P = (\text{tarifa de demanda/FC} 366) + \text{tarifa de consumo na ponta}$$

Preço médio no período fora de ponta:

$$P = (\text{tarifa de demanda/FC} 3664) + \text{tarifa de consumo fora de ponta}$$

Tabela 17 Resumo da tarificação horossazonal verde.

Horários do dia	Período seco	Período úmido
Ponta – três horas (18 h às 21 h)	Consumo Ponta Seca	Consumo Ponta Úmida
Fora de ponta (21 horas restantes)	Consumo Fora de Ponta Seca	Consumo Fora de Ponta Úmida
Todo o dia (24 horas)	Demanda única	

5.3.3.1.3 Enquadramento tarifário

O enquadramento tarifário se dá com base na legislação, carga instalada, tensão de fornecimento, classe de consumo da unidade e região onde se localiza.

Existe a possibilidade de enquadramento em mais de um sistema de faturamento. De acordo com o subgrupo tarifário, os consumidores do grupo A podem fazer a opção tarifária, conforme a Tabela 18.

Tabela 18 Modalidades tarifárias.

Subgrupo tarifário	Modalidade tarifária		
	Convencional	THS – azul	THS – verde
A1	Impedido	Compulsório para qualquer valor de demanda contratada	Impedido
A2			
A3			
A3a	Disponível para contratos inferiores a 300 kW	Disponível para contratos a partir de 30 kW	Disponível para contratos a partir de 30 kW
A4			
AS (subterrâneo)			

5.3.3.1.3.1 Como saber em que modalidade tarifária se enquadrar e o modo mais econômico possível?

Pela Resolução 414 (ANEEL, 2013a), sabemos que:

- até 299 kW o consumidor pode optar por tarifa convencional, horossazonal azul ou verde;
- de 300 kW em diante, só é possível optar pela horossazonal azul ou verde;
- se o fornecimento for acima de 88 kV, só é possível escolher a horossazonal azul.

Quando possível, o consumidor pode escolher a tarifa que deseja em seu contrato com a concessionária de energia elétrica. Chamamos essa escolha de *diagnóstico energético*.

A finalidade do diagnóstico energético é otimizar (reduzir) o preço final da conta, pois preço é diferente de tarifa. Apesar de todos os consumidores do mesmo subgrupo estarem sujeitos às mesmas tarifas, elas podem ter preços diferentes.

O preço médio (PM) é calculado segundo a função:

$$PM = \frac{\textit{fatura(R\$)}}{\textit{Demanda(kW)} \times \textit{tempo} \times \textit{fator de carga (FC)}}$$

Como o fator de carga (FC) está no denominador, quanto maior ele for, menor é o valor da conta.

5.3.3.1.3.2 O que significa ter um alto FC?

Ter um alto FC significa aproximar ao máximo o consumo da demanda. Em outras palavras, quanto mais controle e informação o consumidor tiver sobre sua carga instalada, menor será sua conta.

Exemplos:

Um cliente tem um consumo heterogêneo. Não trabalha 24 horas por dia e não possui nenhum sistema de controle da sua demanda.

- *Melhor opção*: modalidade convencional.
- *Razão*: embora a tarifa convencional seja a mais cara, ele não será multado por demandas fora do contrato.

Um cliente tem um consumo homogêneo, porém nem sempre opera 24 horas por dia. Apesar de possuir um sistema de controle de demanda, seu fator de carga é inferior a 0,7.

- *Melhor opção*: modalidade horossazonal verde.
- *Razão*: terá sua conta menor do que se optasse pela tarifa convencional, e como seu fator de carga é no máximo 0,7, seu risco de multa por ultrapassagem da demanda é pequeno.

Um cliente tem um consumo controlado entre os períodos de ponta e fora de ponta. Além disso, pode adaptar sua produção de acordo com o período úmido ou seco, e seu fator de carga é no mínimo 0,85.

- *Melhor opção*: modalidade horossazonal azul.
- *Razão*: como seu controle é total sobre sua demanda, ele pode aproveitar a menor tarifa, ter a menor conta e não ser cobrado por excesso da demanda contratada.

5.3.3.1.3.3 Como saber o perfil de consumo de uma indústria?

Primeiramente, é necessário coletar os dados do consumo e da demanda. Isso pode ser feito manualmente, com o consumo obtido pela leitura do medidor na caixa de entrada e a demanda calculada segundo a soma das potências ativas dos equipamentos da planta industrial.

Após a obtenção dos dados, é possível fazer simulações por meio de *softwares* disponibilizados nos *sites* das concessionárias de energia elétrica.

5.3.3.2 Exemplo de aplicação

Como exemplo de aplicação, vamos analisar uma conta de energia elétrica do mês de abril de 2008 da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). A concessionária de energia elétrica na cidade de São Carlos é a Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL).

A UFSCar tem uma cabine de entrada de energia elétrica em média-tensão (11,9 kV – grupo A4), em que estão a medição e a proteção geral da rede interna do *campus*. A classificação é Poder Público Federal com Tarifa Horossazonal Azul (THS).

As leituras são efetuadas no dia 10 de cada mês. A pedido, a CPFL pode fornecer a curva de carga mensal com os dados coletados em seu medidor de energia. Com a curva de carga é possível identificar os períodos em que alguma variável medida excedeu ou ficou abaixo do valor esperado.

A UFSCar pode ser considerada um consumidor de energia de médio porte, com um valor mensal total da conta na ordem de R\$ 260.000,00.

O *horário de ponta* estabelecido pela CPFL é das 18 h às 21 h e o *horário fora de ponta* são as 21 horas restantes do dia.

O *contrato de demanda* de energia entre a UFSCar e a CPFL estabelece o valor de 1450 kW no horário de ponta e de 2050 kW no horário fora de ponta.

Nas figuras 79 e 80 estão as cópias da referida conta de energia.

Dados da Unidade Consumidora

Nome Fantasia **Conta Mês**
04/2008

Endereço
RDV WASHINGTON LUIZ 235 - CEP13565-905
SAO CARLOS

Inscrição CNPJ/CPF 45258058/0001-40 **Inscrição Estadual**

Atividade ORGAOS PODER EXECUTIVO
Classificação PODER PUBLICO FEDERAL THS AZUL - A4

Lote/Código - 07/270060013935 FOLHA 1, DE 1

Endereço de Entrega RDV WASHINGTON LUIZ 235 -S CARLOS RURAL

Município SAO CARLOS - SP **CEP** 13565-905

Referência de Localização **Vencimento** 30/04/2008



Seu Código 0002095777
Identifique seus serviços por este código. Confira também, em nossa página de Internet, as opções de serviços e condições, para garantir a melhor tarifa da CPFL.
www.cpfl.com.br



CPFL - 0800 770 41 40
Ouvidoria CPFL - 0800 770 27 35
Comissão de Serviços Públicos de Energia CPSP - 0800 055000
Agência Nacional de Energia Elétrica ANEEL 144 - Ligação gratuita de telefones fixos e tarifada na origem para telefones celulares

CONFORME LEGISLAÇÃO VIGENTE, APOS VENCIMENTO INCIDIRÁ MULTA DE 2%, JUROS DE MORA E ATUALIZAÇÃO MONETÁRIA EM CONTA FUTURA.

- REAJUSTE DA TARIFA DO GRUPO A: REDUÇÃO MÉDIA DE 15,7%, CONFORME RESOLUÇÃO 627/ANEEL DE 07/04/2008. VIGÊNCIA A PARTIR DAS LEITURAS DE 08/04/2008, INCLUSIVE.

Autenticação Mecânica

Figura 79 Conta de energia elétrica da UFSCar do mês de abril de 2008.

Nome/Razão Social	Sua Cédula	Conta Mês	Vencimento
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS	0002095777	04/2008	30/04/2008

Descrição de conta nº	Registrado	Contratado	Faturado	Tarifa/Preço	Valores Faturados
DEMANDA DE POTENCIA NA PONTA - KW	1632	1450	1450	31,527200	45.714,44
DEMANDA FORA DE PONTA - KW	2218	2050	2218	7,992987	17.728,40
DEMANDA ULTRAPASSAGEM NA PONTA - KW	0	0	182	94,561602	17.213,85
CONSUMO TOTAL NA PONTA KWH	79272	79272	0	284532	22.555,42
CONSUMO TOTAL FORA DE PONTA - KWH	711800	711800	0	176149	124.638,03
REATIVO EXCEDENTE PONTA - FER - P	138	0	10080	0,175149	39,27
REATIVO EXCEDENTE PONTA - FER - P	10080	0	0	31,527200	1.765,80
DEM REATIVA EXCEDENTE PONTA/FDR KW	0	0	0	7,992987	0,00
DEM REATIVA EXCEDENTE PP - FDR KW	0	0	0	7,992987	0,00
DEMANDA MÁXIMA CORRIGIDA NA PONTA	1580	0	0	0	0,00
DEMANDA MÁXIMA CORRIGIDA FORA PONTA	0	0	0	0	0,00
ICMS					50.411,61
SUBTOTAL					280.064,52
TOTAL CPFL					280.064,52
RET. S/PORNEC - ART64 LEI9430-8,85%					16.629,61
RET. S/DEMANDA - ART64 LEI9430-9,45%					9.295,19
Total A Pagar Até Vencimento					280.139,72
Total A Pagar Após Vencimento					280.139,72

Lançado
SIAFI / CPR
 2008 NS 3424
 2008 PT 811

PAGO
 08/04/08
25 ABR 2008

ICMS - Base de Cálculo	Alíquota	Valor ICMS	Valor PIS	Valor COFINS
280.064,52	18,00%	50.411,61	2.492,57	11.314,61

Dados da Leitura	Data Leitura Anterior	qtde dias	Data Apresentação
	12/03/2008	29	16/04/2008
Taxa de Perda	0,0		Data Prevista Próxima Leitura 12/05/2008

Nº Medidor	ENERGIA ATIVA - 400752794				ENERGIA REATIVA 400752794			
	Leitura (kWh) Anterior	Leitura (kWh) Atual	Diferença	Constante	Leitura Anterior	Leitura Atual	Diferença	Constante
PONTA	902628	968688	66060	1,20000	29510	29625	115	1,2000
FORA PONTA	88064	93984	5930	120,00000	2691	2775	84	120,0000

Indicadores Qualidade do Conjunto Elétrico - SAO CARLOS			Apurado	Padrão	Nível de Tensão - Volts
O consumidor pode solicitar a CPFL a supuração do DIC, RIC e DMIC.					
DEC = Duração Equivalente de Interrupção (horas)			0,41	2,50	Contratado 11900
FEC = Frequência Equivalente de Interrupção (qtde)			0,33	2,10	Mínimo 11067
DIC = Duração de Interrupção Individual por UC (horas)			0,00	14,00	Máximo 12495
FIC = Frequência de Interrupção Individual por UC (qtde)			0,00	11,00	
DMIC = Duração Máxima de Interrupção Contínua (horas)			0,00	7,00	



Vencimento	Nº da Conta de Energia Elétrica	DV	Valor Pago
30/04/2008	AR02 20080401072940	3	280.139,72

CONFORME LEGISLAÇÃO VIGENTE, APOS VENCIMENTO INCIDIRÁ MULTA DE 2%, JUROS DE MORA E ATUALIZAÇÃO MONETÁRIA EM CONTA FUTURA.

DEFIN
 Recebido em 15/04/08
 [Assinatura]

Autenticação Mecânica no Verso - Não Vale como Recibo

015/026

Figura 80 Conta de energia elétrica da UFSCar no mês de abril de 2008.

Para melhor visualização dos principais itens, estes estão transcritos na Tabela 19.

Tabela 19 Transcrição dos principais itens da conta de energia apresentada nas figuras 79 e 80.

Descrição	Registrado	Contratado	Faturado	Tarifa/ Preço	Valores
Demanda de potência na Ponta – kW	1632	1450	1450	31,527200	45714,44
Demanda de potência Fora de Ponta – kW	2218	2050	2218	7,992967	17728,40
Demanda de ultrapassagem na Ponta – kW	0		182	94,581602	17213,85
Consumo total na Ponta – kWh	79272		79272	0,284532	22555,42
Consumo total fora de Ponta – kWh	711600		711600	0,175149	124636,03
Reativo excedente na Ponta – FER P	138		138	0,284532	39,27
Reativo excedente Fora de Ponta – FER FP	10080		10080	0,175149	1765,50

Análise das demandas:

Ponta: como o valor registrado de 1632 kW excedeu o valor contratado de 1450 kW em mais do que 10% (antiga resolução 456), o valor faturado foi o contratado de 1450 e a diferença de 182 kW foi faturada como demanda de ultrapassagem na ponta com uma tarifa três vezes maior (R\$ 31,5272 × 3).

Fora de Ponta: como o valor registrado de 2218 kW não excedeu o valor contratado de 2050 kW em mais do que 10%, o valor faturado foi o registrado de 2218 kW. Observe que a tarifa de demanda no horário de ponta é 3,94 vezes maior do que no horário fora de ponta.

Análise dos consumos: a tarifa de consumo no horário de ponta é 1,62 vezes maior que no horário fora de ponta.

Análise do reativo excedente: os valores faturados na ponta e fora de ponta, embora reduzidos, indicam a necessidade da instalação de mais bancos trifásicos de capacitores na rede de energia do *campus*.

Conclusão:

No horário de ponta, a energia elétrica custa mais caro para todos os consumidores com tarifas horossazonais, em relação ao horário fora de ponta. Qualquer medida de racionalização do uso da energia elétrica é sempre bem-vinda e os valores em reais que seriam economizados poderiam ser aplicados em outros investimentos de ensino e pesquisa.

5.3.4 Controle e análise de consumo e demanda

Resumindo o que tratamos até agora, basicamente há três opções para o consumidor industrial reduzir o preço da energia elétrica: contratar corretamente o serviço, transferir o máximo possível o funcionamento das cargas para o horário fora de ponta e escolher a melhor opção tarifária.

Contudo, há variáveis que dificultam essas decisões, como clima, momento econômico, férias, novos equipamentos, paradas não programadas, variação na produção etc.

Para lidar com essa situação, contamos com equipamentos que controlam automaticamente a demanda. Um controlador de demanda utiliza a informação que vem do medidor da concessionária (lá estão os sinais de controle) além das variáveis a serem controladas. Logo, o controlador de demanda deve receber as informações da concessionária e, baseado nelas, realizar suas ações sobre as cargas elétricas passíveis de controle. Assim que recebe os sinais da concessionária, o controlador de demanda passa a verificar dentro de cada período de integração (quase 3000 intervalos/mês) a necessidade de retirar ou não alguma carga elétrica da instalação a fim de que a demanda global contratada não ultrapasse o valor contratado com a concessionária. Se não houver tendência de ultrapassagem da demanda contratada, ele não atua.

A economia que se espera obter com um controlador de demanda depende totalmente do processo. Não existe um valor específico nem para o *pay back* (tempo de amortização do investimento), entretanto não são raras economias superiores a 30%.

Caso o processo não permita manejo de cargas (como no caso de um hospital), só resta fazer uma análise do consumo e da demanda para uma contratação otimizada com a concessionária de energia elétrica.

5.3.5 Energia e produção

Produzir mais com menor consumo de energia é o grande desafio. Fazer isso respeitando as características do processo industrial é possível por meio da definição do consumo específico. Esse parâmetro indica o total da energia consumida para produzir um produto ou serviço. Portanto, quanto mais preciso for o cálculo, melhor é a apuração das reais economias e resultados.

A unidade de medida do consumo específico depende da área final da empresa. Eis alguns exemplos:

- escolas: kWh/aluno ou kWh/hora aula;
- hospitais: kWh/leitos ocupados;
- prédios administrativos: kWh/m² ou kWh/funcionário;
- serviços públicos: kWh/pessoa atendida.

No setor industrial, trata-se do consumo relativo à produção:

- kWh/t ou kWh/peça.

Pode haver mais de um consumo específico, se existe mais de uma atividade ou serviço realizado na mesma instalação.

Após a definição do consumo específico, sabe-se o custo específico, que é o custo da energia por unidade produzida:

$$CE\$ = \frac{\text{custo de energia}}{\text{produto}}$$

Ou o produto do preço médio da energia elétrica pelo consumo específico:

$$CE\$ = R\$/kWh \cdot kWh/\text{produto}$$

Para reduzir o consumo específico, deve-se partir de três premissas:

- consumo específico = consumo/produção;
- a produção é função do mercado;
- consumo = potência × tempo.

Sendo assim, só nos restaria diminuir a potência instalada e/ou o tempo de funcionamento. Já sabemos de antemão que raramente isso é possível, portanto é preciso otimizar a planta por meio de quatro práticas:

- usar equipamentos mais eficientes;
- reduzir a simultaneidade no uso de equipamentos;
- atuar na mudança de hábitos e processos;
- automatizar ao máximo a produção.

Estabelecer condições de referência, tais como cargas existentes, produção envolvida, tempos de uso, condições climáticas, operador e qualidade do produto,

pode ajudar. Deve-se estar sempre atento a possíveis reajustes tarifários, criação de taxas ou encargos e mudança de alíquotas dos impostos.

Para calcular o *pay back*, basta dividir o investimento ($R\$ \times t$) pela economia ($R\$$), ou seja, $\text{pay back} = \text{investimento (R\$} \times t) / \text{economia (R\$)}$.

Um rateio de despesas com energia elétrica na empresa pode ser feito a partir de cinco passos elementares:

- estabelecer o *layout* da instalação ou criar os centros de custo;
- fazer o levantamento das cargas da instalação por centro de custo;
- levantar o regime de funcionamento;
- calcular os consumos de energia potenciais;
- proceder ao rateio de energia elétrica na instalação, com base na distribuição percentual por centro de custo.

Para implementar tudo isso em uma empresa, sugere-se que seja criada uma Comissão Interna de Conservação de Energia (Cice). Suas principais atribuições são:

- realizar ou contratar um diagnóstico energético;
- controlar o consumo específico de energia elétrica;
- controlar o custo específico de energia elétrica;
- gerenciar a demanda total e por setores da instalação;
- avaliar as cargas elétricas de maior potência;
- propor medidas de gestão de energia elétrica;
- inspecionar as instalações elétricas;
- conscientizar e motivar os empregados;
- providenciar treinamentos e capacitação do pessoal;
- propor alterações nos sistemas de uso de energia elétrica, visando adequar seu consumo;
- delegar tarefas;
- avaliar os resultados e propor novas metas.

A verificação, análise e acompanhamento dos resultados é uma premissa básica nas atividades da Cice. Em outras palavras: o que não é medido não é controlado.

5.3.6 Fator de potência, causas, consequências e correção

5.3.6.1 Introdução

A corrente absorvida por cargas indutivas, tais como motores, transformadores etc., pode ser considerada como a soma de duas correntes: uma delas corresponde à energia ativa (*corrente ativa*), que se transforma em energia mecânica por meio do movimento do eixo de um motor, por exemplo. A outra corresponde à energia reativa (*corrente reativa*), que serve apenas para criar campos magnéticos, necessários ao funcionamento desses equipamentos.

A energia reativa não é consumida pelos equipamentos que dela necessitam, mas armazenada sob a forma de campo magnético nestes, durante curtos períodos de tempo, após os quais o campo magnético desaparece e a energia reativa é devolvida para a linha. Assim prossegue o equipamento ou carga, absorvendo e devolvendo energia reativa da linha, enquanto permanecer ligado. É um processo de troca contínua de energia reativa durante curtos períodos de tempo entre o sistema fornecedor de energia e a carga.

Portanto, há necessidade de que, durante esses curtos períodos de tempo, a corrente reativa seja fornecida pelos geradores nas usinas e levada até os consumidores, passando por linhas de transmissão, transformadores e os cabos que chegam às cargas. Quanto maior for a energia reativa consumida para um mesmo consumo de energia ativa, menor será o fator de potência.

A Figura 81 ilustra um sistema com gerador, transformadores, linhas de transmissão e um motor, sem capacitores ligados ao sistema, ou seja, toda a energia reativa provém da geração.

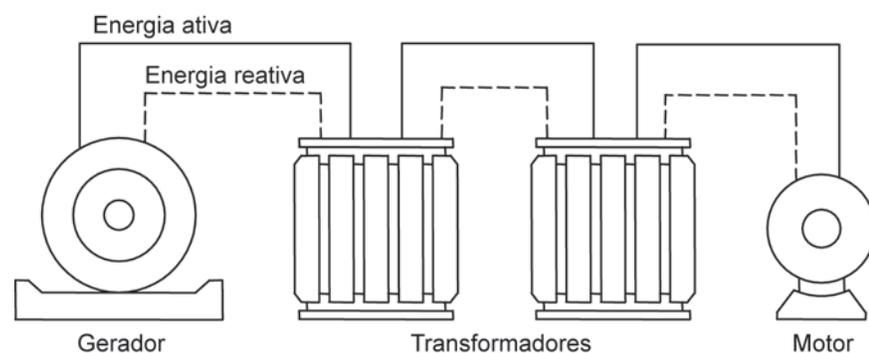


Figura 81 Sistema com gerador, transformadores, linhas de transmissão e um motor, sem capacitores.

Fonte: Zanin & Shimbo (2008).

A Figura 82 ilustra o mesmo sistema, com capacitores ligados, ou seja, com novo caminho percorrido pela corrente reativa.

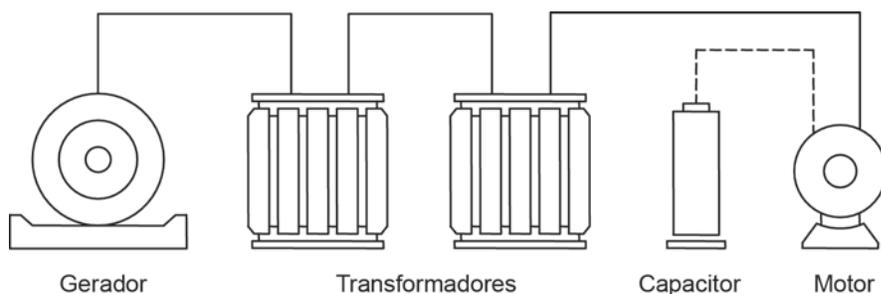


Figura 82 Sistema com gerador, transformadores, linhas de transmissão, capacitores e um motor.

Fonte: Zanin & Shimbo (2008).

Com a instalação de capacitores para corrigir o fator de potência, acontece o seguinte: durante um curto período de tempo após ligada a carga, o gerador fornece a ela energia reativa que é armazenada no seu campo magnético para, a seguir, ao desaparecimento desse campo, ser absorvida pelo capacitor (e não mais pelo gerador), que armazena essa energia para depois retorná-la à carga e assim continuar o processo até que ela seja desligada. Dessa forma, a troca de energia reativa está restrita à carga e ao capacitor, encurtando o seu caminho e aliviando geradores, transformadores, linhas etc.

O fator de potência nas instalações residenciais e comerciais é, em geral, bem próximo da unidade, graças ao predomínio de cargas resistivas, não havendo necessidade de correção. Nas instalações industriais, no entanto, onde predominam as cargas indutivas (principalmente motores elétricos), o fator de potência torna-se um motivo de preocupação.

5.3.6.2 Consequências do baixo fator de potência

Baixo fator de potência de uma instalação elétrica industrial significa sobrecarga em todo o sistema de alimentação, desde a rede da companhia concessionária até a parte interna da indústria, incluindo os equipamentos em uso. Quando numa indústria é constatado um fator de potência abaixo do valor mínimo fixado, as concessionárias se veem na contingência, de acordo com a legislação em vigor, de cobrar uma sobretaxa, o que representa substancial despesa extra para quem não tem suas instalações adequadas, além da sobrecarga nos transformadores e nos alimentadores, bem como menor rendimento e maior desgaste de máquinas, aparelhos e equipamentos em geral.

Por intermédio da portaria nº 1.569, de 23 de dezembro 1993, o governo permitiu às concessionárias cobrarem ajustes nas faturas de energia dos consumidores cujo *fator de potência médio mensal fosse inferior a 0,92*. Para as indústrias cujo fator de potência está abaixo de 0,92, o total da conta de energia elétrica será acrescido de:

a. uma fatura de demanda (FDR)

$$\text{FDR} = (\text{DM} \cdot (0,92/\text{fm}) - \text{DF}) \cdot \text{TDA};$$

b. outra fatura de consumo (FER)

$$\text{FER} = \text{CA} \cdot ((0,92/\text{fm}) - 1) \cdot \text{TCA}.$$

em que:

- FDR = demanda reativa excedente (kW);
- DM = demanda ativa máxima registrada no mês (kW);
- fm = fator de potência médio mensal;
- DF = demanda ativa faturável no mês (kW);
- TDA = tarifa de demanda ativa (R\$/kW);
- FER = reativo excedente (kVArh);
- CA = consumo ativo no mês (kWh);
- TCA = tarifa de consumo ativo (R\$/kWh).

O baixo fator de potência, além do acréscimo na conta de energia quando se situa abaixo do nível de 0,92, tem outras consequências danosas para a instalação da indústria:

- aumento da queda de tensão;
- sobrecarga nos equipamentos;
- aumento do desgaste nos dispositivos de proteção e manobra;
- aumento do investimento em condutores e equipamentos elétricos sujeitos à limitação térmica de corrente;
- obstrução da capacidade dos equipamentos acima, impedindo a ligação de novas cargas.

5.3.6.3 Causas do baixo fator de potência

Geralmente, o baixo fator de potência é devido a:

- motores de indução subcarregados;
- instalação de lâmpadas fluorescentes desprovidas de reatores de alto fator de potência;
- equipamentos eletrônicos, condicionadores de ar etc.;
- nível de tensão elevada (acima do nominal);
- motores trabalhando em vazio durante grande parte do tempo;
- transformadores de grande potência utilizados para alimentar pequenas cargas durante longos períodos.

5.3.6.4 Correção do fator de potência

Existem diversos métodos para a correção do baixo fator de potência:

- utilização e operação conveniente de motores e equipamentos;
- incremento do consumo de energia ativa (kWh);
- uso de motores síncronos;
- uso de capacitores.

Consegue-se a utilização conveniente de motores estudando modificações nos equipamentos e na sua operação, visando reduzir ao mínimo necessário o consumo da energia reativa sem prejudicar o processo de produção.

Pode-se verificar, pela análise da curva de carga do programa de produção, se existe a possibilidade de aumentar o consumo de energia ativa sem o aumento da energia reativa, logo melhorando o fator de potência. Esse aumento pode-se dar pelo aumento de funcionamento de equipamentos existentes ou pela instalação de novos equipamentos com alto fator de potência, como os seguintes:

- fornos de resistência e caldeiras elétricas;
- lâmpadas incandescentes ou de descarga com alto fator de potência;
- estufas e aparelhos de aquecimento por resistência;
- motores síncronos com fator de potência unitário operando a plena carga.

Com o aumento do consumo de energia ativa, haverá um aumento do fator de carga e do fator de potência, do que se conclui que haverá um duplo benefício.

5.3.6.5 Vantagens da correção do fator de potência

A correção do fator de potência proporciona redução da corrente de alimentação do sistema, fazendo com que as perdas por efeito joule sejam também reduzidas.

As vantagens da correção do fator de potência numa instalação são:

- a. redução dos custos da energia elétrica;
- b. redução das perdas nas linhas de alimentação;
- c. diminuição da potência aparente exigida da fonte, liberando capacidade para ligação de cargas adicionais;

Quando num sistema são usados capacitores ou outros equipamentos para a correção do fator de potência, ocorre uma diminuição da corrente fornecida pela fonte. Isso significa que a carga dos transformadores e dos alimentadores será diminuída, reduzindo uma eventual sobrecarga e, caso o sistema não esteja sobrecarregado, permitindo a ligação de cargas adicionais. Essa última é chamada *liberação da capacidade do sistema*.

- d. elevação dos níveis de tensão, melhorando o funcionamento dos motores e aparelhos e também o nível de iluminação;

As desvantagens de tensões baixas em qualquer sistema elétrico são bastante conhecidas, bem como os decorrentes prejuízos econômicos e operacionais. Como vimos, a correção do fator de potência de uma carga diminui sua corrente de alimentação e, conseqüentemente, reduz a queda de tensão, elevando a tensão aplicada à carga. Devemos observar que, em geral, não é econômico o uso de equipamentos para correção de fator de potência apenas para esse fim, a melhoria da tensão deve ser considerada como um benefício adicional.

- e. localização dos capacitores e motores síncronos para correção do fator de potência;

Conforme a finalidade específica da correção do fator de potência e/ou liberação da capacidade do sistema da utilização de capacitores, estes devem ser instalados:

- próximos à carga cujo fator de potência se pretende corrigir – ver na Figura 83 os itens C_1 e C_2 ;
- diretamente nos terminais dos alimentadores (correção por grupos) – ver na Figura 83 o item C_3 ;

- nos terminais (de alta ou baixa-tensão) do transformador principal – ver na Figura 83 o item C_4 ; ou
- combinando-se os diversos tipos.

A Figura 83 indica as diversas possibilidades de instalação de capacitores num sistema elétrico industrial. A melhor localização é C_1 , em seguida C_2 e assim por diante. No caso dos motores síncronos, devido ao seu porte (em geral algumas dezenas de kVA), não existe a mesma liberdade de instalação.

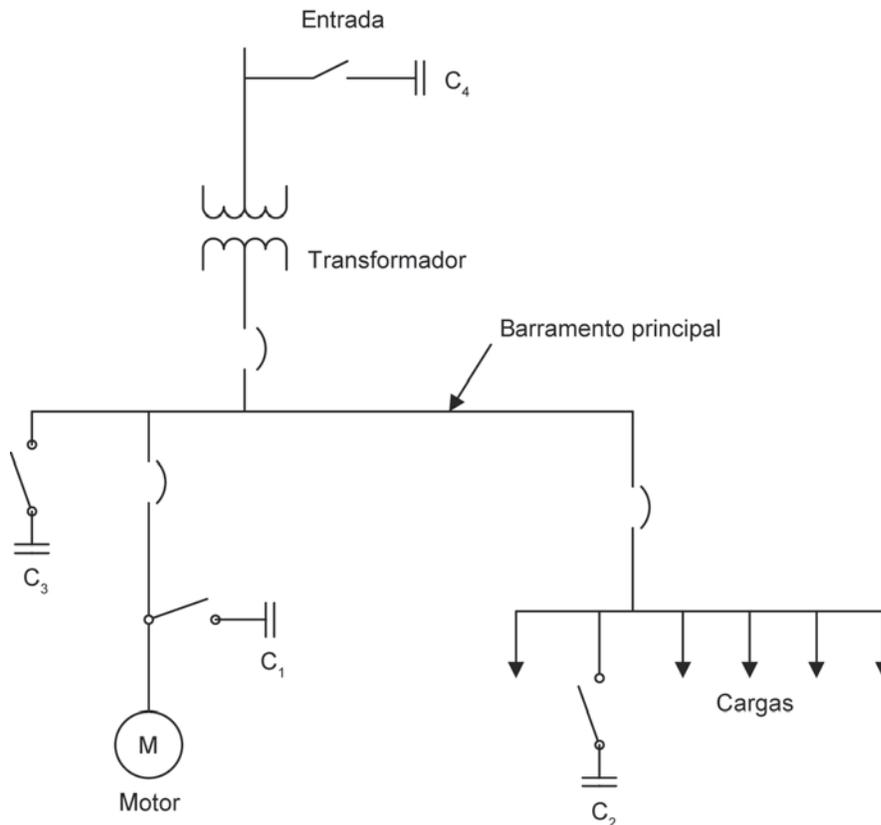


Figura 83 Possibilidades de instalação de capacitores num sistema elétrico industrial.

Algumas observações relativas à instalação dos equipamentos corretivos:

- o uso de motores síncronos, em geral, não é econômico para tensões de 220 a 480 V.

A partir da instalação dos capacitores junto às cargas, obtém-se:

- redução das perdas nos circuitos localizados entre a carga e os capacitores;
- elevação da tensão próxima à carga, melhorando as condições de funcionamento;

- liberação de capacidade nos transformadores.

Em geral, quanto maior a tensão, menor o custo dos capacitores, assim um capacitor de 220 V custa mais do que um de 440 V, por outro lado a instalação dos capacitores no lado primário de um transformador, embora ofereça vantagens econômicas (preço do capacitor), não proporciona liberação de capacidade no próprio transformador.

A correção do fator de potência exige que cada caso seja estudado individualmente, para se obter a solução mais adequada, tanto técnica quanto economicamente.

A partir de abril de 1996, as concessionárias passaram a calcular o fator de potência de hora em hora com base nos valores horários de energia ativa (kWh) e energia reativa (kVAh).

5.3.6.6 Exemplo de aplicação

Neste exemplo, determinamos a potência capacitiva necessária para corrigir o fator de potência de uma instalação industrial cuja demanda é praticamente constante ao longo do dia e vale 340 kW. O fator de potência médio medido em vários horários foi de 0,78. O valor medido precisa ser corrigido para 0,95.

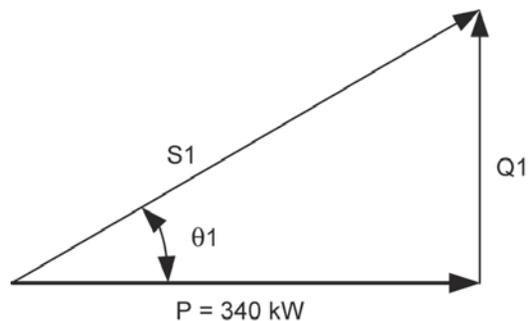


Figura 84 Triângulo de potências para a condição inicial.

Resolvendo:

$$\cos \theta_1 = 0,78 \Rightarrow \theta_1 = \arccos 0,78 \Rightarrow \theta_1 = 38,74^\circ$$

$$\operatorname{tg} \theta_1 = \frac{Q_1}{P} \Rightarrow Q_1 = P \cdot \operatorname{tg} \theta_1 \Rightarrow Q_1 = 340 \cdot \operatorname{tg} 38,74^\circ \Rightarrow Q_1 = 272,78 \text{ kVAr}$$

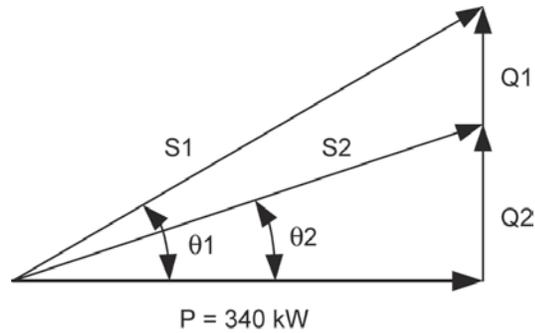


Figura 85 Triângulo de potências com a correção do fator de potência.

$$\cos \theta_2 = 0,95 \Rightarrow \theta_2 = \arccos 0,95 \Rightarrow \theta_2 = 18,19^\circ$$

$$\operatorname{tg} \theta_2 = \frac{Q_2}{P} \Rightarrow Q_2 = P \cdot \operatorname{tg} \theta_2 \Rightarrow Q_2 = 340 \cdot \operatorname{tg} 18,19^\circ \Rightarrow Q_2 = 111,75 \text{ kVAR}$$

Assim, a potência capacitiva necessária será igual a:

$$Q_1 - Q_2 \text{ ou } 272,78 - 111,75 = 161,03 \text{ kVAR.}$$

5.4 Considerações finais

Nesta unidade, aprendemos que, para racionalizar o uso da energia elétrica, é necessário saber como ela é cobrada. O gerenciamento da conta de energia elétrica representa uma medida de controle que pode trazer grandes benefícios financeiros para a empresa que a consome.

A correção do fator de potência libera a capacidade do sistema elétrico e contribui com a redução do valor mensal da conta de energia elétrica.

5.5 Exercícios

1. Defina:
 - a) consumo;
 - b) demanda;
 - c) fator de carga;
 - d) intervalo de integração.
2. Por que o período compreendido entre 17 h e 22 h (dependendo da região) é considerado horário de ponta?

3. Qual a diferença entre resistência elétrica e impedância?
4. Qual deve ser a capacidade de um banco de capacitores para elevar o fator de potência de 0,85 para 0,92 de um motor trifásico de 90 kW ou 125 cv?
5. Um motor elétrico de 75 kW que opera com 100% da sua potência nominal apresenta fator de potência de 0,90. Qual deve ser a capacidade do banco de capacitores para elevar o $\cos \theta$ até 0,95?
6. Em uma instalação, tem-se as seguintes cargas:
 - 30 motores de 3 cv com $\cos \theta = 0,73$;
 - 10 motores de 30 cv com $\cos \theta = 0,83$;
 - carga de 32,7 kVA com luminárias e $\cos \theta = 0,85$.

Qual deve ser a capacidade do banco de capacitores para elevar o fator de potência de toda a instalação para 0,92?

7. Em uma instalação, medindo com um wattímetro, encontramos 8 kW e, com um varímetro, 6 VAR. Qual o fator de potência e a potência aparente?
8. Calcule o fator de potência de uma instalação trifásica se:
 - $I_L = 100$ A;
 - $V_L = 380$ V;
 - potência ativa = 35 kW.
9. Uma instalação de 80 kW tem um fator de potência médio igual a 80%. Qual é a potência reativa a ser instalada para aumentar o fator de potência médio para 90%?
10. Em uma instalação industrial temos uma subestação de 1500 kW com fator de potência indutivo igual a 0,80. Deseja-se adicionar uma carga indutiva de 250 kW com fator de potência de 0,85. Qual o fator de potência final da instalação?
11. Numa instalação elétrica, a potência ativa é de 500 kW e o fator de potência 65% (atrasado). Qual deverá ser a potência em capacitores para elevar o fator de potência para 90%?

5.5.1 Respostas dos exercícios

1.
 - a) Consumo = energia gasta durante determinado tempo (consumo = potência x tempo), cuja unidade de medida é o kWh.
 - b) Demanda = potência da planta fabril solicitada à concessionária de energia elétrica, cuja unidade de medida é o kW.
 - c) Fator de carga = a razão entre o consumo e a demanda. Quanto mais próximo de 1, maior a eficiência energética do sistema.
 - d) Intervalo de integração = intervalo de tempo da medida da demanda realizada pela concessionária. No Brasil, é igual a 15 minutos.
2. Porque há um pico de consumo de energia elétrica, causado por três fatores principais: iluminação pública, maior participação de eletrodomésticos e empresas que funcionam 24 horas.
3. A resistência elétrica não varia com a frequência (por exemplo, resistores), a impedância, sim (por exemplo, indutores e capacitores).
4. 17,44 kVAr.
5. 11,67 kVAr.
6. 93,5 kVAr.
7. $\cos \theta = 0,80$ e $S = 10$ kVA.
8. $\cos \theta = 0,53$.
9. $Q_c = 21,26$ kVAr.
10. $\cos \theta = 0,81$.
11. $Q_c = 342,4$ kVAr.

5.6 Estudos complementares

5.6.1 Saiba mais

O assunto *eficiência energética* pode ser aprofundado estudando-se o capítulo 7 do livro:

CAPELLI, Alexandre. *Energia elétrica para sistemas automáticos da produção*. São Paulo: Érica, 2007. 320 p.

O tema *fator de potência* pode ser encontrado com detalhes no capítulo 3 do mesmo livro.

Mais informações sobre eficiência energética podem ser obtidas no capítulo 15 do livro:

MAMEDE FILHO, João. *Instalações elétricas industriais*. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

5.6.2 Outras referências

<http://pt.wikipedia.org/wiki/Fator_de_potência>

<<http://www.eletronbras.com/elb/procel/main.asp>>

<<http://www.cpfl.com.br>>

<<http://www.weg.com.br>>

UNIDADE 6

Instalações industriais

6.1 Primeiras palavras

Esta unidade apresenta os elementos elétricos fundamentais de uma planta industrial e trata dos transformadores de energia e dos motores elétricos. Vamos entender o funcionamento e os cuidados necessários para prolongar a vida útil desses equipamentos.

6.2 Problematizando o tema

Em nossas residências, a tensão elétrica, normalmente, tem dois valores: 127 V ou 220 V. Na indústria, de um modo geral, é preciso alimentar equipamentos de grandes potências com tensões elétricas maiores para redução correspondente da corrente elétrica. Assim, nas instalações industriais, podemos encontrar valores nominais de tensão de 380 V, 440 V ou até maiores.

6.3 Texto básico para estudos

6.3.1 Transformador de potência

É um equipamento que, por meio de indução eletromagnética, transfere energia de um circuito chamado *primário* para um ou mais circuitos denominados *secundário* ou *terciário*, respectivamente, sendo mantida a mesma frequência, porém com tensões e correntes diferentes:

Quanto ao meio isolante, os transformadores se classificam em:

- transformadores imersos em óleo mineral isolante;
- transformadores a seco.

Contemplaremos somente os transformadores imersos em óleo devido à quase exclusividade de sua utilização em projetos industriais. Os transformadores a seco são empregados mais especificamente em instalações de prédios de habitação ou em locais de alto risco para a vida das pessoas e do patrimônio. São construídos, em geral, em resina epóxi.

Um transformador imerso em óleo mineral é composto basicamente de três elementos:

- tanque ou carcaça;
- parte ativa (núcleo e enrolamentos);
- acessórios (terminais, ganchos, registros etc.).

O seu funcionamento está fundamentado nos fenômenos de mútua indução magnética entre os dois circuitos (primário e secundário) eletricamente isolados, porém magneticamente ligados.

A equação fundamental de operação de um transformador é:

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

em que:

- N_1 = número de espiras do enrolamento primário;
- N_2 = número de espiras do enrolamento secundário;
- V_1 = tensão aplicada nos terminais da bobina do primário;
- V_2 = tensão de saída nos terminais da bobina do secundário;
- I_1 = corrente que circula no enrolamento primário;
- I_2 = corrente que circula no enrolamento secundário.

Os transformadores podem ser, quanto ao número de fases:

- monobucha (F – T);
- monofásico (F – N);
- bifásico (2F);
- trifásico (3F).

Ao longo desta unidade só se fará referência aos transformadores trifásicos devido à sua quase total utilização em sistemas industriais no Brasil. A Figura 86 apresenta um transformador trifásico a óleo mineral.

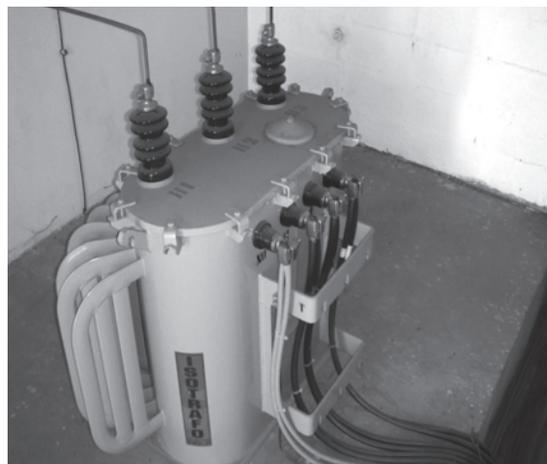


Figura 86 Transformador de distribuição.

Quanto às características elétricas, os transformadores podem ser estudados conforme os itens a seguir.

6.3.1.1 Potência nominal

É a potência que o transformador fornece continuamente a uma determinada carga, sob condições de tensão e frequência nominais, dentro dos limites de temperatura especificados por norma. A determinação da potência nominal do transformador em função da carga que alimenta é dada pela equação a seguir:

$$P_1 = \frac{\sqrt{3} \cdot V_s \cdot I_c}{1000} \text{ (kVA)}$$

em que:

- V_s = tensão secundária de alimentação de carga, em V;
- I_c = corrente da carga conectada, em A.

As potências nominais padronizadas e usuais estão discriminadas na Tabela 20.

Tabela 20 Dados característicos de transformadores trifásicos em óleo – classe 15 kV.

Potência (kVA)	Tensão (V)	Perdas (W)		Rendimento	Regulação	Impedância
		A vazio (no ferro)	Cobre	(%)	(%)	(%)
15	220 a 440	120	300	96,24	3,32	3,5
30	220 a 440	200	570	96,85	3,29	3,5
45	220 a 440	260	750	97,09	3,19	3,5
75	220 a 440	390	1200	97,32	3,15	3,5
112,5	220 a 440	520	1650	97,51	3,09	3,5
150	220 a 440	640	2050	97,68	3,02	3,5
225	380 a 440	900	2800	97,96	3,63	4,5
300	220	1120	3900	97,96	3,66	4,5
	380 ou 440	1120	3700	98,04	3,61	4,5
500	220	1700	6400	98,02	3,65	4,5
	380 ou 440	1700	6000	98,11	3,6	4,5

Tabela 20 *Continuação...*

Potência (kVA)	Tensão (V)	Perdas (W)		Rendimento	Regulação	Impedância
		A vazio (no ferro)	Cobre	(%)	(%)	(%)
750	220	2000	10000	98,04	4,32	5,5
	380 ou 440	2000	8500	98,28	4,2	5,5
1000	220	3000	12500	98,10	4,27	5,5
	380 ou 440	3000	11000	98,28	4,19	5,5
1500	220	4000	18000	98,20	4,24	5,5
	380 ou 440	4000	16000	98,36	4,16	5,5

Fonte: Mamede Filho (2007).

6.3.1.2 Tensão nominal

É o valor eficaz da tensão para a qual o transformador foi projetado segundo perdas e rendimento especificado.

Em geral, os transformadores são dotados de derivações ou tapes, utilizados quase sempre para elevar a tensão de saída do secundário, devido a uma tensão de fornecimento abaixo do valor requerido.

O tape de maior valor define a tensão nominal primária do transformador, isto é, a tensão para a qual foi projetado. Normalmente, o número máximo de derivações fica limitado a três, variando de 3,0 a 9,6% da tensão nominal especificada para o equipamento. Como exemplo, citando um transformador de tensão nominal de 13800 V, os tapes disponíveis são de 12600, 13200 e 13800 V.

É importante lembrar que é constante o produto da tensão e da corrente no primário e no secundário. Considerar, por exemplo, um transformador de 225 kVA, tensão nominal de 13800/380 V, operando numa rede com tensão nominal primária de mesmo valor. Por motivo de abaixamento da tensão de fornecimento, o transformador foi religado no tape de 12600 V, logo a corrente será aumentada da seguinte maneira:

- $V_{t1} \cdot I_{t1} = V_{t2} \cdot I_{t2}$;
- V_{t1} = tensão no primário no tape 1;
- V_{t2} = tensão no primário no tape 2;
- I_{t1} = corrente no tape 1;
- I_{t2} = corrente no tape 2.

$$13800 \cdot I_{t1} = 12600 \cdot I_{t2}$$

$$I_{t1} = \frac{225}{\sqrt{3} \cdot 13,80} = 9,4 \text{ A}$$

$$13800 \cdot 9,4 = 12600 \cdot I_{t2} \Rightarrow I_{t2} = 10,29 \text{ A}$$

Se a tensão de fornecimento fosse de 12400 V, a tensão secundária assumiria o valor de:

$$V_s = \frac{12400}{12600} \cdot 380 = 374 \text{ V}$$

6.3.1.3 Tensão nominal de curto-circuito

É medida curto-circuitando-se os terminais secundários do transformador e alimentando-o no primário com uma tensão que faça circular nesse enrolamento a corrente nominal. O valor percentual dessa tensão em relação à nominal é numericamente igual ao valor da impedância em percentagem, ou seja:

$$Z_{pt} = \frac{V_{nccp}}{V_{npt}} \cdot 100(\%)$$

em que:

- Z_{pt} = tensão nominal de curto-circuito, em % ou impedância percentual;
- V_{nccp} = tensão nominal de curto-circuito aplicada aos terminais do enrolamento primário, em V;
- V_{npt} = tensão nominal primária do transformador, em V.

Caso se deseje conhecer a impedância do transformador em valor ôhmico, pode-se usar a seguinte equação:

$$Z = \frac{10 \cdot Z_{pt} \cdot V_{np}^2}{P_{nt}} \Omega$$

em que:

- P_{nt} = potência nominal do transformador, em kVA;
- V_{nt} = tensão nominal primária do transformador, em kV.

Uma impedância percentual de 5,5% corresponde a um transformador de 1000 kVA – 13800/380 V e tem como impedância ôhmica o valor de:

$$Z_{\Omega t} = \frac{10 \cdot 5,5 \cdot 13,80^2}{1000} = 10,4 (\Omega)$$

6.3.1.4 Componentes percentuais da tensão nominal de curto-circuito

São determinadas a partir da composição vetorial dos componentes de tensão resistiva e reativa. O componente de tensão resistiva percentual ou resistência percentual é o componente ativo da tensão percentual, cujo valor é dado pela seguinte equação:

$$R_{pt} = \frac{P_{cu}}{10 \cdot P_{nt}} (\%)$$

em que:

- P_{cu} = perdas ôhmicas de curto-circuito, ou simplesmente perdas no cobre, em W (Tabela 20);
- P_{nt} = potência nominal do transformador, em kVA.

Conhecido o valor da tensão percentual de curto-circuito do transformador, fornecido pelo fabricante, aplica-se a seguinte equação para se obter o valor da tensão reativa percentual:

$$X_{pt} = \sqrt{Z_{pt}^2 - R_{pt}^2}$$

em que:

- Z_{pt} = impedância percentual de placa do transformador.

Exemplo: considerar um transformador de 225 kVA, 13800 – 380/220 V do qual se deseja saber os valores percentuais das quedas de tensão resistiva e reativa.

$$R_{pt} = \frac{P_{cu}}{10P_{nt}} = \frac{2800}{10 \cdot 225} = 1,24\%$$

$$X_{pt} = \sqrt{Z_{pt}^2 - R_{pt}^2} = \sqrt{4,5^2 - 1,24^2} = 4,32\%$$

- $P_{cu} = 2800 \text{ W}$ (Tabela 20);
- $Z_{pt} = 4,5\%$ (Tabela 20).

6.3.1.5 Perdas elétricas

Os transformadores apresentam perdas elétricas pequenas quando comparadas com suas potências nominais. Mas sendo uma máquina que opera, em geral, continuamente, a energia desperdiçada pode ser relevante e, portanto, considerada nas avaliações de eficiência energética, conforme a Unidade 5.

As perdas dos transformadores referem-se a perdas no núcleo e a perdas nos enrolamentos.

6.3.1.6 Regulação

Representa a variação de tensão no secundário do transformador, desde o seu funcionamento em vazio até a operação a plena carga, considerando a tensão primária constante.

Também denominada *queda de tensão industrial*, pode ser calculada em função dos componentes ativo e reativo, da impedância percentual do transformador, do fator de potência e do fator de carga, conforme a equação a seguir:

$$R = F_c \left[R_{pt} \cos \theta + X_{pt} \sin \theta + \frac{(X_{pt} \cos \theta - R_{pt} \sin \theta)^2}{200} \right]$$

em que:

- R = regulação;
- F_c = fator de carga;
- θ = ângulo do fator de potência.

O valor da tensão no secundário do transformador, correspondente às condições de carga a que está submetido, é dado pela equação seguinte, ou seja:

$$V_{st} = V_{nst} \left(1 - \frac{R}{100} \right) (V)$$

em que:

- V_{nst} = tensão nominal do secundário, em V.

Exemplo: considerar um transformador de 225 kVA, 13800-380/220 V, operando numa instalação cujo fator de carga é 0,75. Deseja-se determinar o valor da regulação ou variação de tensão no secundário, sabendo-se que o fator de potência da carga é 0,80. Os valores de R_{pt} e X_{pt} foram calculados no exemplo anterior.

$$R = 0,75 \left[1,24 \cdot 0,80 + 4,32 \cdot 0,6 + \frac{(4,32 \cdot 0,80 - 1,24 \cdot 0,6)^2}{200} \right] \Rightarrow R = 2,71\%$$

Logo, a tensão secundária vale:

$$V_{st} = 380 \left(1 - \frac{2,71}{100} \right) = 369,7 \text{ V}$$

6.3.1.7 Rendimento

É a relação entre a potência elétrica fornecida pelo secundário do transformador e a potência elétrica absorvida pelo primário. Pode ser determinado pela seguinte equação:

$$\eta = 100 - \frac{100(P_{fe} + F_c^2 \cdot P_{cu})}{F_c P_{nt} \cos \theta + P_{fe} + F_c^2 P_{cu}}$$

Sendo que:

- P_{fe} = perdas no ferro, em kW;
- θ = ângulo do fator de potência.

Exemplo: tomando como exemplo as condições previstas nos dois exemplos anteriores, determine o rendimento do transformador de 225 kVA.

$$\eta = 100 - \frac{100(0,90 + 0,75^2 \cdot 2,80)}{0,75 \cdot 225 \cdot 0,80 + 0,90 + 0,75^2 \cdot 2,80}$$

em que:

- $\eta = 100 - 1,8 = 98,2\%$;
- $P_{fe} = 0,90 \text{ kW}$ (Tabela 20);
- $P_{cu} = 2,8 \text{ kW}$ (Tabela 20).

6.3.1.8 Líquido isolante

O líquido isolante nos transformadores tem a função de transferir o calor gerado pelas partes internas do equipamento para as paredes do tanque e dos radiadores – que são resfriadas naturalmente ou por ventilação forçada – fazendo com que o óleo volte novamente ao interior, retirando calor e passando ao exterior, num ciclo contínuo, segundo o fenômeno de convecção.

O óleo mineral para transformador deve apresentar uma alta rigidez dielétrica e excelente fluidez, além de manter as suas características naturais praticamente inalteradas perante temperaturas elevadas. Os transformadores podem conter óleo mineral do tipo parafínico ou naftênico.

O óleo mineral é inflamável e, portanto, cuidados devem ser tomados na instalação de transformadores. No caso de projetos industriais de produtos de alto risco de incêndio, usando-se transformadores a óleo, estes devem ser localizados distantes e fora de áreas de risco.

Existe, entretanto, um tipo de líquido isolante, chamado ascarel, cujas propriedades elétricas se assemelham às do óleo mineral, com a vantagem de não ser inflamável. Porém, devido ao seu alto poder de poluição, está proibida a sua utilização no território nacional.

Quando for estritamente necessária a instalação de transformadores não inflamáveis, devem ser especificados se serão transformadores a seco ou a silicone.

6.3.1.9 Especificação

O pedido de compra de um transformador deve conter, no mínimo, os seguintes elementos:

- potência nominal;
- tensão nominal primária;
- tensão nominal secundária;

- derivações desejadas (tapes);
- perdas máximas no ferro e no cobre;
- ligação dos enrolamentos;
- tensão suportável de impulso;
- impedância percentual;
- acessórios desejados (especificar).

Exemplo: transformador trifásico de 225 kVA; tensão nominal primária de 13,8 kV; tensão nominal secundária de 380/220 V, com derivações 13,8/13,2/12,6 kV, dispondo de ligação dos enrolamentos em triângulo primário e em estrela secundária com neutro acessível; impedância nominal percentual de 4,5%; frequência de 60 Hz; perdas máximas no cobre de 2800 W; perdas máximas no ferro de 900 W e tensão suportável de impulso de 95 kV.

6.3.2 Motores elétricos de corrente alternada

O motor elétrico é uma máquina que transforma energia elétrica em energia mecânica de utilização. Os motores elétricos de indução trifásicos são utilizados na maioria das aplicações industriais.

6.3.2.1 Motores trifásicos

São aqueles alimentados por um sistema trifásico a três fios em que as tensões estão defasadas de 120° elétricos. Representam a grande maioria dos motores empregados nas instalações industriais, podendo ser do tipo indução ou síncrono. A Figura 87 mostra os seus principais componentes.

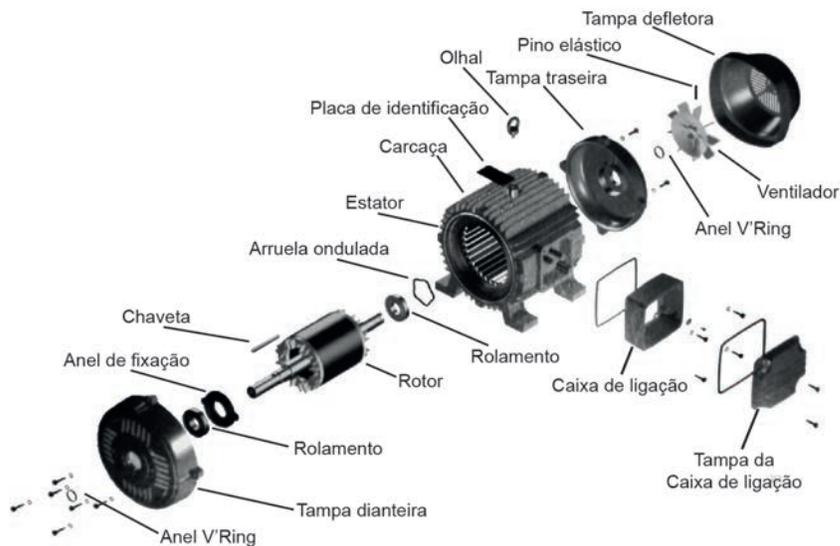


Figura 87 Motor de indução trifásico.

6.3.2.1.1 Motores de indução

São constituídos de duas partes básicas: *estator* e *rotor*. O *estator* é formado por três elementos:

- *Carcaça*: constituída de uma estrutura de construção robusta, fabricada em ferro fundido, aço ou alumínio injetado, resistente à corrosão e com superfície aletada. Tem como principal função suportar todas as partes fixas e móveis do motor.
- *Núcleo de chapas*: constituído de chapas magnéticas adequadamente fixadas ao estator.
- *Enrolamentos*: dimensionados em material condutor isolado, dispostos sobre o núcleo e ligados à rede de energia elétrica de alimentação.

O *rotor* é constituído de quatro elementos básicos:

- *Eixo*: responsável pela transmissão da potência mecânica gerada pelo motor.
- *Núcleo de chapas*: constituído de chapas magnéticas adequadamente fixadas sobre o eixo.
- *Barras e anéis de curto-circuito (motor de gaiola)*: constituídos de alumínio injetado sob pressão.
- *Enrolamentos (motor com rotor bobinado)*: constituídos de material condutor e dispostos sobre o núcleo.

Demais componentes:

- *Ventilador*: responsável pela remoção do calor acumulado na carcaça.
- *Tampa defletora*: componente mecânico provido de aberturas instaladas na parte traseira do motor sobre o ventilador.
- *Terminais*: conectores metálicos que recebem os condutores de alimentação do motor.
- *Rolamentos*: componentes mecânicos sobre os quais está fixado o eixo.
- *Tampa*: componente metálico de fechamento lateral.
- *Caixa de ligação*: local onde estão fixados os terminais de ligação do motor.

As correntes rotóricas são geradas eletromagneticamente pelo estator, único elemento do motor ligado à linha de alimentação.

O comportamento de um motor elétrico de indução relativo ao rotor é comparado ao secundário de um transformador.

O rotor pode ser constituído de duas maneiras:

a) Rotor bobinado

Constituído de bobinas, cujos terminais são ligados a anéis coletores fixados ao eixo do motor e isolados deste.

São de emprego frequente nos projetos industriais, principalmente quando se necessita de controle adequado à movimentação de carga, ou se deseja acionar uma determinada carga através de reostato de partida.

Esses motores são construídos com o rotor envolvido por um conjunto de bobinas, normalmente interligadas em configuração estrela, com os terminais conectados a três anéis presos mecanicamente ao eixo do motor, porém isolados eletricamente, e ligados por meio de escovas condutoras a uma resistência trifásica provida de cursor rotativo. Assim, as resistências são colocadas em série com o circuito do enrolamento do rotor, sendo que a quantidade utilizada depende do número de estágios de partida adotado que, por sua vez, é dimensionado em função exclusivamente do valor da máxima corrente admissível para acionamento da carga.

A Figura 88 mostra esquematicamente a ligação dos anéis acoplados ao reostato de partida com a barra de curto-circuito medianamente inserida. Já a Figura 89 mostra também a ligação de um motor com reostato de partida ajustado para acionamento em três tempos.

Na Figura 89, pode-se observar que, quando é acionado o contator geral C1 ligado aos terminais 1-2-3, o motor parte sob o efeito das duas resistências inseridas em cada bobina rotórica. Após um certo período de tempo previamente ajustado, o contator C3 curto-circuita o primeiro grupo de resistência do reostato, o que equivale ao segundo estágio. Decorrido outro determinado período de tempo, o contator C2 opera mantendo em curto-circuito o último grupo de resistências do reostato, o que equivale ao terceiro estágio. Nessa condição, o motor entra em regime normal de funcionamento.

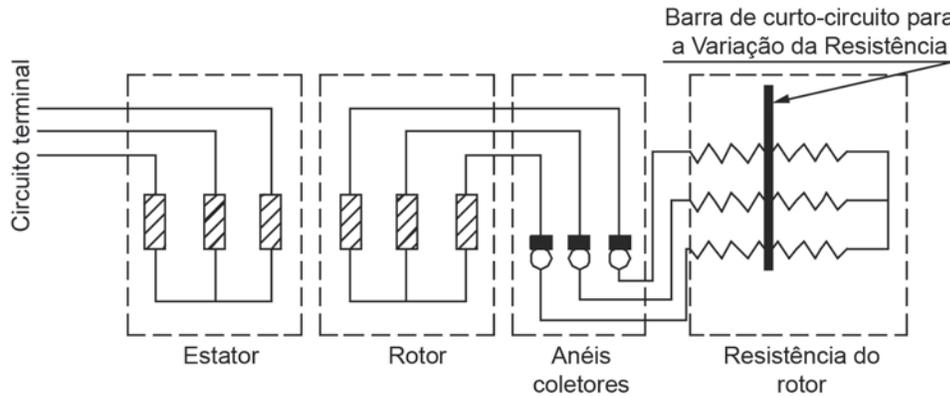


Figura 88 Motor de rotor bobinado.

Fonte: Mamede Filho (2007).

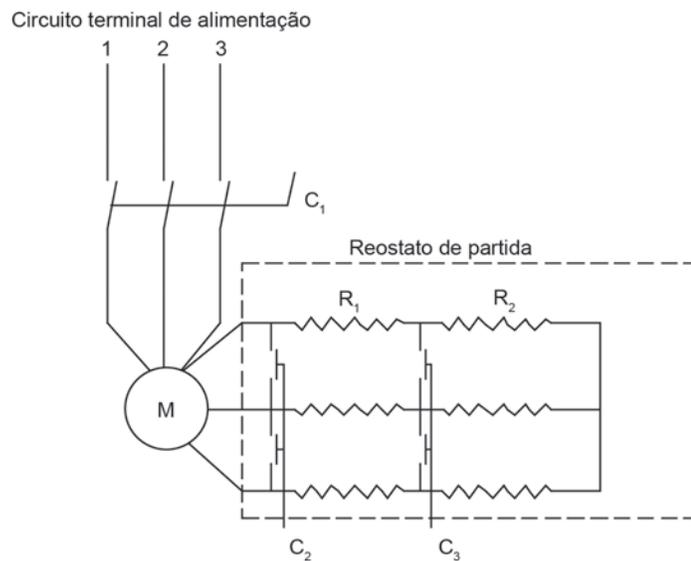


Figura 89 Reostato de partida.

Fonte: Mamede Filho (2007).

Os motores de anéis são particularmente empregados na frenagem elétrica, controlando adequadamente a movimentação de cargas verticais em baixas

velocidades. Para isso, usam um sistema combinado de frenagem sobressíncrona ou subsíncrona com inversão das fases de alimentação.

Na etapa de levantamento, o motor é acionado com a ligação normal, sendo que tanto a força necessária para vencer a carga resistente quanto a velocidade de levantamento são ajustadas pela inserção ou retirada dos resistores do circuito do rotor. Para o abaixamento da carga, basta inverter duas fases de alimentação e o motor comporta-se como gerador, em regime sobressíncrono, fornecendo energia à rede de alimentação, girando, portanto, no sentido contrário ao funcionamento anterior.

Esses motores são empregados no acionamento de guindastes, correias transportadoras, compressores a pistão etc.

b) Rotor em gaiola

Esse tipo de rotor é constituído de um conjunto de barras não isoladas através de anéis condutores curto-circuitados.

O motor de indução opera normalmente a uma velocidade constante, variando ligeiramente com a aplicação da carga mecânica no eixo.

O funcionamento de um motor de indução baseia-se no princípio da formação de campo magnético rotativo produzido no estator pela passagem da corrente alternada em suas bobinas, cujo fluxo, por efeito de sua variação, se desloca em volta do rotor, gerando neste correntes induzidas que tendem a se opor ao campo rotativo, sendo, no entanto, arrastado por ele.

O rotor em nenhuma hipótese atinge a velocidade do campo rotativo, pois, do contrário, não haveria geração de correntes induzidas, eliminando-se o fenômeno magnético rotórico, responsável pelo trabalho mecânico do rotor.

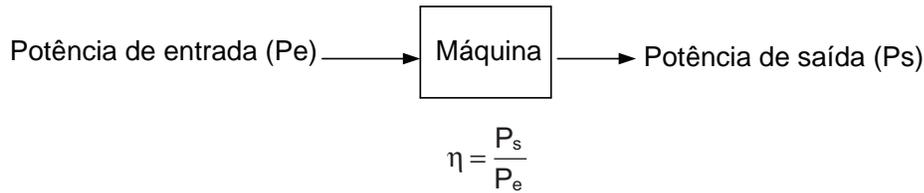
Quando o motor está girando sem a presença de carga mecânica no eixo, comumente chamado *motor a vazio*, o rotor desenvolve uma velocidade angular de valor praticamente igual à velocidade síncrona do campo girante do estator. Adicionando-se carga mecânica ao eixo rotor, diminui-se a sua velocidade. A diferença existente entre as velocidades síncronas e a do rotor é denominada *escorregamento*, em termos percentuais é dado pela seguinte equação:

$$S = \frac{W_s - W}{W_s} \cdot 100\%$$

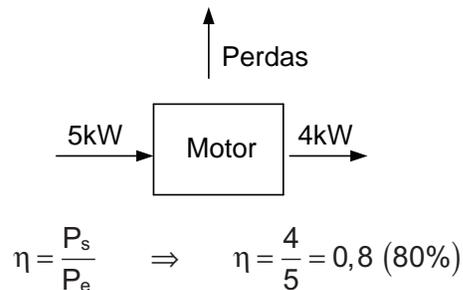
em que:

- W_s = velocidade síncrona;
- W = velocidade angular do rotor.

6.3.2.2 Rendimento de uma máquina



Exemplo: um motor consome 5 kW de potência elétrica e fornece 4 kW de potência mecânica em seu eixo. Qual o seu rendimento?



Exemplo: um motor trifásico de 5 kW (o valor que aparece na plaqueta do motor é a sua potência nominal de saída) e 380 V tem um rendimento de 0,80 e um FP = 0,85. Qual a corrente recebida pelo motor na carga nominal?

$$P_e = \frac{P_s}{\eta} = \frac{5000}{0,8} = 6250 \text{ W} = 6,25 \text{ kW}$$

$$P_e = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \cos \theta \Rightarrow I_L = \frac{P_e}{\sqrt{3} \cdot U_L \cdot \cos \theta} = \frac{6250}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,85} = 11,2 \text{ A}$$

Exemplo: na placa de identificação de um motor trifásico, estão as seguintes informações: 380 V; 60 A; $\cos \theta = 0,85$; 30 kW.

Qual é o rendimento desse motor?

$$P_e = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \cos \theta \Rightarrow P_e = 1,73 \cdot 380 \cdot 60 \cdot 0,85 \Rightarrow P_e = 33567 \text{ W ou } P_e = 33,57 \text{ kW}$$

$$\eta = \frac{P_s}{P_e} \Rightarrow \eta = 30/33,57 \Rightarrow \eta = 0,89 \text{ ou } 89\%$$

Exemplo: um motor trifásico consome 11,8 cv, tem um FP de 0,85 e é alimentado por 220 V. Calcule a corrente de linha do circuito, a potência reativa e a aparente. Considerar $\eta = 1$.

$$1 \text{ cv} = 736 \text{ W} \quad (1 \text{ hp} = 746 \text{ W})$$

$$P_e = 11,8 \text{ cv} = 8,67 \text{ W} \Rightarrow \text{Potência de entrada}$$

$$U_L = 220 \text{ V}$$

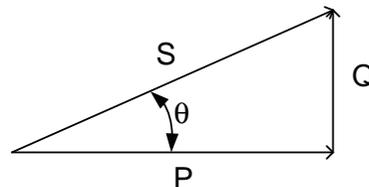
$$\cos \theta = 0,85$$

$$I_L = \frac{P_e}{\sqrt{3} \cdot U_L \cdot \cos \theta} = \frac{8670}{\sqrt{3} \cdot 220 \cdot 0,85} = 26,8 \text{ A}$$

$$S = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L = 1,73 \cdot 220 \cdot 26,8 = 10,2 \text{ kVA}$$

$$Q = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \sin \theta = 1,73 \cdot 220 \cdot 26,8 \cdot 0,527 = 5,38 \text{ kVA}_r$$

Triângulo de potências:



$$\theta = \arctan \frac{Q}{P} = 31,7^\circ$$

6.3.2.3 Motores monofásicos de indução

Os motores monofásicos são, em relação aos motores trifásicos, de menor uso em instalações industriais. São construídos normalmente para pequenas potências (até 15 cv, em geral).

Os motores monofásicos são providos de um segundo enrolamento colocado no estator e defasado de 90° elétricos do enrolamento principal, tendo a finalidade de tornar rotativo o campo estatórico monofásico. Isso é o que permite a partida do motor monofásico.

O torque de partida é produzido pelo defasamento de 90° entre as correntes do circuito principal e o circuito de partida. Para se obter essa defasagem,

liga-se ao circuito de partida um condensador, de acordo com o esquema da Figura 90 (a).

O campo rotativo assim produzido orienta o sentido de rotação do motor. A fim de que o circuito de partida não fique ligado desnecessariamente após o acionamento do motor, um dispositivo automático desliga o enrolamento de partida, passando o motor a funcionar normalmente em regime monofásico. Esse dispositivo pode ser acionado por um sistema de força centrífuga, conforme a Figura 90 (a).

A bobina que liga o circuito de partida é desenergizada pelo decréscimo do valor da corrente no circuito principal após o motor entrar em regime normal de funcionamento.

A Figura 90 (b) fornece o detalhe de ligação desse dispositivo automático.

O condensador de partida é do tipo eletrolítico e tem a característica de funcionar somente quando solicitado por tensões com polaridade estabelecida. É montado, normalmente, sobre a carcaça do estator por meio de um suporte que também tem a finalidade de protegê-lo mecanicamente.

A Tabela 21 fornece as características básicas dos motores monofásicos.

Os motores monofásicos podem ser dos tipos *indução* ou *síncrono*, cujas características básicas são idênticas às que foram estabelecidas para os motores trifásicos correspondentes.

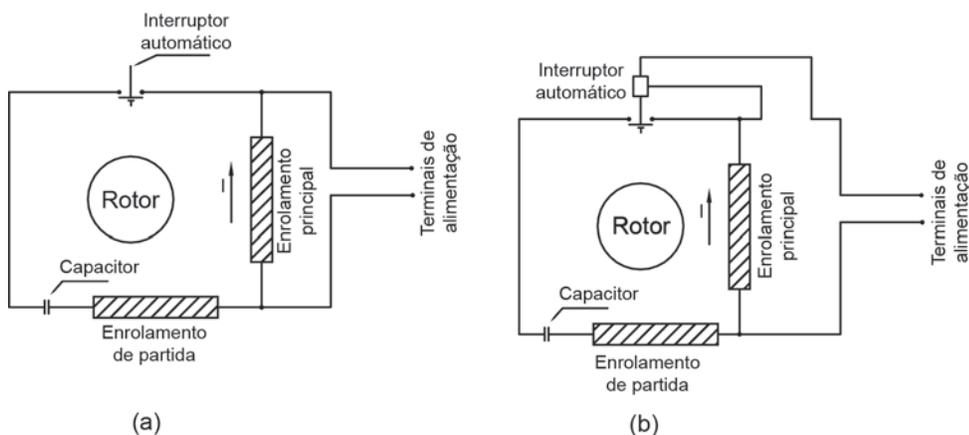


Figura 90 Interruptor automático: (a) tipo força centrífuga; (b) tipo decréscimo da corrente.
Fonte: Mamede Filho (2007).

Tabela 21 Características dos motores elétricos monofásicos.

Potência nominal		Corrente 220(V)	Velocidade	Fator de potência	Relação	Relação	Conjugado		Rendimento	Momento de inércia
							Nominal	Cm/Cn		
cv	kW	A	rpm	%	Inp/In	Cp/Cn	Kgf-m	%	%	Kg.m ²
2 polos										
1,5	1,1	7,5	3,535	75	7,8	2,9	0,31	2,3	75	0,0020
2	1,5	9,5	3,530	76	7,2	2,9	0,61	2,3	76	0,0024
3	2,2	13,0	3,460	77	7,6	3,0	0,81	2,2	77	0,0064
4	3,0	18,0	3,515	79	8,7	2,8	0,61	2,6	79	0,0093
5	3,7	23,0	3,515	81	7,9	2,8	1,00	2,6	81	0,0104
7,5	5,5	34,0	3,495	78	6,2	2,1	1,50	2,1	78	0,0210
10	7,5	42,0	3,495	82	7	2,1	2,00	2,6	82	0,0295
4 polos										
1	0,75	5,8	1,760	71	8,2	3,0	0,41	2,5	71	0,0039
1,5	1,1	7,5	1,760	75	8,7	2,8	0,61	2,9	75	0,0052
2	1,5	9,5	1,750	77	8,7	3,0	0,81	2,8	77	0,0084
3	2,2	14,0	1,755	79	8,5	3,0	1,20	2,8	79	0,0163
4	3,0	19,0	1,745	80	7,1	2,90	1,60	2,6	80	0,0183
5	3,7	25,0	1,750	81	7,5	3,0	2,00	2,6	81	0,0336
7,5	5,5	34,0	1,745	84	7,4	3,0	3,10	2,6	84	0,0378
10	7,5	46,0	1,745	85	7,6	3,0	4,10	2,5	85	0,0434

Fonte: Mamede Filho (2007).

6.3.2.4 Motores do tipo universal

São aqueles capazes de operar tanto em corrente contínua como em corrente alternada. São amplamente utilizados em aparelhos eletrodomésticos, tais como enceradeiras, liquidificadores, batedeiras etc. São constituídos de uma bobina de campo em série com a bobina da armadura, e de uma bobina de compensação, que pode estar ligada em série ou em paralelo com a bobina de campo, cuja compensação é denominada respectivamente de condutiva ou indutiva.

6.3.2.5 Motores assíncronos trifásicos com rotor em gaiola

Os motores de indução trifásicos, com rotor em gaiola, são usados na maioria das instalações industriais, principalmente em máquinas não suscetíveis a variações de velocidade.

Para obtenção de velocidade constante, devem-se usar motores síncronos normalmente construídos para potências elevadas devido a seu alto custo relativo quando fabricados em potências menores.

A seguir, serão estudadas as principais características dos motores de indução trifásicos com rotor em gaiola.

6.3.2.5.1 Potência nominal

É a potência que o motor pode fornecer no eixo, em regime contínuo, sem que os limites de temperatura dos enrolamentos sejam excedidos aos valores máximos permitidos por norma dentro de sua classe de isolamento. Sempre que são aplicadas aos motores cargas de valor muito superior ao da potência para a qual foram projetados, os seus enrolamentos sofrem um aquecimento anormal, diminuindo a vida útil da máquina e podendo danificar o isolamento até se estabelecer um curto-circuito interno que caracteriza a sua queima.

A potência desenvolvida por um motor representa a rapidez com que a energia é aplicada para mover a carga. Por definição, potência é a relação entre a energia gasta para realizar um determinado trabalho e o tempo em que ele foi executado. Isso pode ser facilmente entendido quando se considera a potência necessária para levantar um objeto pesando 50 kgf do fundo de um poço de 40 m de profundidade, durante um período de tempo de 27 s. A energia gasta foi de $50 \text{ kgf} \cdot 40 \text{ m} = 2000 \text{ kgf} \cdot \text{m}$. Como o tempo para realizar esse trabalho foi de 27 s, a potência exigida pelo motor foi de $P_{m1} = 2000/27 \text{ kgf} \cdot \text{m/s} = 74 \text{ kgf} \cdot \text{m/s}$. Se o mesmo trabalho tivesse que ser realizado em 17 s, a potência do motor teria que ser incrementada para $P_{m2} = 2000/17 \text{ kgf} \cdot \text{m/s} = 117 \text{ kgf} \cdot \text{m/s}$. Considerando que 1 cv equivale a $75 \text{ kgf} \cdot \text{m/s}$, então as potências dos motores seriam:

$$P_{m1} = \frac{74}{75} = 0,98 \approx 1 \text{ cv}$$

$$P_{m2} = \frac{117}{75} = 1,56 \approx 1.1/2 \text{ cv}$$

A potência nominal normalmente é fornecida em cv, sendo que 1 cv equivale a 0,736 kW.

A potência nominal de um motor depende da elevação de temperatura dos enrolamentos durante o ciclo de carga. Assim, um motor pode acionar uma carga com potência superior à sua potência nominal até atingir um conjugado um pouco inferior a seu conjugado máximo. Essa sobrecarga, no entanto, não pode resultar para os enrolamentos em temperaturas superiores à sua classe de temperatura. Do contrário, a vida útil do motor será sensivelmente afetada.

Quando o motor opera com cargas de regimes intermitentes, a sua potência nominal deve ser calculada levando em consideração o tipo de regime.

A Tabela 22 fornece as principais características dos motores de indução de rotor em curto-circuito. Vale ressaltar que estes são valores médios e podem variar, em faixas estreitas, para cada fabricante, dependendo de sua tecnologia e projeto construtivo.

Tabela 22 Motores assíncronos trifásicos com rotor em curto-circuito.

Potência nominal	Potência ativa	Corrente nominal		Velocidade (rpm)	Fator de potência	Relação I_{np}/I_n	Rendimento	Conjugado nominal
		220 V	380 V					
cv	kW						%	Kgf.m
				2 polos				
1	0,7	3,3	1,9	3440	0,76	6,2	0,81	0,208
3	2,2	9,2	5,3	3490	0,76	8,3	0,82	0,619
5	4	13,7	7,9	3490	0,83	9,0	0,83	1,020
7,5	5,5	19,2	11,5	3480	0,83	7,4	0,83	1,540
10	7,5	28,6	16,2	3475	0,85	6,7	0,83	2,050
15	11	40,7	23,5	3500	0,82	7,0	0,83	3,070
20	15	64,0	35,5	3540	0,73	6,8	0,83	3,970
25	18,5	69,0	38,3	3540	0,82	6,8	0,86	4,960
30	22	73,0	40,5	3535	0,88	6,3	0,89	5,960
40	30	98,0	54,4	3525	0,89	6,8	0,90	7,970
50	37	120,0	66,6	3540	0,89	6,8	0,91	9,920
60	45	146	81,0	3545	0,89	6,5	0,91	11,880
75	55	178	98,8	3550	0,89	6,9	0,92	14,840
100	75	240,0	133,2	3560	0,90	6,8	0,93	19,720
125	90	284,0	158,7	3570	0,90	6,5	0,93	24,590
150	110	344,0	190,9	3575	0,90	6,8	0,93	29,460
				4 polos				
1	0,7	3,8	2,2	1715	0,65	5,7	0,81	0,420
3	2,2	9,5	5,5	1720	0,73	6,6	0,82	1,230
5	4	13,7	7,9	1720	0,83	7,0	0,83	2,070
7,5	5,5	20,6	11,9	1735	0,81	7,0	0,84	3,100
10	7,5	26,6	15,4	1740	0,85	6,6	0,86	4,110
15	11	45,0	26,0	1760	0,75	7,8	0,86	6,120
20	15	52,0	28,8	1760	0,86	6,8	0,88	7,980
25	18,5	64,0	35,5	1760	0,84	6,7	0,90	9,970
30	22	78,0	43,3	1760	0,83	6,8	0,90	11,970
40	30	102,0	56,6	1760	0,85	6,7	0,91	15,960
50	37	124,0	68,8	1760	0,86	6,4	0,92	19,950
60	45	150,0	83,3	1765	0,86	6,7	0,92	23,870
75	55	182,0	101,1	1770	0,86	6,8	0,92	29,750
100	75	244,0	135,4	1770	0,87	6,7	0,92	39,670
125	90	290,0	160,9	1780	0,87	6,5	0,94	49,310

Tabela 22 Continuação...

Potência nominal	Potência ativa	Corrente nominal		Velocidade (rpm)	Fator de potência	Relação I_{np}/I_n	Rendimento	Conjugado nominal
cv	kW	220 V	380 V				%	Kgf.m
				4 polos				
150	110	350,0	194,2	1780	0,87	6,8	0,95	59,170
180	132	420,0	233,1	1785	0,87	6,5	0,95	70,810
200	150	470,0	271,2	1785	0,87	6,9	0,95	80,000
220	160	510,0	283,0	1785	0,87	6,5	0,95	86,550
250	185	590,0	327,4	1785	0,87	6,8	0,95	95,350
300	220	694,0	385,2	1785	0,88	6,8	0,96	118,020
380	280	864,0	479,5	1785	0,89	6,9	0,96	149,090
475	355	1100,0	610,5	1788	0,89	7,6	0,96	186,550
600	450	1384,0	768,1	1790	0,89	7,8	0,96	265,370

Fonte: Mamede Filho (2007).

Como informação adicional, a seguir são dadas as expressões que permitem determinar a potência de um motor para as atividades de maior uso industrial:

a) *Bombas*

$$P_b = \frac{9,8 \cdot Q \cdot \gamma \cdot H}{\eta}$$

em que:

- P_b = potência requerida pela bomba, em kW;
- Q = quantidade do líquido, em m^3/s ;
- γ = peso específico do líquido, em kg/dm^3 ; 1 kg/dm^3 para a água;
- H = altura manométrica e perdas nas tubulações, em m;
- η = eficiência da bomba;
- $0,87 \leq \eta \leq 0,90$ = para bombas a pistão;
- $0,40 \leq \eta \leq 0,70$ = para bombas centrífugas.

Exemplo de aplicação: calcule a potência nominal de um motor que será acoplado a uma bomba centrífuga cuja vazão é de $0,50 m^3/s$. A altura de recalque mais a de elevação é de 15 m e destina-se à captação de água potável.

$$P_m = \frac{9,8 \cdot 0,5 \cdot 1 \cdot 15}{0,70} = 105,0 \text{ kW} \Rightarrow P_m = 150 \text{ cv}$$

b) *Elevadores de carga*

$$P_e = \frac{C \cdot V}{102 \cdot \eta} (\text{kW})$$

em que:

- P_e = potência requerida pelo motor do guindaste, em kW;
- $\eta \approx 0,70$;
- C = carga a ser levantada, em kg;
- V = velocidade, em m/s;
- $0,50 \leq V \leq 1,50$ m/s = elevadores para pessoas;
- $0,40 \leq V \leq 0,60$ m/s = elevadores para carga.

Exemplo de aplicação: determine a potência nominal de um motor de um elevador de carga destinado a levantar uma carga máxima de 400 kg.

$$P_e = \frac{400 \cdot 0,6}{102 \cdot 0,7} = 3,36 \text{ kW} \Rightarrow P_m = 5 \text{ cv (Tabela 22)}$$

c) *Ventiladores*

$$P_v = \frac{Q \cdot P}{1000 \cdot \eta}$$

em que:

- P_v = potência requerida pelo ventilador, em kW;
- Q = vazão, em m³/s;
- P = pressão, em N/m²;
- η = rendimento;
- $0,50 \leq \eta \leq 0,80$ = para ventiladores com $P > 400$ mmHg;
- $0,35 \leq \eta \leq 0,50$ = para ventiladores com $100 \leq P \leq 400$ mmHg;
- $0,20 \leq \eta \leq 0,35$ = para ventiladores com $P < 100$ mmHg;

- Obs.: 1 mmHg = 9,81 N/m²;
- 1 N/m² = 1,02 · 10⁻³ kgf/m².

Exemplo de aplicação: qual a potência nominal de um motor para ser acoplado ao eixo de um ventilador com vazão de 2 m³/s e pressão de 200 mmHg? Sabe-se que o rendimento do ventilador é de aproximadamente 40%.

$$P_v = \frac{Q \cdot P}{1000 \cdot \eta} \Rightarrow P_v = \frac{2 \cdot 1962}{1000 \cdot 0,40} \Rightarrow P_v = 9,81 \text{ kW} \quad \text{ou} \quad P_v = 15 \text{ cv}$$

d) Compressores

$$P_c = \frac{2 \cdot \pi \cdot W_c \cdot C_{nc}}{1000 \cdot \eta_{ac}}$$

em que:

- P_c = potência requerida pelo compressor, em kW;
- W_c = velocidade nominal do compressor, em RPS;
- C_{nc} = conjugado nominal do compressor, em Nm;
- η_{ac} = rendimento de acoplamento: $\eta \approx 0,95$.

Exemplo de aplicação: determine a potência de um compressor sabendo-se que a redução do acoplamento é de 0,66, a velocidade do compressor é de 1150 RPM e o conjugado nominal é de 40 Nm.

- Velocidade nominal do motor:

$$W_n = \frac{W_c}{R_{ac}} = \frac{1150}{0,66} = 1742 \text{ rpm}$$

- Velocidade nominal do compressor:

$$W_c = \frac{1150}{60} = 19,16 \text{ rps}$$

- Potência nominal do motor:

$$P_c = \frac{2 \cdot \pi \cdot 19,16 \cdot 40}{1000 \cdot 0,95} = 5 \text{ kW} \Rightarrow P_m = 7,5 \text{ cv (Tabela 22)}$$

Existe uma condição operacional de motores muito utilizada em processos industriais, notadamente em esteiras rolantes, quando dois ou mais motores funcionam mecanicamente em paralelo:

- Se dois ou mais motores idênticos são acoplados por um mecanismo qualquer e trabalham mecanicamente em paralelo, dividem a carga igualmente. Para isso, é necessário que os motores tenham o mesmo escorregamento, o mesmo número de polos e a mesma potência nominal no eixo.
- Se dois ou mais motores têm o mesmo número de polos, mas diferentes potências nominais no eixo, normalmente dividem a carga na mesma proporção de suas potências de saída.

6.3.2.5.2 Tensão nominal

As tensões de maior utilização nas instalações elétricas industriais são de 220, 380 e 440 V.

A ligação do motor num determinado circuito depende das tensões nominais múltiplas para as quais foi projetado. Os motores devem trabalhar dentro de limites de desempenho satisfatório para uma variação de tensão de 610% de sua tensão nominal, desde que a frequência não varie.

6.3.2.5.3 Corrente nominal

É aquela solicitada da rede de alimentação pelo motor trabalhando à potência nominal, com a frequência e tensões nominais. O valor da corrente é dado pela equação:

$$I_{nm} = \frac{736 \cdot P_{nm}}{\sqrt{3} \cdot V \cdot \eta \cdot \cos \theta} \text{ (A)}$$

em que:

- P_{nm} = potência nominal do motor, em cv;
- V = tensão nominal trifásica, em volts;
- η = rendimento do motor;
- $\cos \theta$ = fator de potência sob carga nominal.

6.3.2.5.4 Frequência nominal

Frequência nominal é aquela fornecida pelo circuito de alimentação e para a qual o motor foi dimensionado.

O motor deve trabalhar satisfatoriamente se a frequência variar dentro de limites de $\pm 5\%$ da frequência nominal, desde que seja mantida a tensão nominal constante.

Os motores trifásicos com rotor bobinado, quando ligados numa rede de energia elétrica cuja frequência é diferente da frequência nominal, apresentam algumas particularidades.

Motor de 50 Hz ligado em 60 Hz:

- a potência mecânica não varia;
- a corrente de carga não varia;
- a corrente de partida diminui em 17%;
- a velocidade nominal aumenta em 20%, isto é, na mesma proporção do aumento da frequência;
- a relação entre o conjugado máximo e o conjugado nominal diminui em 17%;
- a relação entre o conjugado de partida e o conjugado nominal diminui em 17%.

Motor de 60 Hz ligado em 50 Hz:

- a potência aumenta em 20% para motores de 4, 6 e 8 polos;
- a corrente de carga não varia;
- a velocidade nominal diminui na mesma proporção da redução da frequência;
- a relação entre o conjugado máximo e o conjugado nominal aumenta;
- a relação entre o conjugado de partida e o conjugado nominal aumenta.

6.3.2.5.5 Fator de serviço

É um número que pode ser multiplicado pela potência nominal do motor a fim de se obter a carga permissível que ele pode acionar, em regime contínuo, dentro de condições estabelecidas por norma.

O fator de serviço não está ligado à capacidade de sobrecarga própria dos motores, valor geralmente situado entre 140 e 160% da carga nominal durante períodos curtos. Na realidade, o fator de serviço representa uma potência adicional contínua.

6.3.2.5.6 Perdas ôhmicas

O motor absorve do circuito de alimentação uma determinada potência que deverá ser transmitida ao eixo para o acionamento da carga. Porém, devido a perdas internas em forma de calor gerado pelo aquecimento das bobinas dos enrolamentos, entre outras, a potência mecânica de saída do eixo é sempre menor do que a potência de alimentação. Desse fenômeno nasce o conceito de rendimento, cujo valor é sempre menor que a unidade.

As perdas verificadas num motor elétrico são:

- perdas joule nas bobinas estatóricas: perdas no cobre (P_{cu});
- perdas joule nas bobinas rotóricas: perdas no cobre (P_{cu});
- perdas magnéticas estatóricas: perdas no ferro (P_{fe});
- perdas magnéticas rotóricas: perdas no ferro (P_{fe});
- perdas por ventilação (P_v);
- perdas por atrito dos mancais: perdas mecânicas (P_m).

A Figura 91 ilustra o balanço das potências e perdas elétricas envolvidas num motor elétrico.

Todo o calor formado no interior do motor deve ser dissipado para o meio exterior através da superfície externa da carcaça, auxiliada, para determinados tipos de motores, por ventiladores acoplados ao eixo.

Não se deve julgar o aquecimento interno do motor simplesmente medindo-se a temperatura da carcaça, pois isso pode fornecer resultados falsos.

Os motores trifásicos ligados a fontes trifásicas desequilibradas sofrem o efeito do componente de sequência negativa em forma de aquecimento, provocando o aumento das perdas, principalmente as perdas no cobre, e reduzindo, assim, a potência de saída disponível.

Portanto, deve-se procurar manter a tensão entre fases de alimentação dos motores elétricos o mais equilibrada possível.

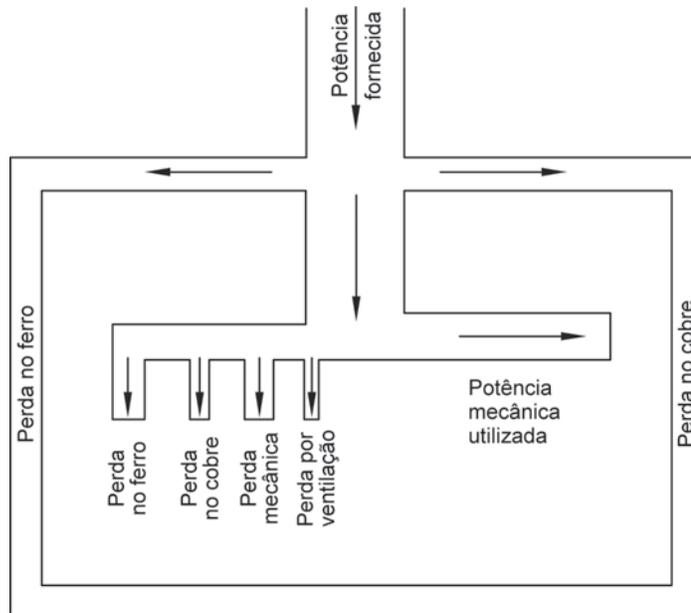


Figura 91 Perdas elétricas num motor.

Fonte: Mamede Filho (2007).

6.3.3 Iluminação

6.3.3.1 Introdução

Até o momento, foi possível notar que as unidades *volt*, *ampere* e *watt* têm um grande significado para a compreensão de vários problemas referentes à utilização da eletricidade. Encontramos igualmente na iluminação grandezas que correspondem a uma característica especial da luz e das superfícies iluminadas. Trataremos, neste momento, das grandezas luminotécnicas indispensáveis para atingir os objetivos deste estudo: *fluxo luminoso*, *rendimento luminoso* e *iluminamento*.

6.3.3.2 Fluxo luminoso

As fontes luminosas elétricas absorvem potência elétrica e fornecem potência luminosa. A potência luminosa irradiada em todas as direções por uma fonte luminosa se denomina *fluxo luminoso* (Φ), o qual é medido em lumens (lm).

Exemplos:

- uma lâmpada a vapor de mercúrio de 250 watts produz 12500 lumens;
- uma lâmpada a vapor de sódio de 250 watts produz 26000 lumens;
- uma lâmpada incandescente de 100 watts produz 1380 lumens.

6.3.3.3 Rendimento luminoso (h) ou eficiência luminosa

Na fonte luminosa, somente uma parte da potência elétrica se transforma em potência luminosa, produzindo também calor. A relação entre o fluxo luminoso irradiado e a potência elétrica consumida se chama *rendimento luminoso*.

O rendimento luminoso de uma fonte luminosa indica quantos lumens se produzem na lâmpada por cada watt de potência elétrica consumida nela (unidade = lm/W), dando, portanto, uma medida da economia de consumo de energia elétrica de uma fonte luminosa.

O rendimento luminoso depende do tipo e da potência da lâmpada.

Tabela 23 Rendimento luminoso.

Lâmpada	Consumo de potência (W)	Fluxo luminoso	Rendimento luminoso
Incandescente 100 W/220 V	100	1380	13,8
Fluorescente 65 W	78	3800	49
Vapor de mercúrio 80 W/220 V	89	3100	35
Vapor de sódio 60 W/220 V	81	5000	62

6.3.3.4 Iluminamento ou iluminância

Uma superfície iluminada vê-se clara se o fluxo luminoso incidente é grande e a superfície iluminada é pequena.

O *iluminamento* (E) é a relação entre o fluxo luminoso e a superfície iluminada. Sua unidade é o *lux*:

$$E = \frac{\phi}{A}$$

em que:

- E = iluminamento (lux);
- ϕ = fluxo luminoso (lumens);
- A = superfície iluminada.

A intensidade de iluminação se mede com o medidor de iluminação (luxímetro). Nas iluminações de interiores, distingue-se *iluminação geral* de *iluminação do plano de trabalho*.

Os exemplos abaixo dão uma ideia da ordem de grandeza:

- luz das estrelas: 0,002 lux;
- luar: 0,2 lux;
- iluminação nas ruas: 6 a 12 lux;
- luz do dia em interiores: 500 a 2000 lux;
- luz do dia em exteriores: 1000 a 10000 lux;
- luz do sol direta: 50000 a 100000 lux.

6.3.3.5 Refletância

Por meio de duas tabelas, a NBR 5413 possibilita a determinação de valores de iluminância segundo o tipo de atividade desenvolvida no ambiente, com base em três variáveis: acuidade visual do observador, velocidade e precisão requerida no trabalho e condições de refletância da tarefa.

A Tabela 24 traz valores de iluminância (mínimo, médio e máximo) para três faixas de atividades, A, B e C, cada uma subdividida em três níveis.

A Tabela 25 complementa a aplicação da Tabela 24, permitindo ao projetista o cálculo ponderado das variáveis que determinam a escolha da iluminância mínima, média ou máxima para cada caso. Para sua aplicação, primeiro atribui-se um peso (-1, 0 ou +1) a cada uma das três características que aparecem na Tabela 25 relativas ao tipo de observador (idade), à tarefa visual (velocidade e precisão exigida) e à refletância do fundo da tarefa. Feito isso, somando-se algebricamente os três valores encontrados, obtém-se o resultado. Quando este for -2 ou -3 pode-se usar a iluminância mais baixa do grupo; quando for +2 ou +3, usa-se a iluminância superior; nos demais casos, utiliza-se o valor médio.

Tabela 24 Iluminâncias para cada grupo de tarefas visuais.

Faixa	Iluminância (LUX)	Tipo de atividade	
A	20	Áreas públicas com arredores escuros.	
	30		
	50		
	Iluminação geral para áreas usadas ininterruptamente ou com tarefas visuais simples	50	Orientação simples para permanência curta.
		75	
		100	
B	100	Recintos não utilizados para trabalho contínuo (depósitos).	
	150		
	200		
	Iluminação geral para áreas de trabalho	200	Tarefas com requisitos visuais limitados (trabalho bruto de maquinaria; auditórios).
		300	
		500	
	C	500	Tarefas com requisitos visuais normais (trabalho médio de maquinaria; escritório).
		750	
		1000	
Iluminação adicional para tarefas visuais difíceis		1000	Tarefas com requisitos especiais (gravação manual; inspeção; indústria de roupas).
		1500	
		2000	
C	2000	Tarefas visuais exatas e prolongadas (eletrônica de pequeno tamanho).	
	3000		
	5000		
	Iluminação adicional para tarefas visuais difíceis	5000	Tarefas visuais muito exatas (montagem de microeletrônica).
		7500	
		10000	
C	10000	Tarefas visuais muito especiais (cirurgia).	
	15000		
	20000		

Tabela 25 Fatores determinantes da iluminação adequada.

Característica da tarefa e do observador	Peso		
	-1	0	+1
Idade em anos	< 40	40 a 65	> 65
Velocidade e precisão	Sem importância	Importante	Crítica
Refletância do fundo da tarefa	> 70%	30% a 70%	< 30%

A NBR 5413 apresenta ainda valores de iluminâncias mínimas em lux para diversos tipos de atividades.

6.3.3.6 Método dos lumens ou dos rendimentos

O método é baseado na seguinte expressão conhecida:

$$E = \frac{F}{S}$$

em que:

- E = iluminamento desejado (lux);
- F = fluxo luminoso total (lumens);
- S = área a iluminar (m²).

Para uma relativa precisão no cálculo de iluminação, muitos fatores devem ser observados na fórmula teórica:

- tipo de iluminação, isto é, incandescente, fluorescente ou outras; e, além disso, se direta, indireta etc.;
- reflexões das paredes e do teto;
- depreciação do fluxo luminoso com o tempo;
- dimensões relativas entre comprimento, largura e altura do ambiente;
- períodos de limpeza do ambiente e dos aparelhos de iluminação.

6.3.3.6.1 Coeficiente de utilização ou índice de forma

Para correção da forma teórica, define-se o coeficiente de utilização como uma função dos parâmetros notáveis:

$$\eta_u = f(\text{dimensões, reflexões, depreciação do fluxo com o tempo}).$$

As dimensões do local e sua relação com a altura do plano de trabalho (0,75 m do piso) podem ser definidas por parâmetro próprio do local, denominado índice do local ou índice de forma.

As reflexões do teto e das paredes também podem ser definidas, conhecendo o tipo de pintura ou o material de revestimento, posição, tipo e número de janelas, portas etc.

Logo: $\eta_u = f(k, \text{parâmetros conhecidos})$.

Sendo: k = índice do local, que é função das dimensões.

As expressões utilizadas para a estimativa do índice do local são, para qualquer tipo de luminária:

$$k = \frac{cl}{h(c+l)}$$

em que:

- c = comprimento do ambiente (maior dimensão);
- l = largura do ambiente (menor dimensão);
- h = distância, na vertical, das luminárias ao plano de trabalho.

6.3.3.6.1.1 Expressão geral (tabelas)

De maneira geral, podemos dizer que o fluxo é fornecido por:

$$F = \frac{ESd}{\eta_u}$$

Sendo d = depreciação.

A depreciação d , devido à limpeza do ambiente, pode ser estimada de acordo com o tempo de manutenção, segundo a Tabela 26.

Tabela 26 Fator de depreciação d .

Período de manutenção em horas			
Tipo de ambiente	2500	5000	7500
Limpo	1,05	1,10	1,15
Normal	1,10	1,20	1,25
Sujo	1,25	1,50	1,75

6.3.3.6.2 Tabelas para a determinação do coeficiente de utilização

A pedido, os fabricantes fornecem o fator de utilização de suas luminárias. Como exemplo, na Tabela 27 está o fator de utilização da luminária Philips TBS 912 com duas lâmpadas fluorescentes de 32 W.

Tabela 27 Fator de utilização (η_u).

K	80		70				50		30		0
	50	50	50	50	50	30	30	10	30	10	0
	30	10	30	20	10	10	10	10	10	10	0
0,60	0,34	0,32	0,34	0,33	0,32	0,28	0,27	0,25	0,27	0,25	0,23
0,80	0,41	0,39	0,41	0,40	0,38	0,34	0,34	0,31	0,33	0,31	0,30
1,00	0,45	0,42	0,45	0,43	0,42	0,38	0,38	0,35	0,37	0,35	0,34
1,25	0,50	0,46	0,49	0,48	0,46	0,43	0,42	0,40	0,41	0,39	0,42
1,50	0,54	0,49	0,52	0,51	0,49	0,46	0,45	0,42	0,44	0,43	0,42
2,00	0,59	0,51	0,58	0,55	0,53	0,50	0,49	0,48	0,49	0,47	0,46
2,50	0,63	0,55	0,61	0,58	0,55	0,53	0,53	0,51	0,51	0,50	0,49
3,00	0,65	0,57	0,63	0,60	0,56	0,55	0,54	0,52	0,53	0,52	0,50
4,00	0,68	0,59	0,66	0,62	0,58	0,57	0,56	0,55	0,55	0,54	0,52
5,00	0,69	0,60	0,67	0,63	0,59	0,58	0,57	0,56	0,56	0,55	0,53

Nas tabelas do fator de utilização, os números 751, 731, 711 etc. representam os índices de reflexão de tetos, paredes e pisos, nessa ordem. Assim, 751, por exemplo, seria, na realidade, 70% de reflexão do teto, 50% de reflexão de paredes e 10% de reflexão do piso.

6.3.3.6.3 Exemplo de aplicação

Deseja-se iluminar um escritório de 20 metros de comprimento por 10 metros de largura e 3,2 metros de pé direito.

Sabe-se que o teto é branco e as paredes, na maior parte, brancas, com vidros a meia altura em uma delas, e o piso é de madeira clara. A altura do plano de trabalho é de 0,80 m.

Deve-se utilizar lâmpadas fluorescentes, luminária Philips TBS 912, duas lâmpadas de 32 W por luminária, com os fatores de utilização apresentados na Tabela 27.

O ambiente é normal, com manutenção a cada 2500 horas (aproximadamente um ano).

Solução: adota-se o iluminamento do local em 500 lux.

O índice do local será:

$$K = \frac{cl}{h(c+1)} = \frac{20 \cdot 10}{2,4(20+10)} \cong 2,78$$

Pela Tabela 26, a depreciação para 2500 horas e ambiente normal será:

$$d = 1,10$$

Pela Tabela 27, considerando teto 70%, parede 30% e piso 10%, obtém-se:

$$\eta_u = 0,53$$

Logo, o fluxo total será:

$$F = \frac{500 \cdot 20 \cdot 10 \cdot 1,1}{0,53} = 207.547 \text{ lumens}$$

Luminárias fluorescentes com duas lâmpadas de 32 W:

- $2 \cdot 2700 \text{ lm/lâmpada} = 5400 \text{ lm/luminária}$.
- Quantidade de luminárias = $207547/5400 = 38,4$ luminárias. ~ 40 luminárias

6.3.3.6.4 Critério de espaçamento mínimo

Para que a área a ser iluminada tenha distribuição uniforme do fluxo total calculado, é preciso respeitar uma distância máxima entre luminárias fornecida pela expressão:

$$e_L \leq 1,5 h$$

Sendo:

- e_L = distância entre luminárias;
- h = altura da luminária em relação ao plano de trabalho.

A distância *máxima* entre luminárias e paredes será:

$$e_{LP} \leq 0,75 h$$

Sendo e_{LP} a distância entre as luminárias e as paredes.

$$e_L = 3,6 m$$

$$e_{LP} = 1,8 m$$

A planta seguinte, Figura 92, mostra a posição das luminárias.

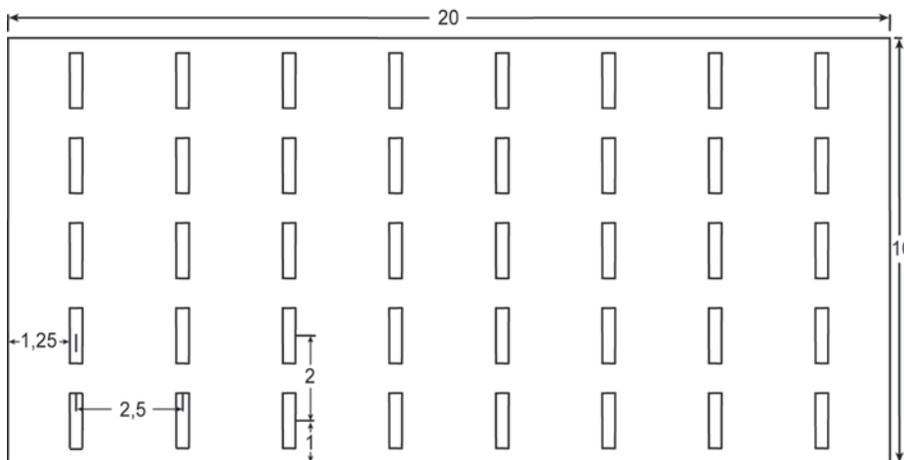


Figura 92 Posicionamento das luminárias (dimensões em metros e sem escala).

6.4 Considerações finais

Nesta unidade, conhecemos os transformadores e os principais tipos de motores de aplicação em uma planta industrial. As noções de luminotécnica foram necessárias para o correto dimensionamento da quantidade de lâmpadas utilizadas em um ambiente interno.

6.5 Exercícios

1. Um transformador com núcleo de ferro funcionando numa linha de 120 V possui 500 espiras no primário e 100 espiras no secundário.
Calcule a tensão no secundário.
2. Um transformador para campainha com 240 espiras no primário e 30 espiras no secundário retira 0,3 A de uma linha de 120 V.

Calcule a corrente no secundário.

3. Calcule a saída, em kW, de um transformador de 5 kVA e 2400/120 V que alimenta a carga nominal com os seguintes fatores de potência:
 - a) 100%;
 - b) 80%;
 - c) 40%.
4. Um transformador monofásico tem 800 espiras primárias e 60 espiras secundárias. A porção secundária foi conectada a uma resistência de carga de 15Ω .

Determine o valor da tensão primária necessária para produzir uma potência de 22,5 W na carga (presuma que o transformador é livre de perdas).

5. Um transformador monofásico de 10 kVA e 7200/120 V tem uma resistência no enrolamento do primário de 12Ω e no enrolamento do secundário de $0,0033 \Omega$.

Calcule a perda no cobre:

- a) com carga máxima;
 - b) com meia carga (5 kVA);
 - c) com uma carga de 2 kVA.
6. Um teste de curto-circuito para avaliação das perdas no cobre com carga máxima resulta em uma leitura de 175 W no wattímetro. O transformador submetido ao teste é um transformador abaixador de 240/24 V que tem uma especificação para a corrente do secundário com carga máxima de 60 A.

Se a resistência do primário for de $0,7 \Omega$, qual será a resistência do secundário?

7. A tensão da linha do secundário de um transformador D-D é de 405 V, e a corrente da linha do secundário é de 35 A.

O transformador tem uma relação de espiras de 5:1. Calcule:

- a) a tensão de linha do primário;
- b) a corrente de fase ou de enrolamento do secundário;
- c) a corrente de linha do primário;
- d) a corrente de fase ou do enrolamento do primário.

8. Um sistema trifásico fornece 34,2 A a uma tensão de linha de 208 V para uma carga equilibrada com 89% de fator de potência.

Calcule a especificação do transformador em kVA.

9. Um motor trifásico de 6 HP ligado em D funciona com um fator de potência de 0,85 com uma eficiência de 80%. Se a tensão da linha for de 220 V, qual será a corrente de linha?
10. Qual é a corrente nominal secundária de um transformador trifásico com potência nominal de 112,5 kVA trabalhando na tensão de 220 V?
11. Calcule a potência nominal de um motor que será acoplado a uma bomba centrífuga com rendimento de 70% e vazão de 1 m³/s. A altura manométrica e as perdas nas tubulações é de 10 m e destina-se à captação de água potável.
12. Determine a potência nominal de um motor de um elevador com capacidade para cinco pessoas (~350 kg) e velocidade nominal de elevação de 1,0 m/s.
13. Um motor elétrico está acoplado a um compressor de ar comprimido através de um redutor de velocidade na relação de 1:2, ou seja, a velocidade do compressor é de 875 RPM e a do motor 1750 RPM.
- Qual é a potência necessária do motor para acionar o compressor, sabendo-se que seu conjugado nominal é de 20 N.m?
14. Sabe-se que um motor de 40 cv e 4 polos está trabalhando em sua potência nominal na tensão de 380 V.
- Qual é a corrente solicitada da rede de alimentação se nessas condições o fator de potência é de 85% e o rendimento de 91%?
15. Dimensione a quantidade de luminárias fluorescentes 2 x 32 W em uma sala de aula com largura de 8 m, comprimento de 10 m e pé direito de 4 m. Considere as mesmas condições do exemplo e iluminação do local de 300 lux.

6.5.1 Respostas dos exercícios

1. $V_2 = 24 \text{ V}$.
2. $I_2 = 2,4 \text{ A}$.
3. a) $P_1 = 5 \text{ kW}$;
b) $P_2 = 4 \text{ kW}$;
c) $P_3 = 2 \text{ kW}$.

4. $U_p = 244,9 \text{ V}$.
5. a) $P_{\text{CU}} = 46,07 \text{ W}$;
b) $P_{\text{CU}} = 11,51 \text{ W}$;
c) $P_{\text{CU}} = 1,85 \text{ W}$.
6. $R_s = 0,042 \ \Omega$.
7. a) $U_1 = 2025 \text{ V}$;
b) $I_F = 20,21 \text{ A}$;
c) $I_1 = 7 \text{ A}$;
d) $I_F = 4,05 \text{ A}$.
8. $S = 12,32 \text{ kVA}$.
9. $I_L = 17,3 \text{ A}$.
10. $I_L = 295,2 \text{ A}$.
11. $P_m = 140 \text{ kW}$ ou 200 cv .
12. $P_m = 4,9 \text{ kW}$ ou $7,5 \text{ cv}$.
13. $P_m = 1,93 \text{ kW}$ ou 3 cv .
14. $I_{\text{nm}} = 57,83 \text{ A}$.
15. 12 luminárias.

6.6 Estudos complementares

6.6.1 Saiba mais

Como complemento do estudo de transformadores de energia, recomendamos estudar o capítulo 16 do livro:

GUSSOW, Milton. *Eletricidade básica*. São Paulo: Makron Books do Brasil, 1997.

Sobre motores elétricos, recomenda-se estudar o capítulo 6 do livro:

MAMEDE FILHO, João. *Instalações elétricas industriais*. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

Sobre luminotécnica:

GUERRINI, Délio Pereira. *Iluminação: teoria e projeto*. São Paulo: Érica, 2007.

6.6.2 Outras referências

<<http://pt.wikipedia.org/wiki/transformador>>

<http://pt.wikipedia.org/wiki/motor_el%C3%A9trico>

<<http://pt.wikipedia.org/wiki/luminot%C3%A9cnica>>

<http://pt.wikipedia.org/wiki/l%C3%A2mpada_fluorescente>

REFERÊNCIAS

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). *NBR 5410: instalações elétricas de baixa-tensão*. Rio de Janeiro, 2004.

ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). *Resolução nº 414, de 09 de setembro de 2010*. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2010414.pdf>>. Acesso em: 21 maio 2013a.

_____. *Resolução nº 505, de 26 de novembro de 2001*. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/res2001505.pdf>>. Acesso em: 21 maio 2013b.

CATÁLOGO Siemens. *Aplicação dos equipamentos nas instalações elétricas industriais e prediais em baixa-tensão*. 1999.

MAMEDE FILHO, João. *Instalações elétricas industriais*. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

ZANIN, Maria; SHIMBO, Ioshiaqui. *Eletricidade aplicada à engenharia*. São Carlos: EdUFSCar, 2008. (Série Apontamentos).

Referências consultadas

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). *NBR 5413: iluminância de interiores*. Rio de Janeiro, 1992.

_____. *NBR NM-280: condutores de cabos isolados (IEC 60228, MOD)*. Rio de Janeiro, 2002.

CAPELLI, Alexandre. *Energia elétrica para sistemas automáticos da produção*. São Paulo: Érica, 2007. 320 p.

CREDER, Hélio. *Instalações elétricas*. 15. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

GUERRINI, Délio Pereira. *Iluminação: teoria e projeto*. São Paulo: Érica, 2007.

GUSSOW, Milton. *Eletricidade básica*. São Paulo: Makron Books do Brasil, 1997.

PIRELLI. *Manual Pirelli de instalações elétricas*. São Paulo: Pini, 2003.

SOBRE O AUTOR

Antonio F. Comin

Formou-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU), em 1982. Trabalhou durante 15 anos em indústrias do setor privado, 4 deles em uma fábrica de leite em pó da Nestlé, no cargo de chefe eletromecânico. Desde 1998, trabalha na Prefeitura dos campi da UFSCar, atuando na ampliação da área física, com funções de desenvolvimento de projetos elétricos, fiscalização de obras e manutenção de instalações elétricas. Trabalha também, desde agosto de 2006, como professor dos cursos técnicos de Eletrônica, Eletrotécnica e Mecatrônica do Centro Paula Souza, em São Carlos. Atua no desenvolvimento de projetos de instalações elétricas residenciais, comerciais e industriais.

