

Habilitação técnica em Elettrônica



3

Máquinas e Instalações Elétricas

CENTRO PAULA SOUZA

GOVERNO DE
SÃO PAULO

CENTRO PAULA SOUZA DO GOVERNO DE SÃO PAULO



Eletrônica

Volume 3

Eletrônica

Máquinas e instalações elétricas

Giuseppe Giovanni Massimo Gozzi

Tera Miho Shiozaki Parede

(autores)

Edson Horta

(coautor)



2011



Presidência
João Sayad

Vice-presidência
Ronaldo Bianchi, Fernando Vieira de Mello

DIRETORIA DE PROJETOS EDUCACIONAIS

Direção: Fernando José de Almeida

Gerência: Monica Gardelli Franco, Júlio Moreno

Coordenação Técnica: Maria Luiza Guedes

Equipe de autoria Centro Paula Souza

Coordenação geral: Ivone Marchi Lainetti Ramos

Coordenação da série Eletrônica: Jun Suzuki

Autores: Giuseppe Giovanni Massimo Gozzi, Tera Miho Shiozaki Parede

Coautor: Edson Horta

Revisão técnica: Jitsunori Tsuha

Equipe de Edição

Coordenação geral: Carlos Tabosa Seabra,
Rogério Eduardo Alves

Coordenação editorial: Luiz Marin

Edição de texto: Roberto Matajs

Secretário editorial: Antonio Mello

Revisão: Conexão Editorial

Direção de arte: Bbox Design

Diagramação: LCT Tecnologia

Ilustrações: Carlos Grillo e Carlos Campoy

Pesquisa iconográfica: Completo Iconografia

Capa

Fotografia: Eduardo Pozella, Carlos Piratininga

Tratamento de imagens: Sidnei Testa

Abertura capítulos: © Lize Streeter/Dorling Kindersley/
Getty Images

O Projeto Manual Técnico Centro Paula Souza – Coleção Técnica Interativa oferece aos alunos da instituição conteúdo relevante à formação técnica, à educação e à cultura nacional, sendo também sua finalidade a preservação e a divulgação desse conteúdo, respeitados os direitos de terceiros.

O material apresentado é de autoria de professores do Centro Paula Souza e resulta de experiência na docência e da pesquisa em fontes como livros, artigos, jornais, internet, bancos de dados, entre outras, com a devida autorização dos detentores dos direitos desses materiais ou contando com a permissibilidade legal, apresentando, sempre que possível, a indicação da autoria/crédito e/ou reserva de direitos de cada um deles.

Todas as obras e imagens expostas nesse trabalho são protegidas pela legislação brasileira e não podem ser reproduzidas ou utilizadas por terceiros, por qualquer meio ou processo, sem expressa autorização de seus titulares.

Agradecemos as pessoas retratadas ou que tiveram trechos de obras reproduzidas neste trabalho, bem como a seus herdeiros e representantes legais, pela colaboração e compreensão da finalidade desse projeto, contribuindo para que essa iniciativa se tornasse realidade. Adicionalmente, colocamo-nos à disposição e solicitamos a comunicação, para a devida correção, de quaisquer equívocos nessa área porventura cometidos em livros desse projeto.

O Projeto Manual Técnico Centro Paula Souza – Coleção Técnica Interativa, uma iniciativa do Governo do Estado de São Paulo, resulta de um esforço colaborativo que envolve diversas frentes de trabalho coordenadas pelo Centro Paula Souza e é editado pela Fundação Padre Anchieta. A responsabilidade pelos conteúdos de cada um dos trabalhos/textos inseridos nesse projeto é exclusiva do autor. Respeitam-se assim os diferentes enfoques, pontos de vista e ideologias, bem como o conhecimento técnico de cada colaborador, de forma que o conteúdo exposto pode não refletir as posições do Centro Paula Souza e da Fundação Padre Anchieta.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Bibliotecária Silvia Marques CRB 8/7377)

D536

Gozzi, Giuseppe G. M.

Eletrônica: máquinas e instalações elétricas / Giuseppe Giovanni Massimo Gozzi, Tera Miho Shiozaki Parede (autores); Edson Horta (coautor); Jitsunori Tsuha (revisor); Jun Suzuki (coordenador). – São Paulo: Fundação Padre Anchieta, 2011 (Coleção Técnica Interativa. Série Eletrônica, v. 3)

Manual técnico Centro Paula Souza

ISBN 978-85-8028-047-0

I. Eletrônica -- máquinas 2. Instalações elétricas -- máquinas I. Parede, Tera Miho Shiozaki II. Horta, Edson III. Tsuha, Jitsunori IV. Suzuki, Jun V. Título

CDD 607



GOVERNADOR
Geraldo Alckmin

VICE-GOVERNADOR
Guilherme Afif Domingos

**SECRETÁRIO DE DESENVOLVIMENTO
ECONÔMICO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA**
Paulo Alexandre Barbosa



Presidente do Conselho Deliberativo
Yolanda Silvestre

Diretora Superintendente
Laura Laganá

Vice-Diretor Superintendente
César Silva

Chefe de Gabinete da Superintendência
Elenice Belmonte R. de Castro

**Coordenadora da Pós-Graduação,
Extensão e Pesquisa**

Helena Gemignani Peterossi

**Coordenador do Ensino Superior
de Graduação**

Angelo Luiz Cortelazzo

Coordenador de Ensino Médio e Técnico
Almério Melquíades de Araújo

**Coordenadora de Formação Inicial e
Educação Continuada**

Clara Maria de Souza Magalhães

**Coordenador de Desenvolvimento
e Planejamento**

João Carlos Paschoal Freitas

Coordenador de Infraestrutura
Rubens Goldman

**Coordenador de Gestão Administrativa
e Financeira**

Armando Natal Maurício

Coordenador de Recursos Humanos
Elio Lourenço Bolzani

Assessora de Comunicação
Gleise Santa Clara

Procurador Jurídico Chefe
Benedito Libério Bergamo

Sumário

15 Capítulo I Eletromagnetismo

1.1 Breve histórico	16
1.1.1 Propriedades magnéticas	16
1.1.2 Carga elétrica	19
1.1.3 Campo elétrico	21
1.2 A relação entre eletricidade e magnetismo	22
1.2.1 Campo magnético dos ímãs	25
1.2.2 Campo magnético da Terra	27
1.2.3 Vetor indução magnética	29
1.2.4 Campo magnético de um condutor retilíneo	31
1.2.5 Campo magnético de uma espira circular	31
1.2.6 Campo magnético de um solenoide	32
1.2.7 Aplicações práticas do campo magnético	33
1.3 Força magnética e suas aplicações	35
1.3.1 Força magnética sobre cargas elétricas	35
1.3.2 Força magnética sobre condutor imerso em campo magnético	37
1.3.3 Força magnética entre condutores paralelos	38
1.3.4 Aplicações práticas da força magnética	39
1.4 Indução eletromagnética	45
1.4.1 Lei de Lenz	49
1.4.2 Autoindução	50
1.4.3 Aplicações práticas da indução eletromagnética	52
1.5 Circuitos magnéticos	60
1.5.1 Substâncias magnéticas	61



PHOTORESEARCHERS/PHOTORESEARCHERS/LATINSTOCK

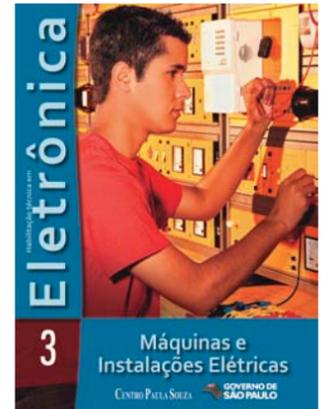


XINHUA / EYEVINE/EYEVINE NEWS/LATINSTOCK

1.5.2 Circuitos magnéticos lineares	65
1.5.3 Circuitos magnéticos não lineares	67
1.6 Transformadores	74
1.6.1 Transformador monofásico	74
1.6.2 Transformador ideal	78
1.6.3 Transformador real	83
1.6.4 Autotransformador	92
1.6.5 Princípio da transformação trifásica	93
1.7 Geração de campo elétrico pela variação do fluxo magnético	96
1.7.1 Onda eletromagnética	97
1.7.2 Espectro eletromagnético	100

107 Capítulo 2 Sistemas elétricos de potência

2.1 Segmentos do sistema elétrico de potência	112
2.1.1 Geração de energia elétrica	113
2.1.2 Subestações	114
2.1.3 Rede de transmissão de energia elétrica	115
2.1.4 Rede de distribuição de energia elétrica	116
2.1.5 Classificação das tensões elétricas	118
2.1.6 Distribuição de energia elétrica em baixa tensão	118
2.2 Eletricidade	119
2.2.1 Carga elétrica	119
2.2.2 Grandezas elétricas fundamentais	120
2.2.3 Lei básica da eletricidade. Lei de Ohm	122
2.2.4 Regimes de fornecimento de tensão	123
2.2.5 Características da tensão AC	125



Capa: Rafael Aparecido Bragante, aluno do Centro Paula Souza
Foto: Eduardo Pozella e Carlos Piratininga



ER09A / 5A-4 UTTERSTOCK

Sumário

2.2.6	Potências elétricas no regime AC monofásico	126
2.2.7	Sistema AC trifásico	127
2.3	Introdução ao projeto de instalação elétrica	129
2.3.1	Ética profissional	129
2.3.2	Responsabilidade técnica profissional	130
2.3.3	Competência profissional	130
2.3.4	Partes componentes de um projeto	130
2.3.5	Recomendações e normas técnicas	132
2.3.6	Concessionária local	133
2.3.7	Critérios para a elaboração do projeto de instalação elétrica	133
2.4	Etapas da elaboração de um projeto de instalação elétrica	133
2.4.1	Informações preliminares	133
2.4.2	Quantificação do sistema	134
2.4.3	Determinação do padrão de atendimento	134
2.4.4	Desenho das plantas	134
2.4.5	Dimensionamentos	134
2.4.6	Quadro de previsão de cargas e diagramas	135
2.4.7	Elaboração dos detalhes construtivos	135
2.4.8	Memorial descritivo	135
2.4.9	Memorial de cálculo	135
2.4.10	Elaboração das especificações técnicas	135
2.4.11	Elaboração da lista de material	135
2.4.12	ART	136
2.4.13	Análise da concessionária	136
2.4.14	Revisão do projeto	136
2.4.15	Termo técnico	136

2.5	Glossário	136
2.6	Simbologia para instalações elétricas	137
2.7	Caminhos da eletricidade nas instalações elétricas	146
2.8	Condutores: cores padronizadas	147
2.9	Diagramas esquemáticos de instalação elétrica	147
2.9.1	Circuito elétrico com interruptor e lâmpada incandescente	148
2.9.2	Dimmer	157
2.9.3	Minuteria	157
2.9.4	Tomadas	157

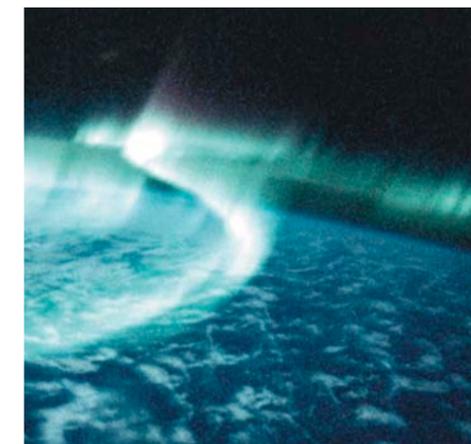
161 Capítulo 3

Projetos de instalações elétricas residenciais

3.1	Padrão de entrada	166
3.1.1	Dimensionamento do padrão de entrada	168
3.1.2	Dimensionamento dos condutores do circuito de distribuição	196
3.2	Divisão dos circuitos terminais	200
3.3	Localização dos pontos elétricos da instalação na planta baixa	202
3.4	Traçado dos eletrodutos	204
3.5	Representação da fiação	205
3.6	Dimensionamento dos condutores dos circuitos terminais	207
3.6.1	Correção da corrente calculada dos circuitos terminais	208
3.6.2	Seção dos condutores para cada um dos circuitos terminais	210



YELLOWJ /SHUTTERSTOCK



THE PRINT COLLECTION/PETER ARNOLD/OTHER IMAGES



KRIVOSHEEV VITALY /SHUTTERSTOCK



WIKIMEDIA.ORG

Sumário

3.7	Dimensionamento dos eletrodutos	214
3.8	Dimensionamento dos dispositivos de proteção	217
3.8.1	Disjuntor termomagnético	218
3.8.2	Dispositivos DR	225
3.8.3	Dispositivos de proteção contra surtos (DPS)	227
3.9	Diagrama unifilar da instalação elétrica residencial	230
3.10	Prumada elétrica	230
3.11	Especificação técnica do material	232
3.12	Lista de materiais	234
3.13	Projeto de instalação telefônica residencial	235
3.14	Projeto para TV a cabo	248
3.15	Esquemas de aterramento	249
3.15.1	Esquema TN	249
3.15.2	Esquema TT	250
3.15.3	Esquema IT	251
3.15.4	Aterramento elétrico	252
3.15.5	Aterramento elétrico residencial	253
3.15.6	Emprego do sistema de aterramento para múltiplas funções	254
3.15.7	Conexões aos eletrodos	255
3.15.8	Ligação equipotencial	255
3.16	Instalações de redes de dados em residências	255
3.17	Ferramentas computacionais	257
3.18	Ferramentas, equipamentos e materiais	258
3.19	Emendas em instalações	259



BELINDA PRETORIUS /SHUTTERSTOCK



RVINO PRODUCTIONS/SHUTTERSTOCK

261 Capítulo 4

Motores elétricos

4.1	Breve histórico	262
4.2	Motores de corrente contínua	267
4.2.1	Principais tipos de motores de corrente contínua	269
4.3	Motores de corrente alternada	277
4.4	Motores trifásicos	277
4.5	Motores assíncronos	279
4.5.1	Princípio de funcionamento	280
4.5.2	Componentes de um motor de indução	281
4.5.3	Circuito equivalente de um motor de indução	283
4.5.4	Perdas e rendimento	286
4.5.5	Curva característica de um motor de indução	287
4.6	Motores monofásicos	291
4.6.1	Motor comutador	291
4.6.2	Motor de indução	292
4.6.3	Motor síncrono	294



JAMES STEIDL/SHUTTERSTOCK

297 Capítulo 5

Dispositivos e acionamentos elétricos

5.1	Dispositivos elétricos	299
5.2	Dispositivos de manobra	299
5.3	Dispositivos de acionamento	300
5.4	Dispositivos de proteção	303
5.5	Simbologia	304



SERG64/SHUTTERSTOCK

Sumário

5.6	Comandos elétricos	305
5.6.1	Funções lógicas	306
5.6.2	Formas de atuação dos contatos	307
5.6.3	Diagramação de circuitos de comando	310
5.7	Partida de motores elétricos	310
5.7.1	Métodos de partida.	311
5.7.2	Tipos de partida: circuitos de comando e força	312
5.8	Chaves de partida de motores tipo <i>soft-starter</i>	317
5.8.1	Princípio de funcionamento	318
5.8.2	Sequência de funcionamento do <i>soft-</i> <i>starter</i>	320
5.8.3	Recursos de um <i>soft-starter</i>	323
5.8.4	Instalação de <i>soft-starters</i>	324
5.8.5	Limitações no uso de <i>soft-starters</i>	325
5.9	Inversores de frequência	325
5.9.1	Princípio de funcionamento	326
5.9.2	Partes de um inversor de frequência	326
5.9.3	Inversores escalar e vetorial.	330
5.9.4	Instalação do inversor.	330
5.9.5	Parametrização	331
5.9.6	Dimensionamento.	333

335 Apêndice A

347 Apêndice B

353 Referências bibliográficas



Capítulo I

Eletromagnetismo

1.1 Breve histórico

Antigamente, a eletricidade e o magnetismo eram tratados de maneiras separadas, pois não havia se estabelecido relação entre essas duas áreas de conhecimento. As primeiras descobertas referentes aos fenômenos elétricos foram feitas na Grécia antiga, e, com algumas exceções, eram vistas como entretenimento, e não como ciência.

Os gregos observaram que, ao atritar o âmbar (resina fossilizada de árvores, amarelada e semitransparente) com outras substâncias, como a lã, manifestava-se entre esses corpos forças de atração e de repulsão.

As informações históricas sobre o magnetismo indicam que os primeiros ímãs foram encontrados na Ásia, em um distrito da Grécia antiga chamado Magnésia, daí o termo “magnetismo”. Com base nessas primeiras observações, diversos estudiosos e cientistas passaram a propor teorias para explicar os fenômenos elétricos e magnéticos.

No início do século XIX, constatou-se que os fenômenos magnéticos são causados por cargas elétricas em movimento, e, com isso, surgiu mais uma área de estudo, denominada eletromagnetismo.

1.1.1 Propriedades magnéticas

No século XIII, o monge francês Petrus Peregrinus fez observações muito importantes a respeito dos fenômenos magnéticos:

- Ao aproximar pregos de ferro de um ímã, eles são fortemente atraídos pelas extremidades do ímã (figura 1.1).

Figura 1.1
Ímã natural.



PHOTORESEARCHERS/PHOTORESEARCHERS/LATINSTOCK

- Essas extremidades, conhecidas como polos do ímã, apresentam características contrárias, pois, aproximando dois ímãs distintos, percebe-se ora uma manifestação de força de atração, ora uma de repulsão (figura 1.2).

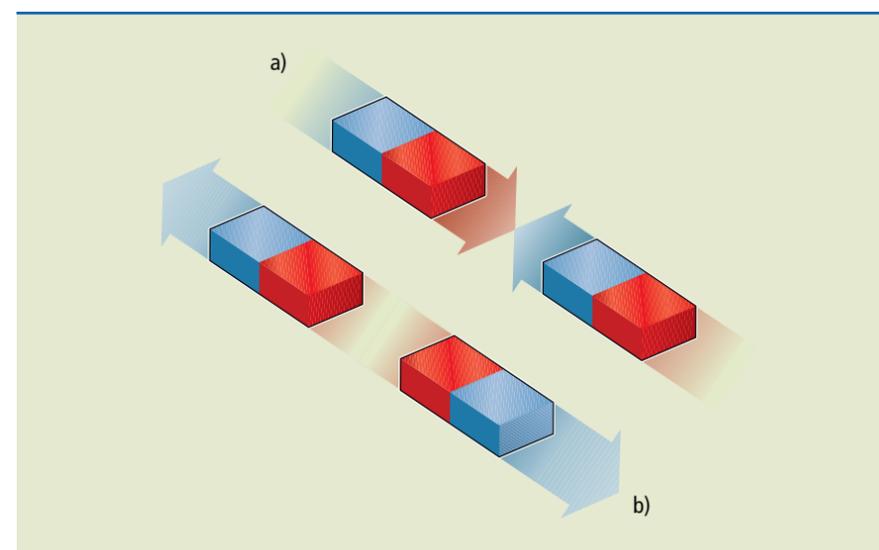


Figura 1.2

Ímãs: (a) força de atração e (b) força de repulsão.

- Ainda que um mesmo ímã seja dividido várias vezes, não é possível separar essas extremidades (figura 1.3).

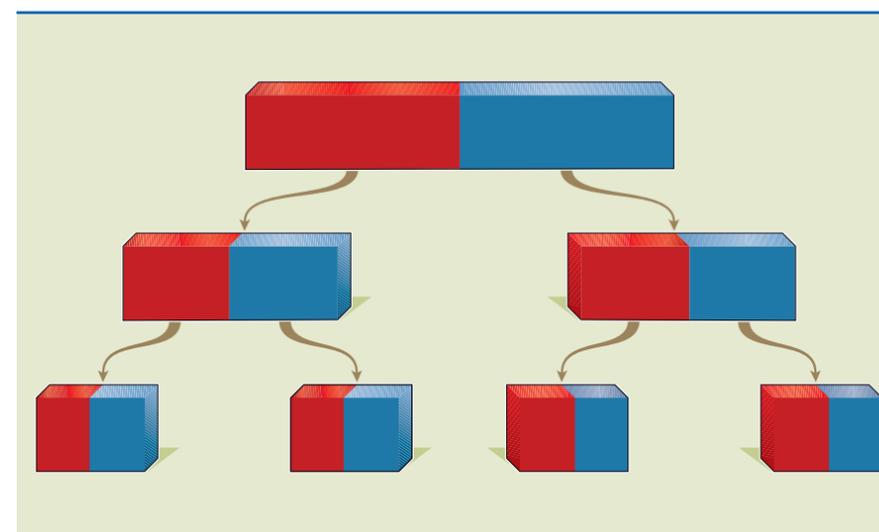


Figura 1.3

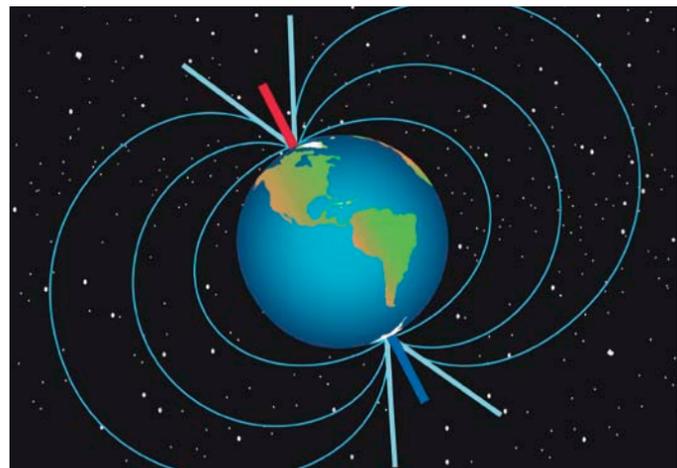
Inseparabilidade dos polos.

Tais observações foram documentadas e posteriormente observadas no século XVII pelo médico inglês William Gilbert, que realizava experiências nesse campo. Uma das inúmeras contribuições de Gilbert para os estudos do magnetismo foi a descoberta de que a temperatura influencia a magnetização dos ímãs. Ele também escreveu o livro *De magnete*, apresentando suas teorias sobre corpos magnéticos e atrações elétricas. Entre as informações encontradas nessa obra destaca-se uma de grande importância, comprovada cientificamente: o planeta Terra se comporta como um gigantesco ímã (figura 1.4).



Figura 1.4

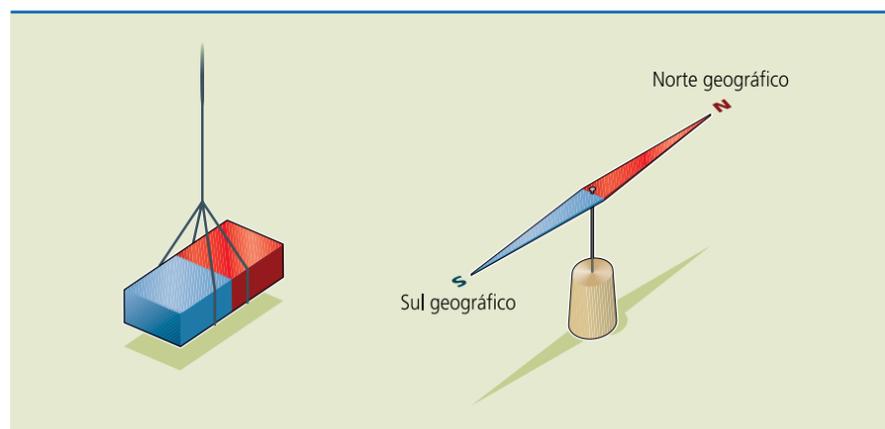
A Terra é um grande ímã.



Tal descoberta finalmente explicava um fato observado pelos chineses no século I a.C.: por que um ímã em forma de barra, suspenso pelo centro e livre de giro, sempre se orienta na direção norte-sul da Terra (figura 1.5)?

Figura 1.5

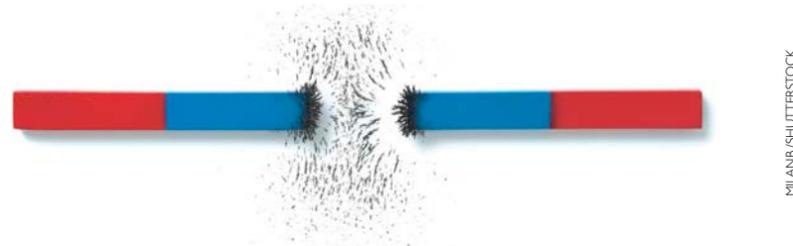
Princípio da bússola magnética.



Levando em conta que a Terra é um grande ímã, ela atrai a extremidade que aponta para o norte; o mesmo acontece com a outra extremidade, que aponta para o sul. Assim, convencionou-se chamar a extremidade do ímã que aponta para o norte geográfico da Terra de polo norte, e a outra, de polo sul (figura 1.6).

Figura 1.6

Ímãs em forma de barra.



Portanto, conclui-se que as propriedades magnéticas são:

- Todos os ímãs possuem a capacidade de atrair o ferro.
- Polos opostos se atraem; polos iguais se repelem.
- Os polos de um ímã são inseparáveis.
- Altas temperaturas podem anular o magnetismo.
- Todos os ímãs, quando suspensos e livres de giro, orientam-se na direção norte-sul.

Antes de estudarmos os fenômenos magnéticos relacionados à corrente elétrica, vamos lembrar alguns conceitos e fenômenos elétricos.

1.1.2 Carga elétrica

As primeiras descobertas referentes a fenômenos elétricos são atribuídas aos antigos gregos. O filósofo Tales de Mileto observou que um pedaço de âmbar, depois de atritado com pele de carneiro, adquiria a propriedade de atrair corpos leves (palhas e pequenas sementes secas).

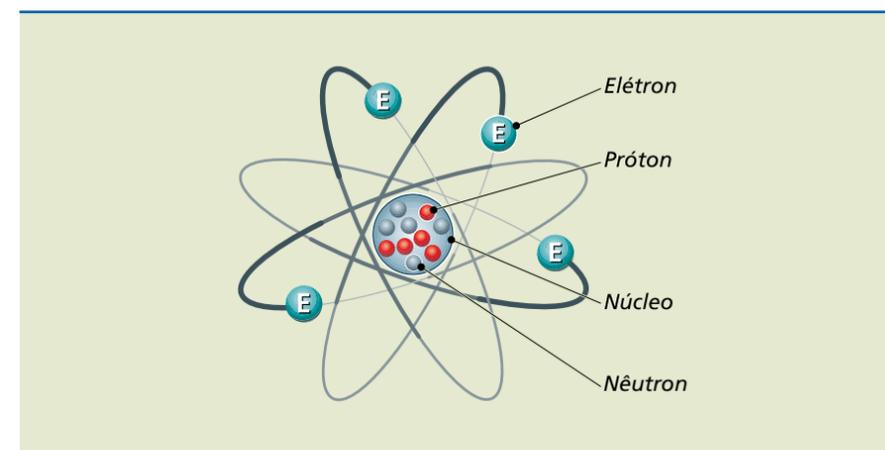
William Gilbert também estudou fenômenos de atração entre corpos diferentes do âmbar. Como a palavra grega correspondente a âmbar é *elektron*, ele passou a utilizar o termo “eletrizado” em situações nas quais os corpos eram atraídos depois de atritados. Isso pode ser comprovado com o simples experimento de atritar um pente ou uma régua plástica em uma flanela seca e atrair pequenos pedaços de papel ou fios de cabelo.

Como sabemos, os corpos são constituídos de átomos e estes possuem partículas subatômicas. No núcleo do átomo estão os nêutrons, de carga elétrica nula, e os prótons, de carga elétrica positiva; na eletrosfera localizam-se os elétrons, de carga elétrica negativa (figura 1.7). Portanto, a explicação para esses fenômenos de eletrização é a transferência de elétrons entre os corpos atritados.

No Sistema Internacional de Unidades (SI), a unidade de medida da carga elétrica é o coulomb (C), em homenagem ao físico francês Charles Augustin de Coulomb.

Figura 1.7

Átomo.



Os elétrons foram identificados pelo físico britânico John Joseph Thompson em 1897, enquanto estudava descargas elétricas emitidas por um tubo de raios catódicos. A descoberta dos prótons se deu em 1911, quando o cientista inglês Ernest Rutherford percebeu que as descargas elétricas que ocorriam dentro de um tubo, criado pelo físico alemão Eugene Goldstein, em 1886, contendo hidrogênio possuíam a menor carga elétrica positiva então conhecida. Embora a massa do próton ($1,6 \cdot 10^{-27}$ kg) seja maior que a do elétron ($9,10 \cdot 10^{-31}$ kg), ambos possuem a mesma carga elétrica. Assim, todo átomo que possui a mesma quantidade de prótons e de elétrons é considerado neutro.

Finalmente, os nêutrons, que não possuem carga elétrica, foram descobertos em 1932 pelo físico britânico James Chadwick. Essas partículas são importantes para manter a estabilidade dos núcleos atômicos.

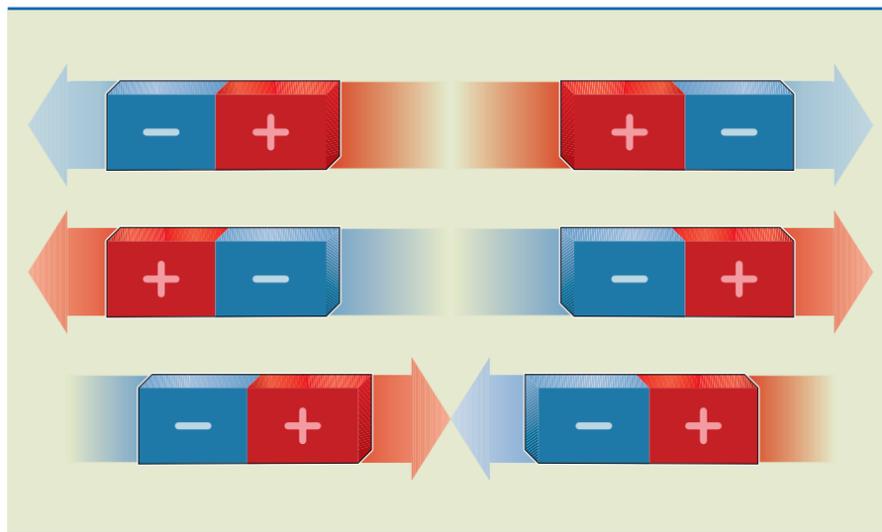
Os corpos são eletrizados quando sofrem perda ou ganho de elétrons: os que perderam elétrons adquirem carga elétrica positiva (uma vez que o número de prótons é maior), e os que ganharam elétrons, carga elétrica negativa.

A eletrostática então se fundamenta basicamente em dois princípios:

- **Princípio da atração e da repulsão** – Cargas de natureza elétrica oposta (sinais opostos) se atraem, enquanto cargas de mesma natureza elétrica (mesmo sinal) se repelem (figura 1.8).

Figura 1.8

Atração e repulsão eletrostática.



- **Princípio da conservação das cargas elétricas** – Se um sistema elétrico não trocar cargas elétricas com um meio exterior, a soma algébrica das cargas positivas e negativas desse meio elétrico é sempre constante.

É importante ressaltar que não se associam os termos “positivo” e “negativo” aos polos magnéticos dos ímãs, uma vez que as cargas elétricas positivas e negativas se manifestam separadamente, do mesmo modo que não existe um ímã sem dois polos magnéticos.

1.1.3 Campo elétrico

Para compreendermos o que é campo elétrico, vamos imaginar a seguinte situação: uma carga Q está fixa em determinada posição e sucessivamente tentamos aproximar em diferentes pontos uma carga q . Nessas tentativas, observamos que há uma força atuando em q exercida por Q . Podemos admitir, então, que uma **carga elétrica puntiforme** altera a região que a envolve, fazendo com que, ao aproximarmos outra carga elétrica em um ponto dessa região, colocada a uma distância d da primeira carga, manifesta-se uma força de natureza elétrica.

Corpo eletrizado cujas dimensões são desprezíveis em relação à distância que o separa de outro corpo eletrizado.

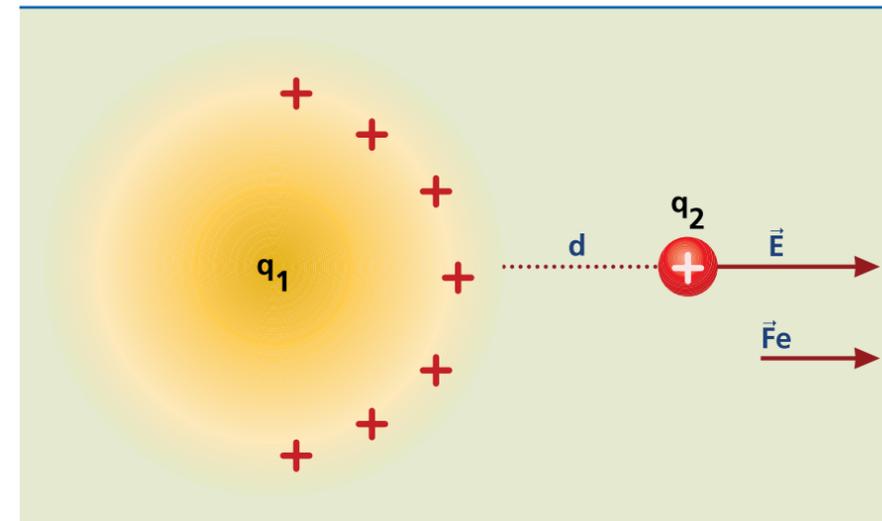


Figura 1.9

Força e campo elétricos.

Na figura 1.9, as cargas q_1 e q_2 estão à distância de d entre si. O campo elétrico está representado por \vec{E} e a força elétrica, por \vec{F}_e . A expressão que determina a identidade da carga elétrica é:

$$q = n \cdot e \quad (1.1)$$

em que:

- q é a carga elétrica, medida em coulomb (C);
- n , o número de elétrons em excesso ou em falta de um corpo eletrizado;
- e , a carga elementar de um elétron.

Retomando a figura 1.9, podemos notar que entre as duas cargas puntiformes existe uma força de atração ou de repulsão eletrostática que depende dos sinais das cargas. Charles Coulomb, utilizando um dispositivo chamado balança de torção, realizou experimentos que comprovaram que essa força é inversamente proporcional à distância d e diretamente proporcional ao produto do valor de suas cargas. Além disso, constatou que o meio em que os experimentos são realizados influencia o valor do resultado. Essas observações ficaram conhecidas como lei de Coulomb, cuja expressão é:

$$F_e = k_0 \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{d^2} \quad (1.2)$$



em que:

- F_e é a força elétrica, medida em newton (N);
- k_0 , a constante eletrostática do vácuo ($k_0 = 9 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$);
- q_1 e q_2 , as cargas elétricas, medidas em coulomb (C);
- d , a distância entre as cargas, medida em metro (m).

Se fixarmos a carga q_1 em determinada posição e deslocarmos q_2 ao redor dela, manifesta-se novamente uma força elétrica, qualquer que seja a distância do ponto em relação à q_1 , ou seja, ao redor de uma carga elétrica ocorrem interações elétricas, como a força \vec{F} . Essa região do espaço ao redor da carga elétrica é denominada campo elétrico, dada pela expressão:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \quad (1.3)$$

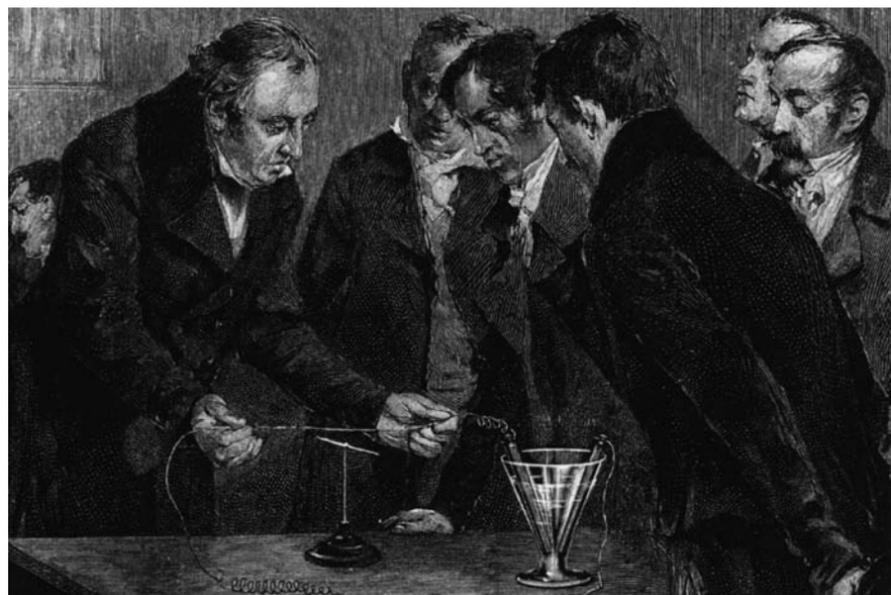
em que \vec{E} é o campo elétrico medido em newton por coulomb (N/C).

1.2 A relação entre eletricidade e magnetismo

Em 1820, o professor dinamarquês Hans Christian Ørsted realizou uma experiência – conhecida, mais tarde, como experiência de Ørsted – em que demonstrou pela primeira vez a relação entre eletricidade e magnetismo (figura 1.10).

Figura 1.10

Ørsted realizando a experiência em que foi descoberta a relação entre eletricidade e magnetismo.



A experiência consistia em colocar uma agulha imantada paralela a um fio que seria percorrido por uma corrente elétrica. Ørsted observou que, ao fechar a chave do circuito, o fio era percorrido por uma corrente elétrica e, nesse momento, a agulha imantada desviava sua orientação norte-sul (figura 1.11), fenômeno já observado quando se aproximava um ímã de uma agulha imantada.

Ao abrir a chave, o fluxo de corrente cessava e a agulha voltava a sua posição normal. Com isso, descobriu-se a relação entre eletricidade e magnetismo.

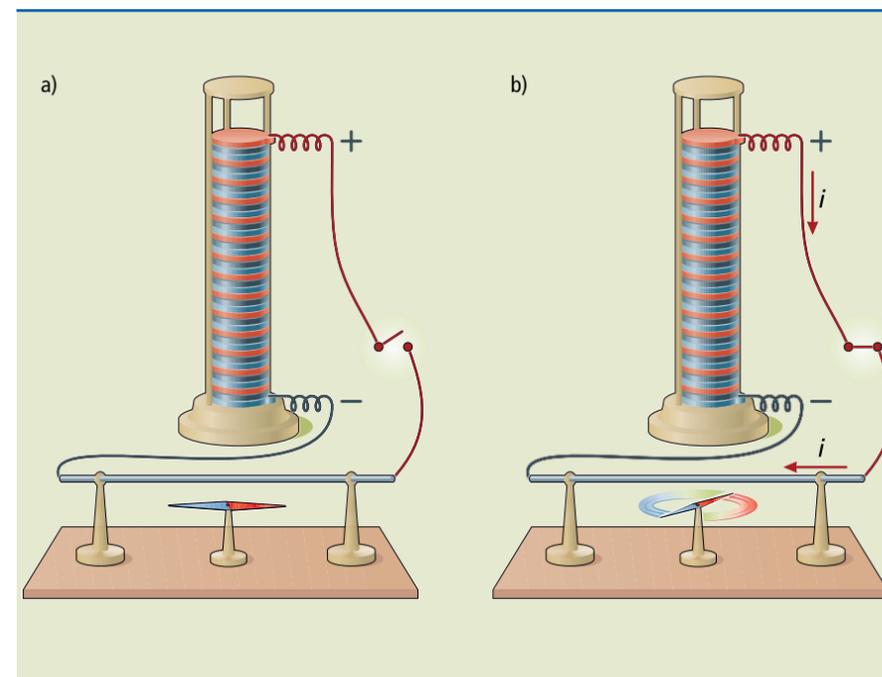


Figura 1.11

(a) Circuito elétrico que pode demonstrar a experiência de Ørsted; (b) Após a ligação da bateria fechando o circuito, a passagem de corrente provoca a deflexão da bússola.

No século XVIII, o cientista norte-americano Benjamin Franklin havia tentado explicar os fenômenos elétricos de atração e repulsão. Em sua teoria, admitia que todos os corpos possuíam uma espécie de “fluido elétrico”, responsável por tais fenômenos. Ao serem atritados, alguns corpos perdiam esse fluido (corpos negativos), outros o recebiam (corpos positivos). Sem o atrito, esses corpos permaneciam em seu estado neutro com número igual de fluidos negativos e positivos. De acordo com essas ideias, por se tratar de transferência de eletricidade de um corpo para outro, não haveria nem criação nem destruição de cargas elétricas, permanecendo constante a quantidade total de fluido elétrico.

Atualmente, sabemos que o processo de separação de cargas elétricas ocorre por transferência de elétrons sem que o número de elétrons e prótons se altere e que a corrente elétrica em um fio está associada ao movimento de elétrons livres.

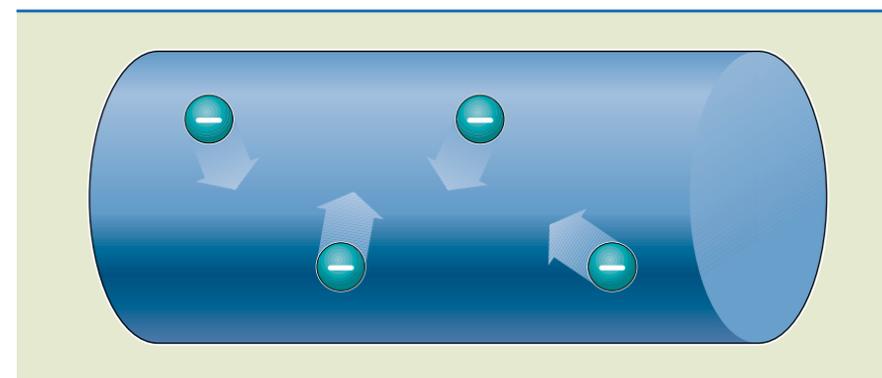


Figura 1.12

Elétrons em movimento desordenado em um condutor metálico.



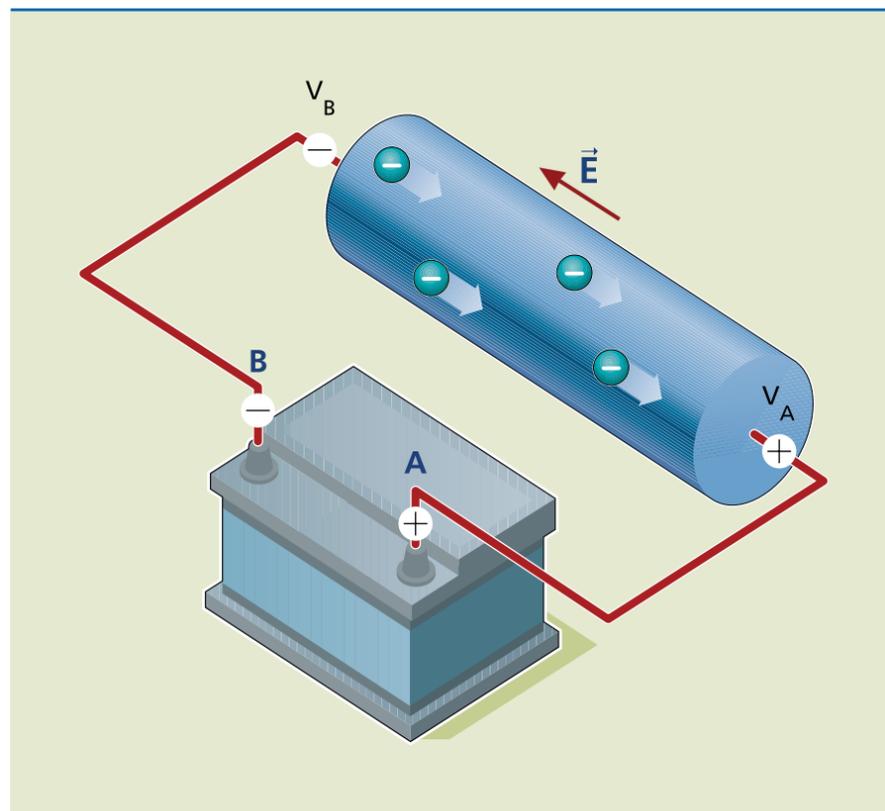
Analisando a figura 1.12, podemos notar que os elétrons livres estão em movimento desordenado, não produzindo efeito externo algum. Esse condutor está em equilíbrio eletrostático, apresentando as seguintes características:

- O campo elétrico resultante em seus pontos internos é nulo.
- O potencial elétrico em todos os seus pontos internos e superficiais é constante.
- Os elétrons livres distribuem-se em sua superfície externa.

Se as extremidades do condutor são ligadas a uma bateria, passa a existir em seu interior um campo elétrico com sentido do polo positivo para o negativo, como mostra a figura 1.13.

Figura 1.13

Elétrons em movimento ordenado em um condutor metálico e manifestação da corrente elétrica.



Com o surgimento desse campo elétrico no interior do condutor, os elétrons livres ficam submetidos a uma força elétrica – cujo sentido é contrário ao do campo elétrico, pois a carga dos elétrons é negativa –, o que altera seu deslocamento: eles se movem com direção e sentido iguais aos da força elétrica. Esse movimento ordenado é denominado corrente elétrica, medida em ampere (A).

Então, é correto dizer que a corrente elétrica possui magnetismo?

Sabemos que uma carga elétrica imóvel no espaço origina um campo elétrico. Quando essa carga elétrica passa a se mover, surge a seu redor uma região com propriedades magnéticas, chamada campo magnético.

1.2.1 Campo magnético dos ímãs

A experiência de Öersted comprovou que ao redor de um condutor energizado surge um campo elétrico e que a cada ponto de um campo elétrico pode-se associar um vetor campo elétrico \vec{E} . Para os ímãs, vale o mesmo princípio: a cada ponto de um campo magnético associa-se um vetor campo magnético \vec{B} , também conhecido como vetor indução magnética (figura 1.14). No Sistema Internacional de Unidades, o vetor \vec{B} é medido em tesla (T).

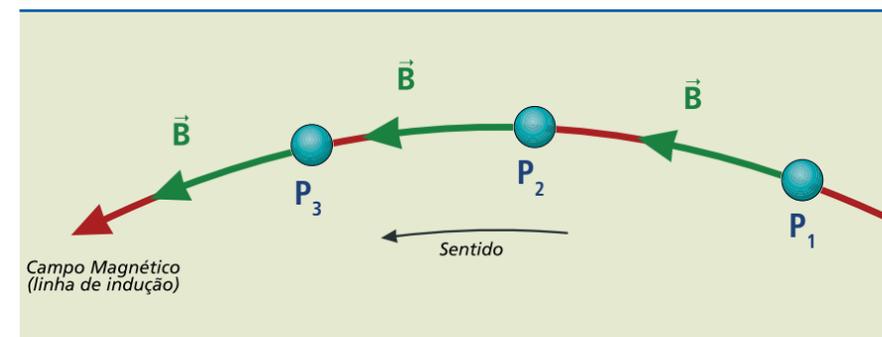


Figura 1.14

Linha de indução.

O campo magnético nos condutores energizados surge devido ao movimento ordenado dos elétrons livres. Mas, nos ímãs, como surge o campo magnético se não há movimento ordenado dos elétrons livres?

A explicação para o campo magnético dos ímãs também é atribuída às cargas elétricas (os elétrons) que se movem ao redor do núcleo dos átomos, formando o chamado dipolo magnético (figura 1.15).

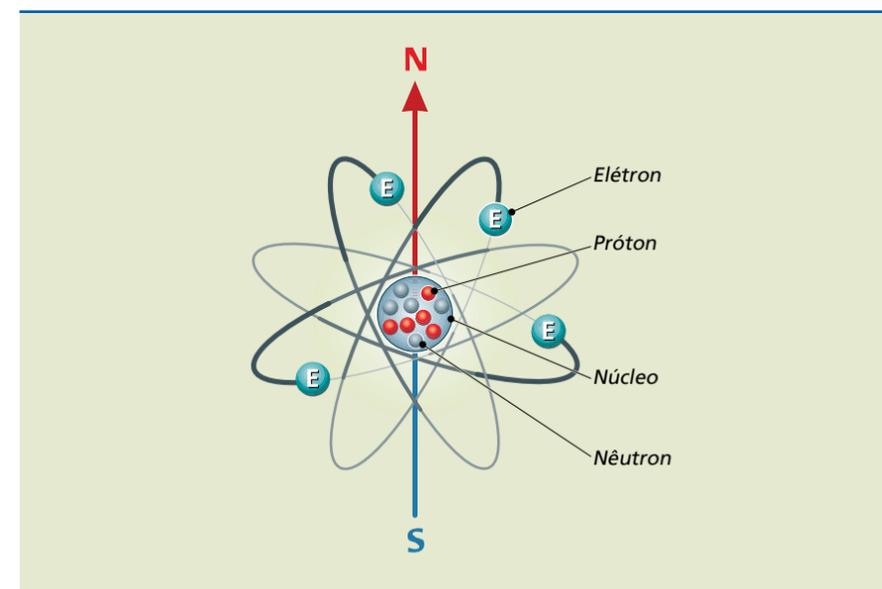


Figura 1.15

Dipolo magnético.

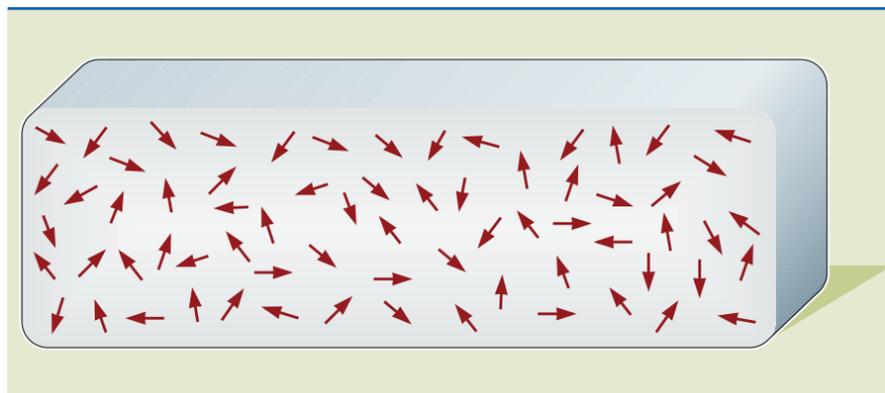
A matéria formada por inúmeros conjuntos de dipolos magnéticos é denominada domínios magnéticos, que funcionam como minúsculos ímãs. Em um material qualquer, os domínios magnéticos estão desorientados, não havendo, por



isso, um campo magnético resultante (figura 1.16), ou mais corretamente, o campo magnético resultante, nesse caso, é nulo.

Figura 1.16

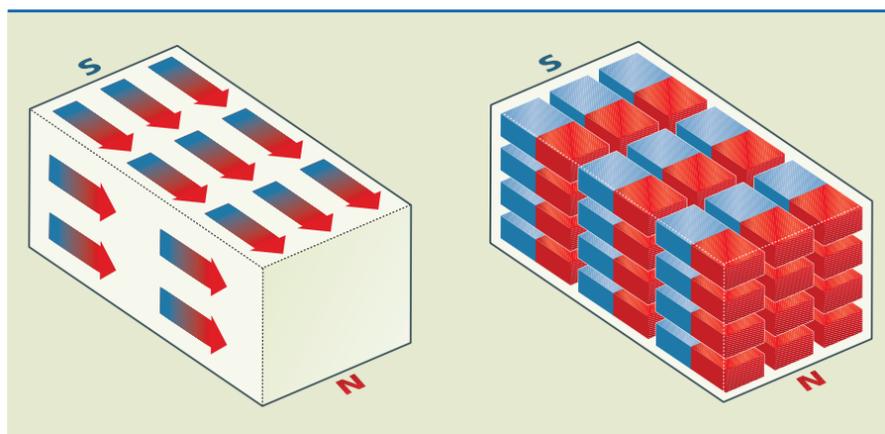
Aspecto dos dipolos na maioria dos materiais.



No caso dos ímãs, todos os domínios magnéticos estão orientados na mesma direção (figura 1.17).

Figura 1.17

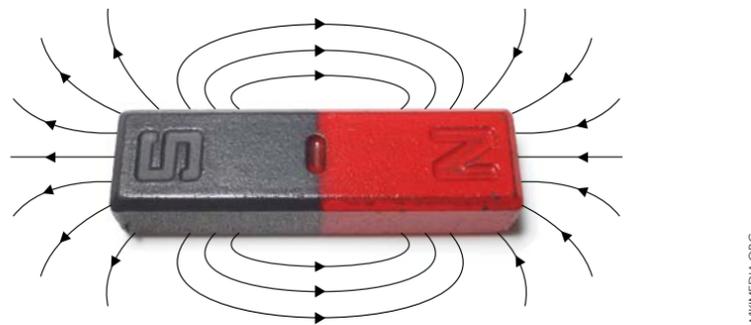
Alinhamento dos domínios magnéticos em um ímã.



A figura 1.18 mostra a representação do campo magnético de um ímã em forma de barra, resultante da orientação dos dipolos. As linhas que indicam o campo magnético são chamadas de linhas de indução, e convencionou-se que elas “saem” do polo norte e “chegam” ao polo sul.

Figura 1.18

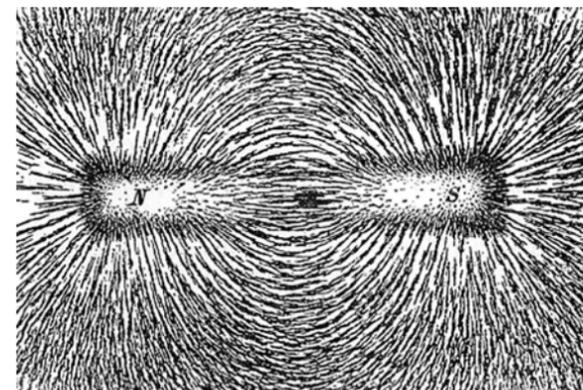
Linhas de indução em um ímã em forma de barra.



É possível visualizar o campo magnético (linhas de indução) de um ímã fazendo uma montagem simples (figura 1.19): posiciona-se um ímã em forma de barra embaixo de um vidro e espalham-se limalhas de ferro na superfície do vidro.

Figura 1.19

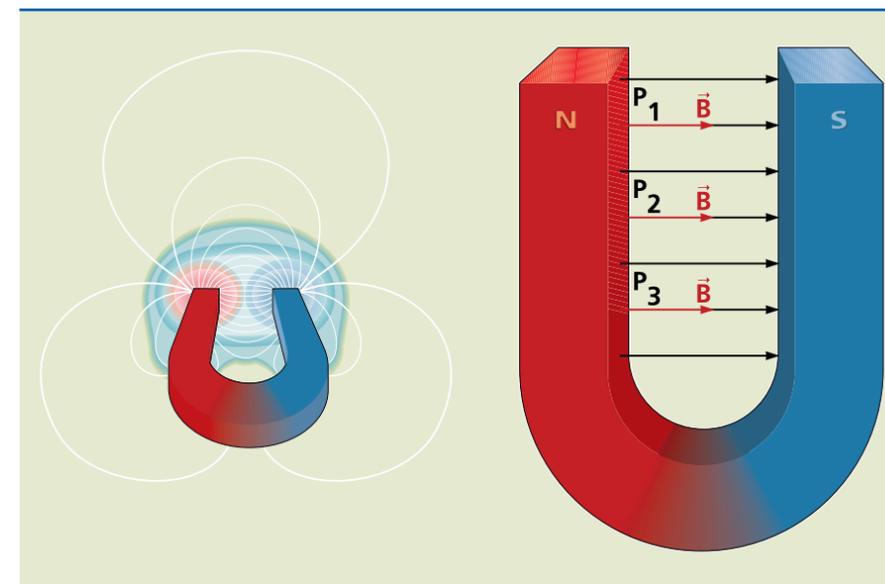
Visualização das linhas de indução em um ímã em forma de barra.



Existem outros modelos de ímãs, além do formato em barra. Um deles é o ímã em forma de ferradura (U), no qual o campo magnético é uniforme em todos os pontos (exemplificados, na figura 1.20, por P₁, P₂ e P₃), ou seja, seu valor e orientação não se alteram.

Figura 1.20

Representação do campo magnético uniforme em um ímã em forma de ferradura (U).



1.2.2 Campo magnético da Terra

Atualmente, a teoria elaborada em 1939 pelo físico germano-norte-americano Walter Maurice Elsasser é a mais aceita para explicar o campo magnético terrestre (figura 1.21).

Segundo essa teoria, no núcleo da Terra existem metais liquefeitos, que, quando superaquecidos, perdem elétrons, tornando-se, então, cargas elétricas. Esse fluxo



de elétrons associado à rotação do planeta resulta em um movimento ordenado de cargas elétricas. Com isso, manifesta-se um campo magnético que se espalha ao redor da Terra (figura 1.22).

Figura 1.21

Campo magnético terrestre: linhas de indução a partir dos polos.

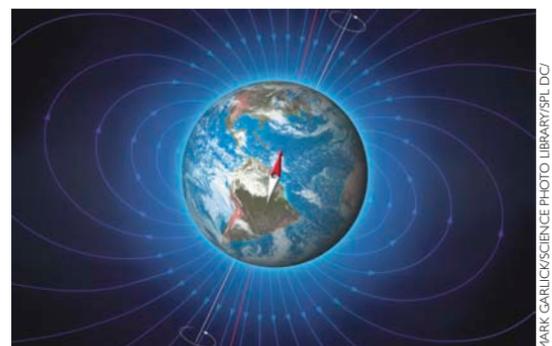
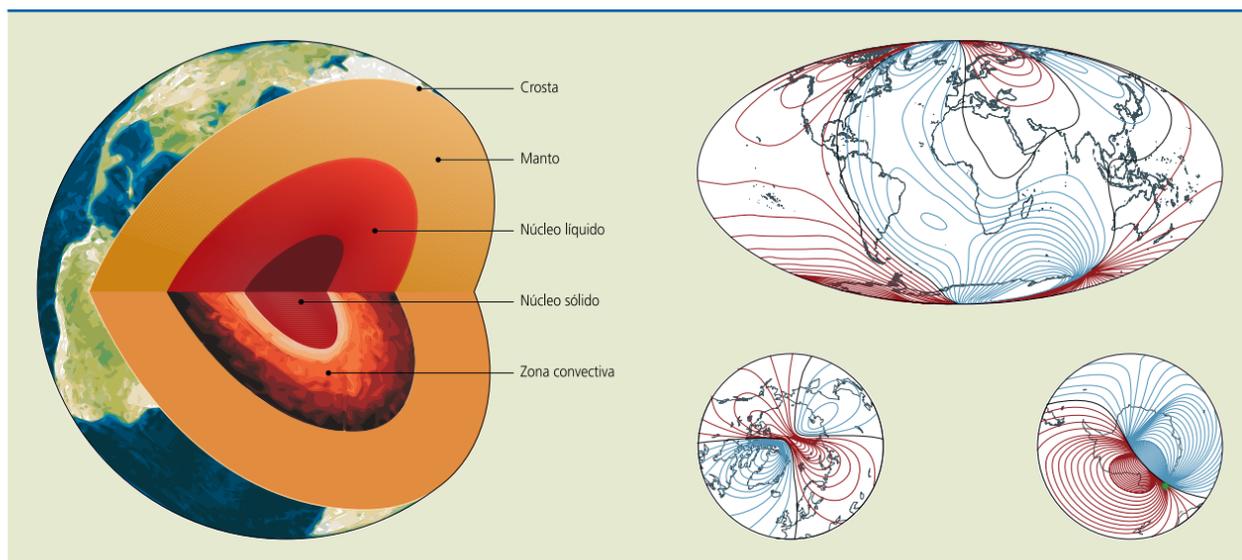


Figura 1.22

Geração do campo magnético terrestre.



Uma constatação visível a olho nu da existência do campo magnético terrestre é a aurora polar (figura 1.23).

Figura 1.23

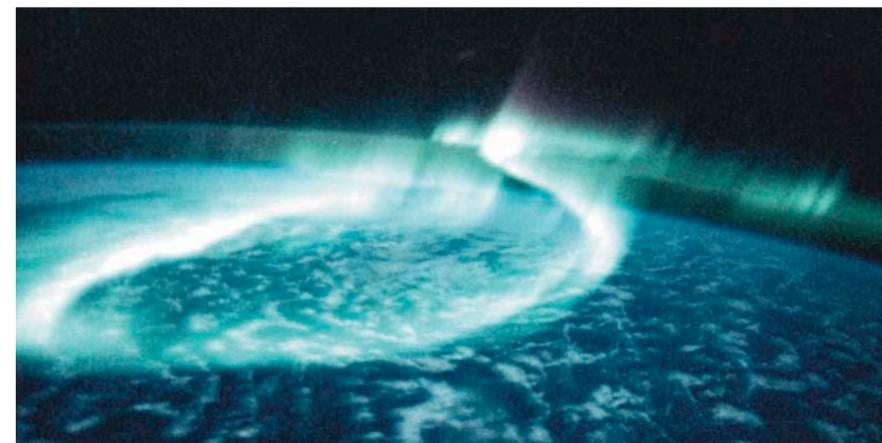
Aurora polar:



A aurora polar é um efeito luminoso que ocorre nas regiões próximas aos polos, resultante do choque das partículas eletrizadas provenientes das explosões solares com as moléculas de ar da atmosfera (figura 1.24).

Figura 1.24

Aurora polar vista do espaço.



1.2.3 Vetor indução magnética

Para entendermos o que é vetor indução magnética \vec{B} , vamos analisar a lei de Biot-Savart.

Proposta pelos físicos franceses Jean-Baptiste Biot e Félix Savart depois de analisarem os resultados dos experimentos de Ørsted, essa lei, representada na figura 1.25, estabelece que, em um condutor energizado, o vetor indução magnética \vec{B} possui direção perpendicular ao plano em que se encontra. A intensidade do vetor \vec{B} é diretamente proporcional à corrente elétrica i , ao comprimento do condutor ($\ell \cdot \text{sen}\theta$) e à constante de proporcionalidade magnética no vácuo μ_0 , e inversamente proporcional ao quadrado da distância r .

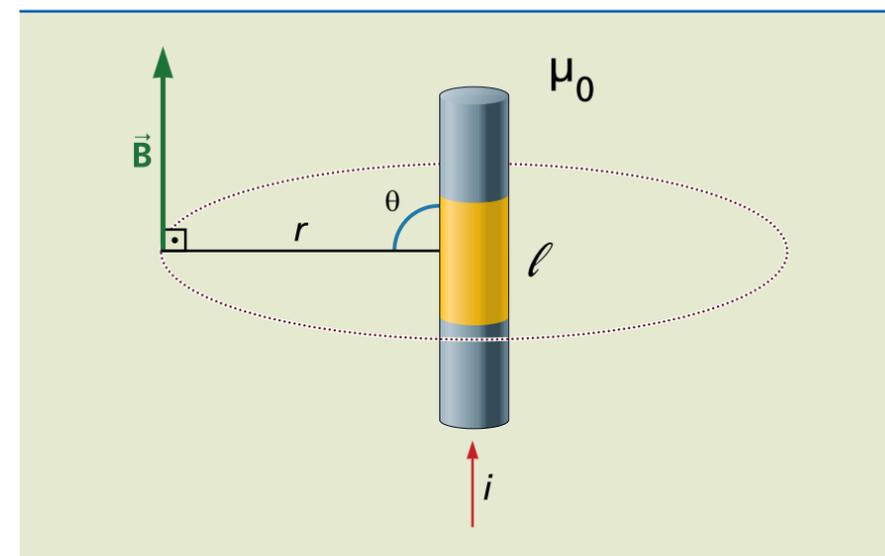


Figura 1.25

Lei de Biot-Savart.



A expressão que determina a intensidade do vetor de indução magnética é:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot i \cdot \ell \cdot \text{sen}\theta}{4\pi r^2} \quad (1.4)$$

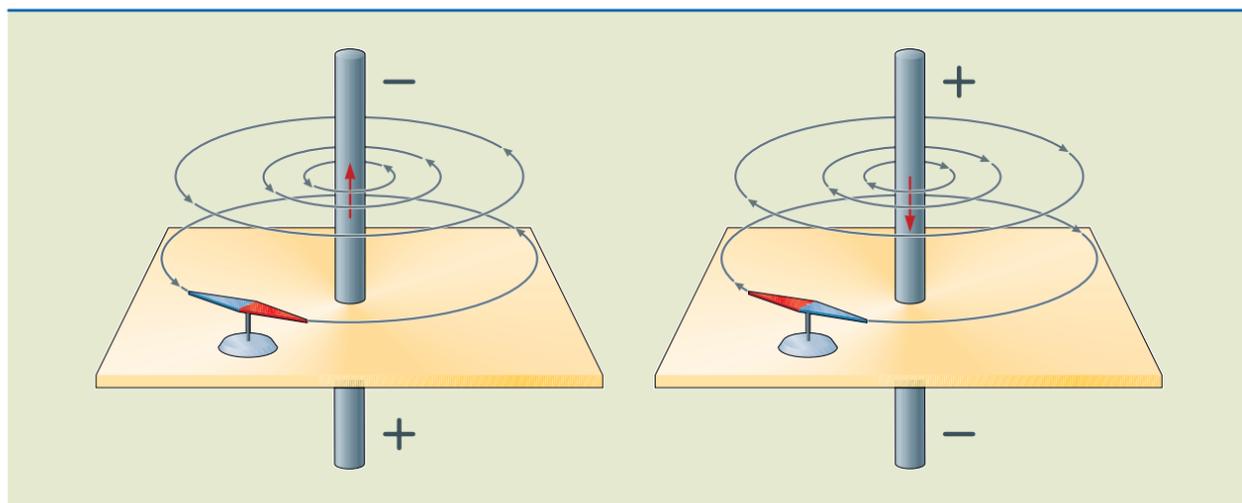
Calcula-se μ_0 por:

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{T} \cdot \text{m}}{\text{A}}$$

Figura 1.26

Sentido do campo magnético depende da corrente elétrica.

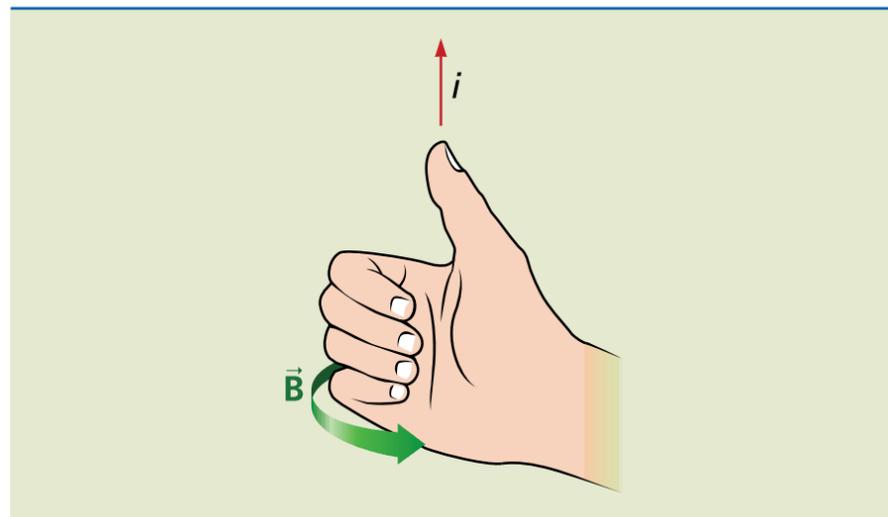
Como mostra a figura 1.26, quando o condutor é percorrido por uma corrente elétrica surgem ao redor dele campos magnéticos perpendiculares ao plano do condutor, representados por circunferências concêntricas. O sentido do campo magnético depende do sentido da corrente elétrica.



Existe um procedimento simples para determinar o sentido do vetor indução magnética, conhecido como regra da mão direita (figura 1.27).

Figura 1.27

Regra da mão direita.



1.2.4 Campo magnético de um condutor retilíneo

É possível visualizar as linhas de indução ao redor de um fio condutor espalhando limalhas de ferro sobre uma folha de papel perpendicular ao fio, conforme representa a figura 1.28.

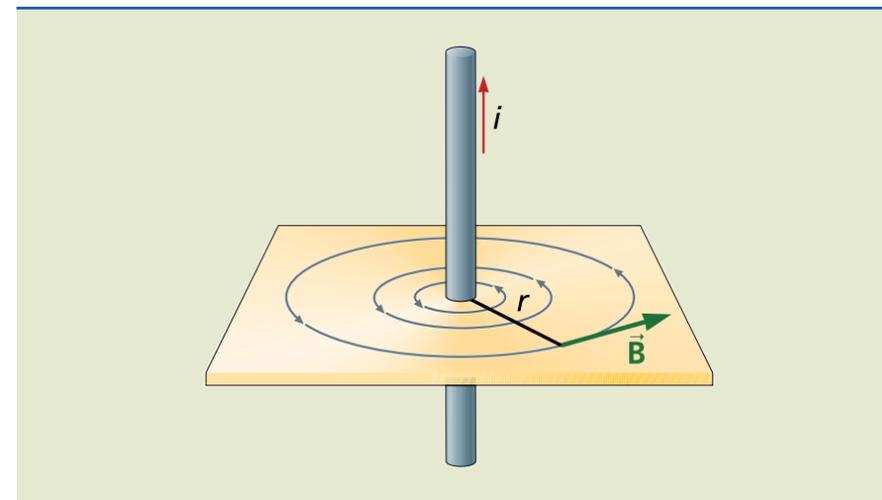


Figura 1.28

Campo magnético da corrente elétrica percorrendo um condutor retilíneo.

A intensidade é determinada por:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot i}{2\pi \cdot r} \quad (1.5)$$

em que r é a distância, em metro (m), entre o fio e o ponto em que se deseja determinar B .

1.2.5 Campo magnético de uma espira circular

Quando torcemos um fio percorrido por corrente elétrica para produzir uma espira circular, a intensidade de seu campo magnético aumenta (figura 1.29).

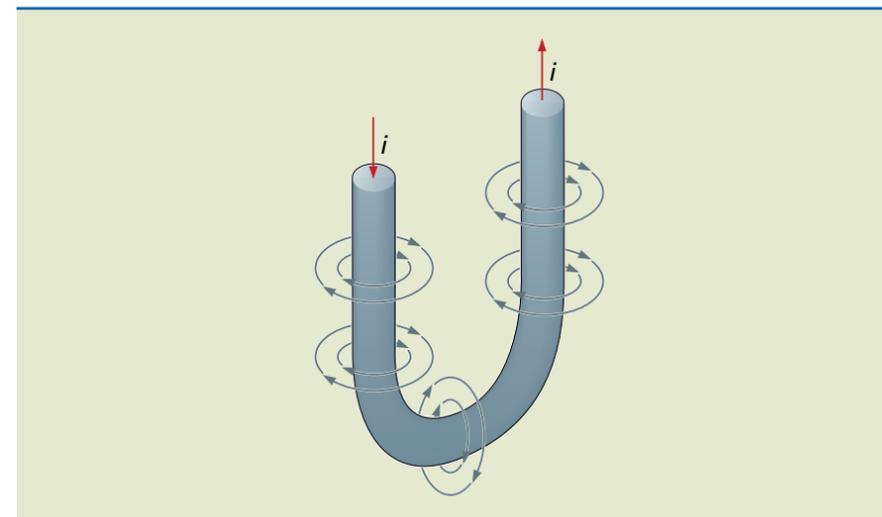


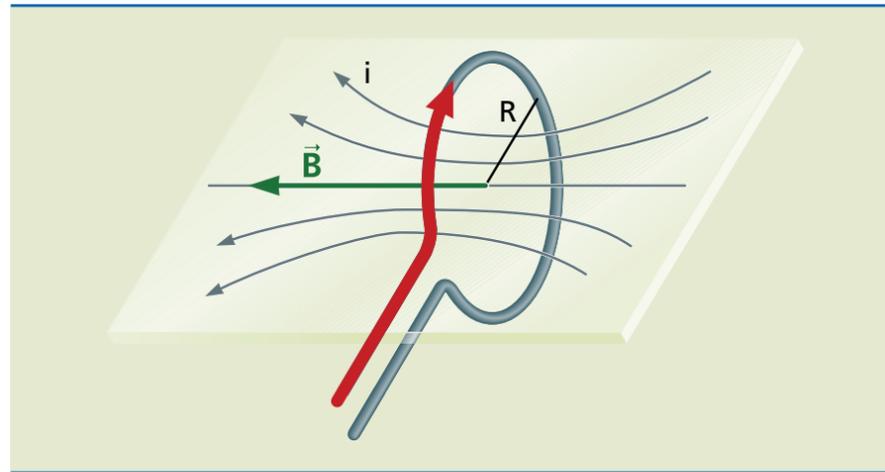
Figura 1.29

Aumento da intensidade do campo magnético.



É possível visualizar as linhas de indução ao redor de uma espira circular espalhando limalhas de ferro sobre uma folha de papel perpendicular à espira, conforme representa a figura 1.30. O campo magnético da corrente elétrica percorrendo a espira circular é perpendicular ao plano da espira.

Figura 1.30
Campo magnético da corrente elétrica percorrendo uma espira circular:



A intensidade é determinada por:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot i}{2R} \quad (1.6)$$

em que R é o raio da espira, em metro (m).

Caso a espira possua N voltas (bobina chata):

$$B = \frac{N \cdot \mu_0 \cdot i}{2R} \quad (1.7)$$

1.2.6 Campo magnético de um solenoide

A principal característica que difere um solenoide de uma bobina é seu formato longo, semelhante a um tubo. Um solenoide é, portanto, uma bobina de N espiras enroladas sucessivamente, adquirindo formato mais longo (figura 1.31). O campo magnético no interior do solenoide é uniforme e tem a direção do eixo geométrico.

A intensidade é determinada por:

$$B = \frac{N \cdot \mu_0 \cdot i}{\ell} \quad (1.8)$$

em que N é o número de espiras e ℓ o comprimento do solenoide, em metro (m).

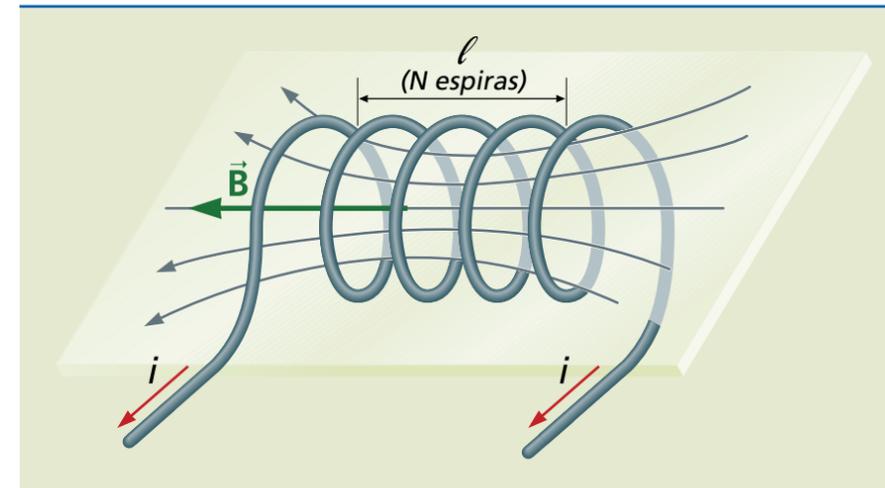


Figura 1.31
Campo magnético da corrente elétrica percorrendo um solenoide.

1.2.7 Aplicações práticas do campo magnético

Entre as principais aplicações do campo magnético estão o eletroímã, a ressonância magnética e o detector de metais.

Eletroímã

É uma bobina percorrida por corrente elétrica que tem o campo magnético intensificado por um corpo magnetizável, denominado núcleo. O princípio do eletroímã está presente em muitos dispositivos elétricos, como campainhas, relés e contactores (figura 1.32).

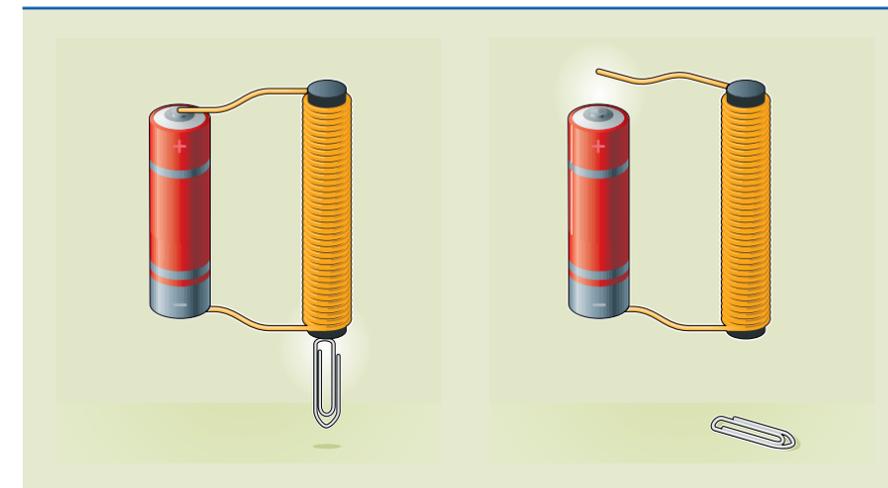


Figura 1.32
Eletroímã.

Ressonância magnética

Por muito tempo a única maneira de observar partes internas do corpo humano (órgãos, músculos, ossos) e diagnosticar doenças era por meio dos raios X (mesmo em uma tomografia computadorizada). O surgimento da técnica da ressonância magnética passou a permitir a obtenção de excelente nível de qualidade



de imagens em corte do corpo humano, além de não expor a pessoa aos raios X, que em valores elevados são prejudiciais.

Durante o exame de ressonância magnética, o paciente deita em uma mesa que se movimenta horizontalmente no interior de um gigantesco eletroímã circular. Essa bobina circular aplica um campo magnético que provoca o alinhamento dos dipolos magnéticos do núcleo de certos átomos do corpo humano (figura 1.33).

Figura 1.33

Bobinas de ressonância magnética.



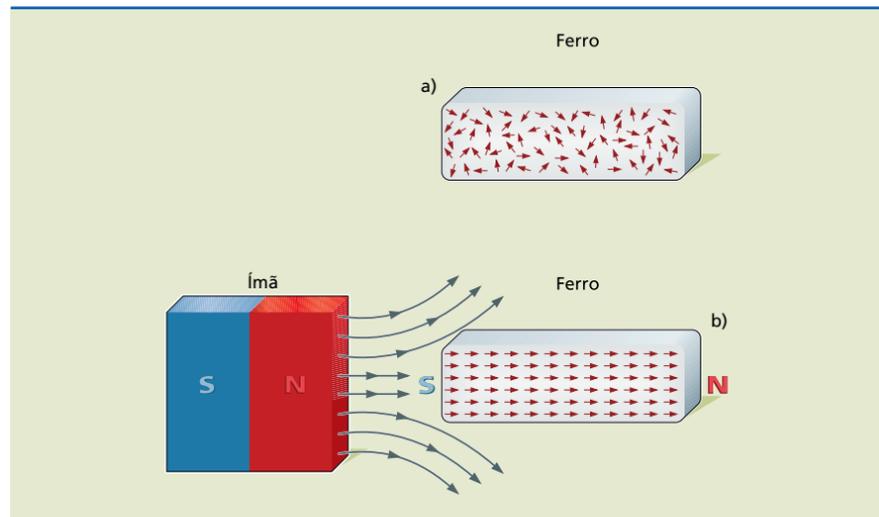
Após o alinhamento, ondas de rádio são aplicadas na região a ser examinada. Quando a frequência dessas ondas coincide com a frequência natural dos núcleos atômicos, estes absorvem energia. Ao removerem o sinal de rádio, os núcleos emitem essa energia na forma de sinais, que são detectados, amplificados, digitalizados e usados para produzir uma imagem em corte.

Detector de metais

O funcionamento do detector de metais baseia-se no seguinte princípio: quando se aproxima um ímã de uma barra de ferro, o campo magnético força a orientação de seus dipolos, transformando-a em ímã (figura 1.34).

Figura 1.34

Processo de magnetização:
(a) ferro com dipolos desalinhados e
(b) com dipolos alinhados devido à ação do eletroímã.



Dessa maneira, o detector gera um campo magnético, como em um ímã, que, ao se aproximar de um metal, provoca o movimento dos elétrons deste, fazendo com que eles se orientem, formando outro campo magnético. Essa variação entre os campos magnéticos é detectada pelo instrumento.

Os detectores podem ser portáteis ou fixos, como aqueles instalados em aeroportos (figura 1.35).

Figura 1.35

Detectores de metais.



1.3 Força magnética e suas aplicações

A força magnética surge quando duas cargas elétricas em movimento estão próximas o suficiente para que o campo magnético de uma interfira no da outra.

1.3.1 Força magnética sobre cargas elétricas

Quando uma carga magnética está em movimento, cria-se a seu redor um campo magnético. Se esse campo magnético é uniforme, surge uma força magnética \vec{F}_m que depende (figura 1.36): do valor da carga elétrica q , em coulomb (C); da velocidade \vec{v} , em metro por segundo (m/s); do valor do campo uniforme \vec{B} , em tesla (T); e do ângulo de inclinação θ , formado entre \vec{B} e \vec{v} .

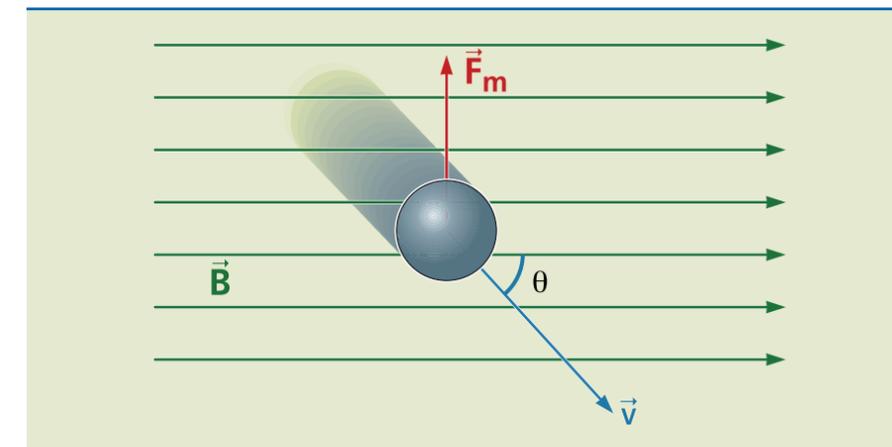


Figura 1.36

A força magnética sendo definida.



Então, a expressão que possibilita determinar a força magnética \vec{F}_m , em newton (N), é:

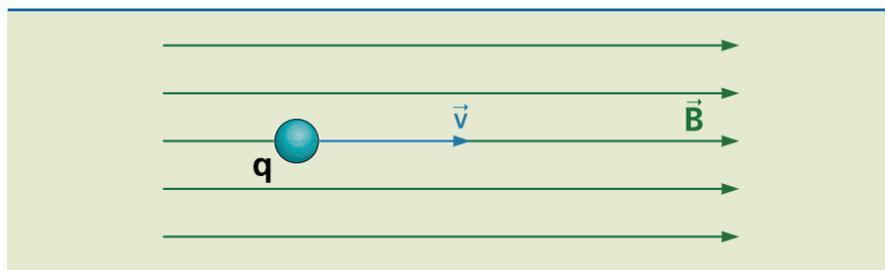
$$F_m = q \cdot v \cdot B \cdot \text{sen}\theta \quad (1.9)$$

Como, porém, a força magnética é uma grandeza vetorial, não basta calcular seu valor; é necessário determinar também sua direção e sentido. A direção a ser tomada pela força magnética depende de como a carga q é lançada no campo magnético uniforme:

- **Carga lançada paralelamente ao campo magnético uniforme** (figura 1.37) – Como o ângulo θ vale zero, a força magnética também vale zero e, por isso, a carga continua em sua trajetória original, executando um movimento retilíneo uniforme.

Figura 1.37

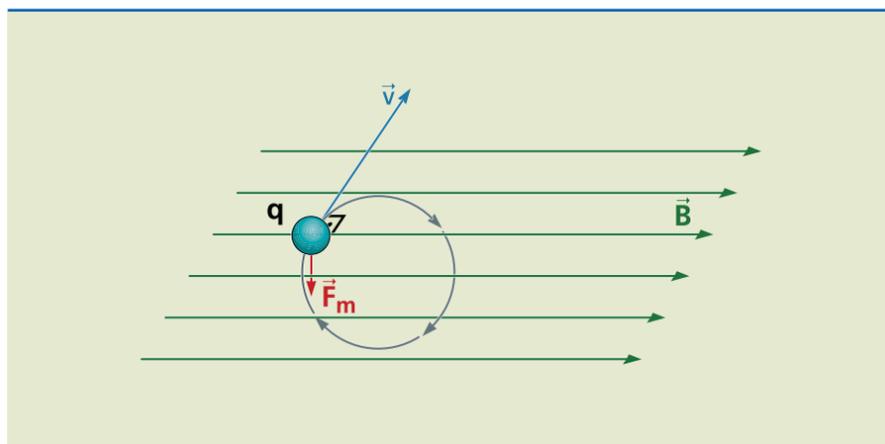
Carga lançada paralelamente ao campo magnético uniforme.



- **Carga lançada perpendicularmente ao campo magnético uniforme** (figura 1.38) – Como o ângulo θ vale 90° , a força magnética atinge intensidade máxima ($F_m = q \cdot v \cdot B$), o que faz com que a carga se desvie da trajetória original, executando um movimento circular uniforme.

Figura 1.38

Carga lançada perpendicularmente ao campo magnético uniforme.



- **Carga lançada obliquamente ao campo magnético uniforme** (figura 1.39) – Como o ângulo θ (entre a velocidade e o campo) é maior que 0° e menor que 90° , a força magnética provoca uma trajetória que é a soma do movimento retilíneo uniforme com o circular uniforme, chamada helicoidal cilíndrica, enquanto a velocidade pode ser decomposta em projeções horizontal e vertical; há influência dos dois tipos de movimento.

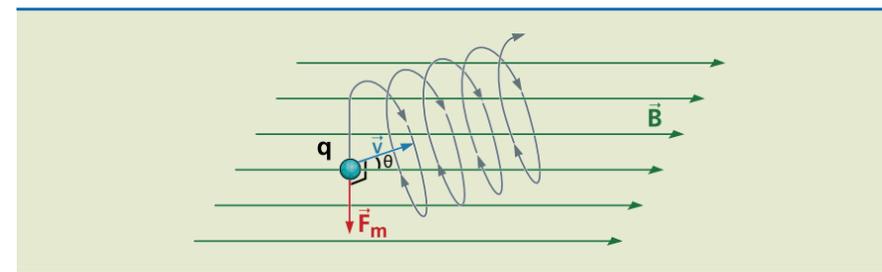


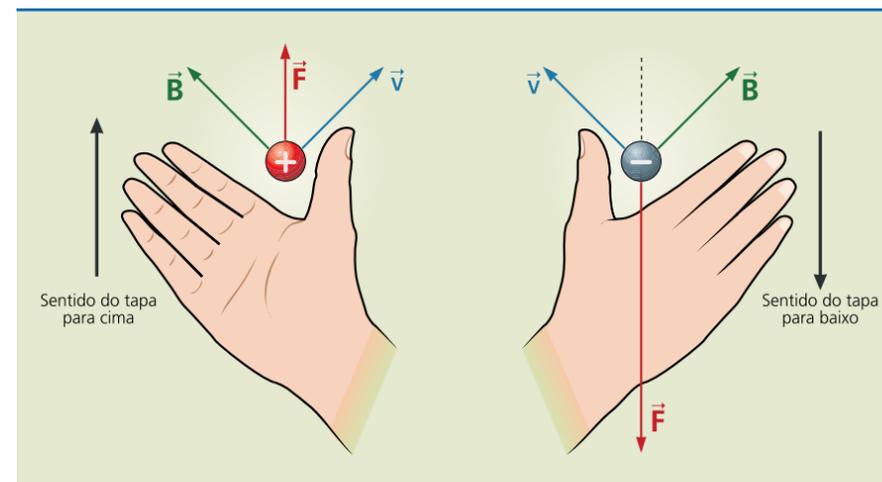
Figura 1.39

Carga positiva com velocidade v entrando em campo magnético segundo ângulo θ . A força magnética resultante é perpendicular ao plano do campo e da velocidade. A carga descreve uma trajetória helicoidal.

Para definir um vetor, é necessário conhecer módulo, direção e sentido. Contudo, para determinar o sentido da força magnética, basta utilizar a regra do tapa ou da mão direita, como mostra a figura 1.40.

Figura 1.40

Regra do tapa ou da mão direita.



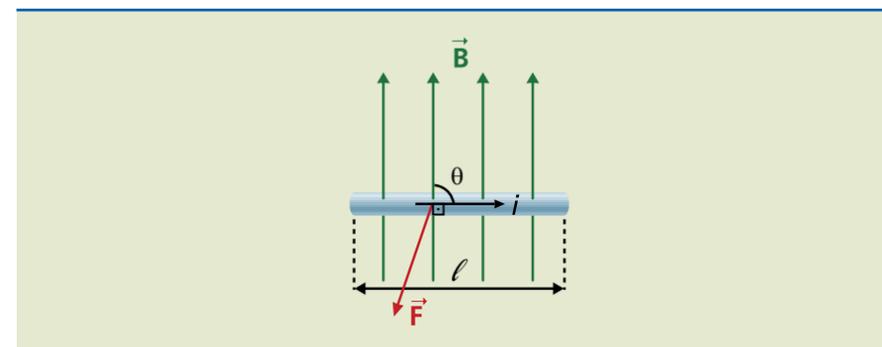
Portanto, o sentido da força é dado pelo “tapa” com a mão direita aberta: o tapa é feito com a palma da mão se a carga for positiva e com o dorso da mão se a carga for negativa.

1.3.2 Força magnética sobre condutor imerso em campo magnético

Como a corrente elétrica possui campo magnético, se um condutor reto, percorrido por corrente elétrica, é imerso em um campo magnético, manifesta-se uma força magnética (figura 1.41).

Figura 1.41

Condutor percorrido por corrente elétrica sob ação de uma força magnética.



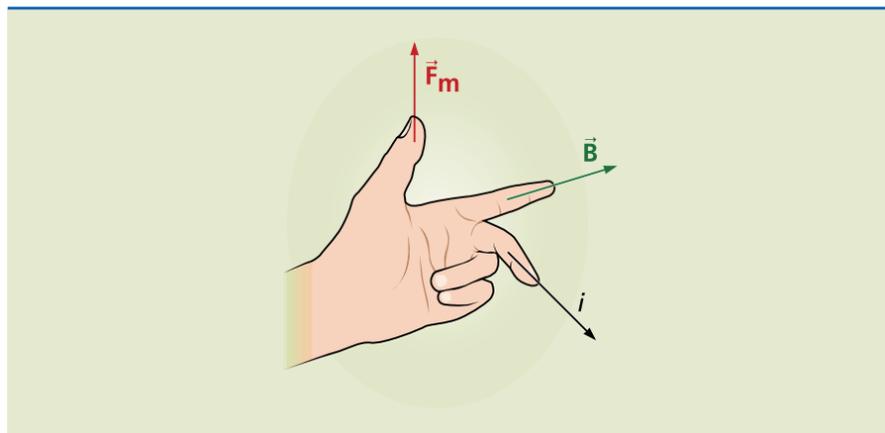
O ângulo θ é formado entre o condutor e o campo magnético uniforme \vec{B} . Assim, o valor da força magnética é calculado por:

$$F_m = B \cdot i \cdot \ell \cdot \text{sen}\theta \quad (1.10)$$

em que ℓ é o comprimento do condutor, em metro. Nesse caso, para determinar o sentido da força, usa-se a regra da mão esquerda (figura 1.42).

Figura 1.42

Regra da mão esquerda.

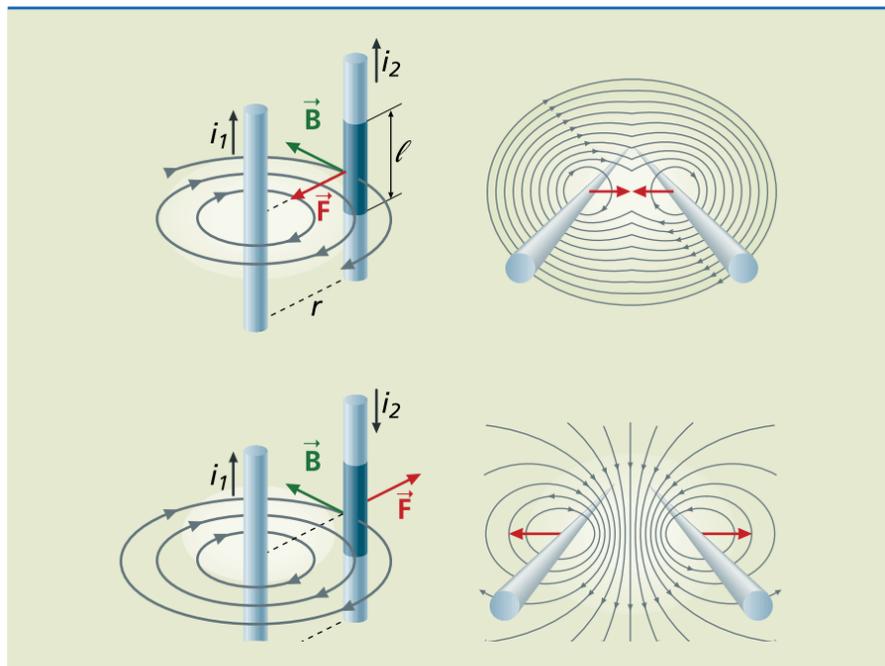


1.3.3 Força magnética entre condutores paralelos

Depois que Örsted demonstrou que uma corrente elétrica influencia um ímã próximo (bússola), o cientista francês André-Marie Ampère fez uma experiência para comprovar se uma corrente elétrica influenciaria outra. Para isso, colocou dois condutores retos paralelos entre si e fez com que duas correntes elétricas atravessassem os fios, ora no mesmo sentido, ora em sentidos opostos (figura 1.43).

Figura 1.43

Força magnética entre condutores paralelos.



Dessa maneira, Ampère concluiu: quando as correntes estão no mesmo sentido, as forças magnéticas que se manifestam são de atração; quando as correntes estão em sentidos opostos, as forças magnéticas são de repulsão.

Assim, considerando um trecho de condutor de comprimento ℓ e a distância r entre os condutores, a força magnética em ambos os casos (atração e repulsão) vale:

$$F_m = \frac{\mu_0 \cdot i_1 \cdot i_2 \cdot \ell}{2\pi r} \quad (1.11)$$

1.3.4 Aplicações práticas da força magnética

O motor elétrico, o galvanômetro de bobina móvel, o relé, o disjuntor, o alto-falante e a gravação magnética são alguns exemplos de aplicações da força magnética.

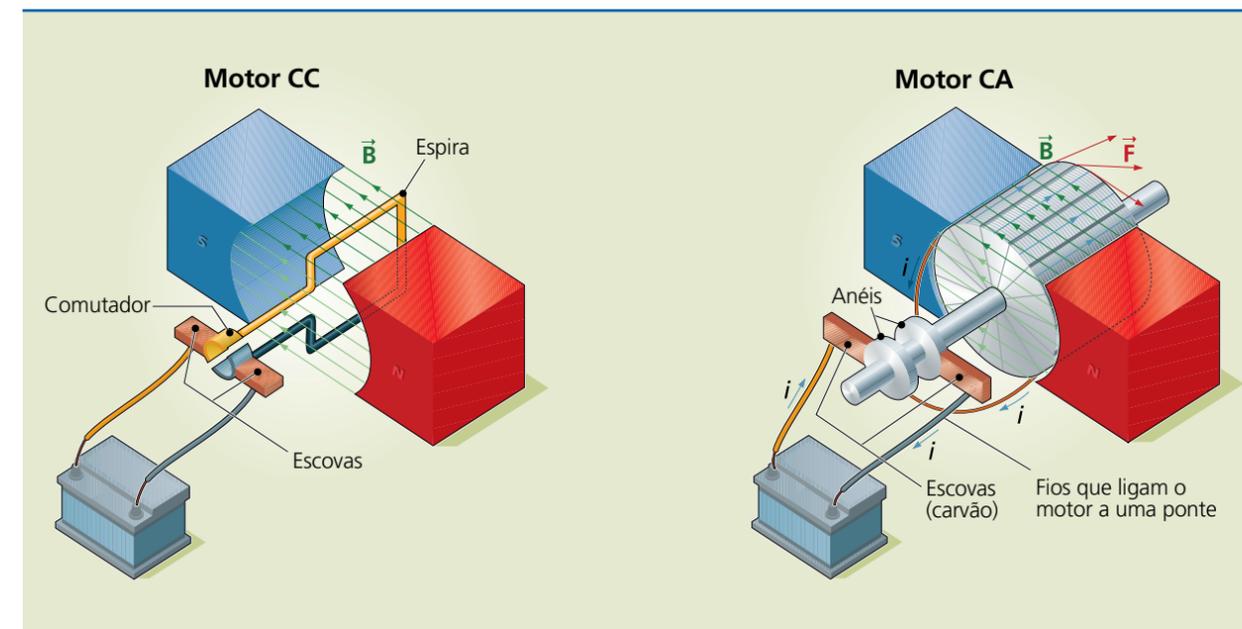
Motor elétrico

Trata-se de um dispositivo que transforma energia elétrica em energia mecânica (movimento de rotação). É composto basicamente de um conjunto de espiras (rotor) imerso em um campo magnético uniforme (estator).

Ao fornecer corrente elétrica às espiras (representadas na figura 1.44 por uma única espira), surge um binário de forças magnéticas que provocam um movimento giratório.

Figura 1.44

Motor elétrico.

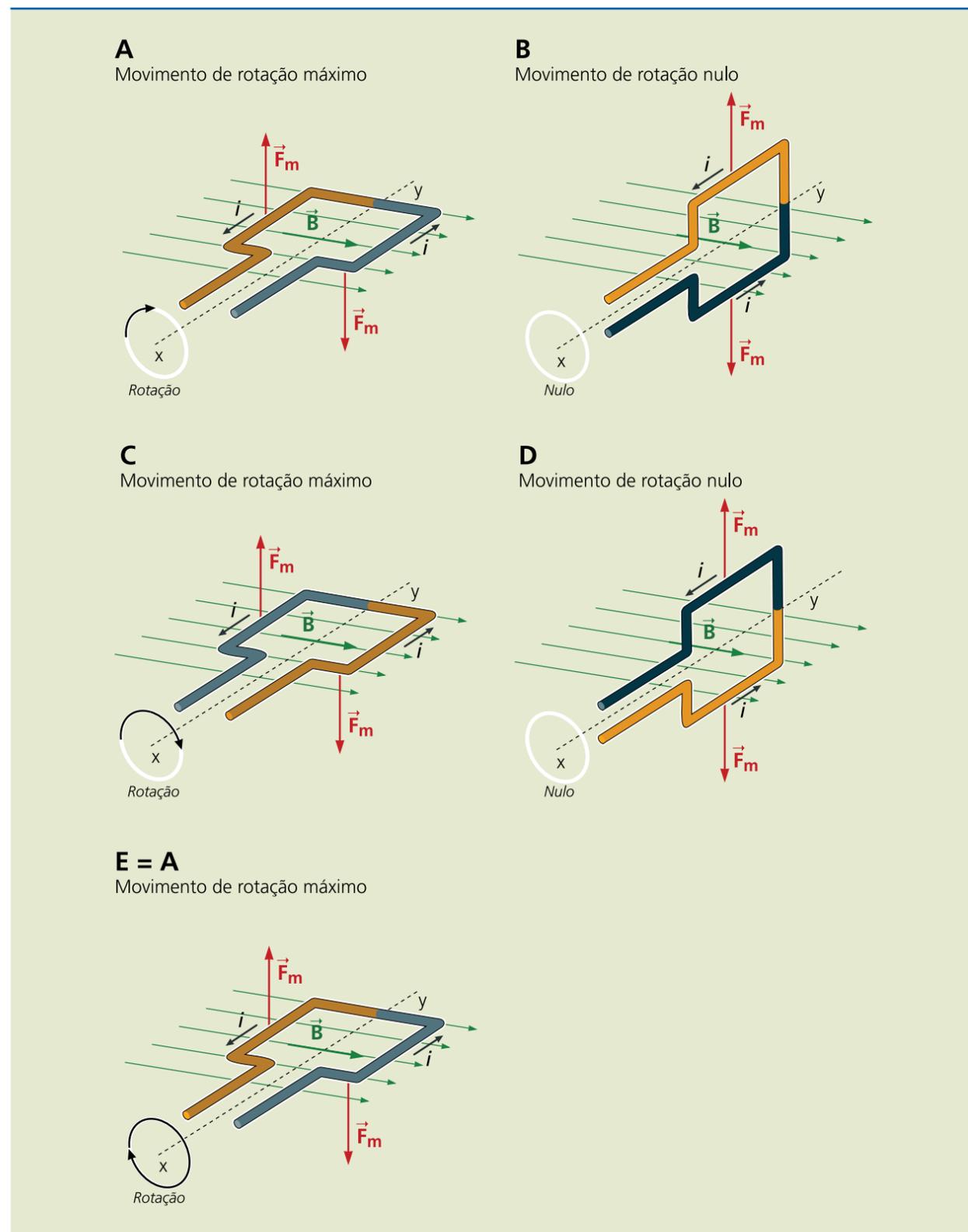


Uma volta completa de uma espira está descrita na figura 1.45, a partir da posição A até a E.



Figura 1.45

Princípio de funcionamento de um motor de corrente contínua (CC).



Como podemos notar, o sentido da força magnética, que é possível determinar pela regra da mão esquerda, faz com que a espira gire. Se o sentido da corrente é invertido, invertem-se o sentido da força e, por conseguinte, o de rotação.

Observando as posições A e C, verificamos que a corrente, apesar de contínua, inverte de sentido na espira (na posição A ela entra pelo lado escuro e sai pelo lado claro, enquanto na C ocorre o contrário). Isso acontece porque o binário de forças deve ser sempre mantido no mesmo sentido, para que a espira possa completar sua volta.

Para isso, os fios que conduzem a corrente são ligados à espira em um dispositivo que permite essa inversão de sentido de corrente, o comutador, utilizado em um motor CC (figura 1.46).

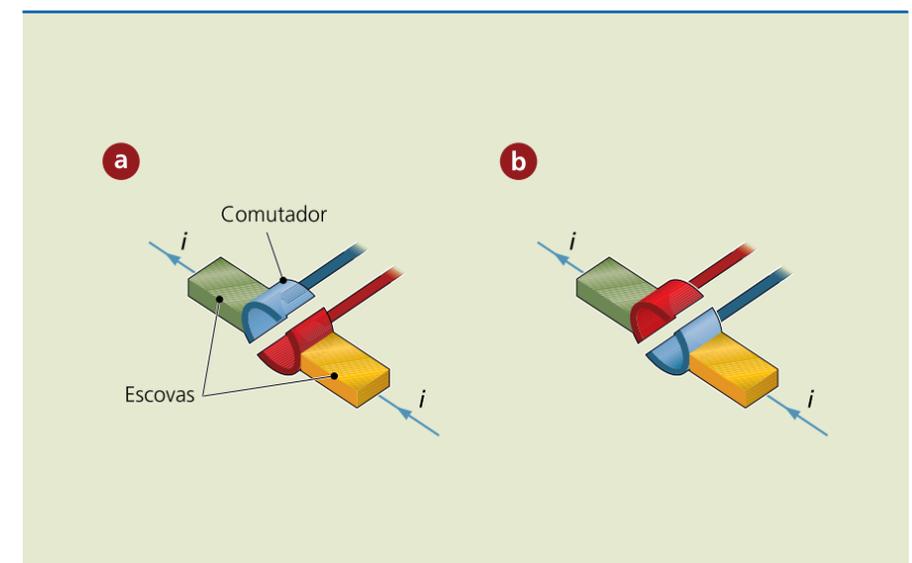


Figura 1.46
Comutador.

O comutador é um anel com um corte, em contato com dispositivos fixos no eixo, denominados escovas, por onde a corrente será fornecida. A cada meia volta, os lados da espira (claro e escuro) sempre estarão em contato com escovas diferentes, invertendo então a corrente elétrica na espira. No caso de um motor de corrente alternada (CA), o comutador não é necessário, pois os anéis são separados.

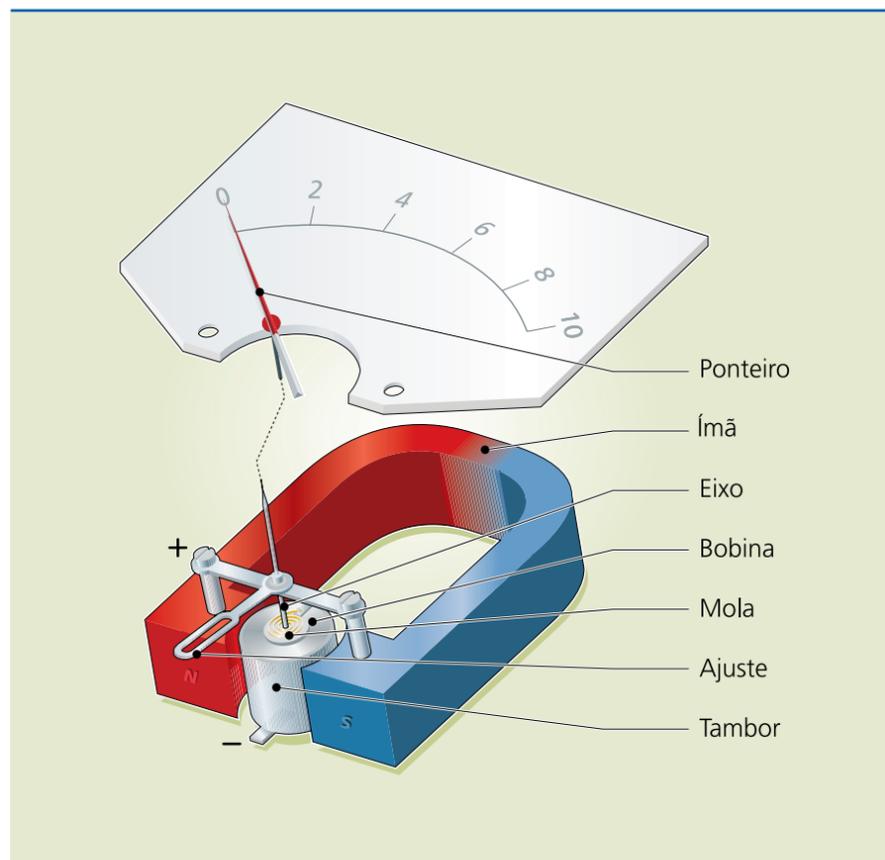
Galvanômetro de bobina móvel

Os instrumentos de medição elétrica de ponteiro possuem um galvanômetro, no qual se observa o mesmo fenômeno do motor CC. Quando a corrente elétrica percorre a bobina, a força magnética movimenta o ponteiro. No entanto, uma mola que age em força contrária à força magnética faz com que o ponteiro pare, revelando o valor da grandeza a ser medida. Quanto maior essa grandeza, maior a deflexão. A figura 1.47 apresenta um modelo-padrão de galvanômetro.



Figura 1.47

Galvanômetro de bobina móvel.

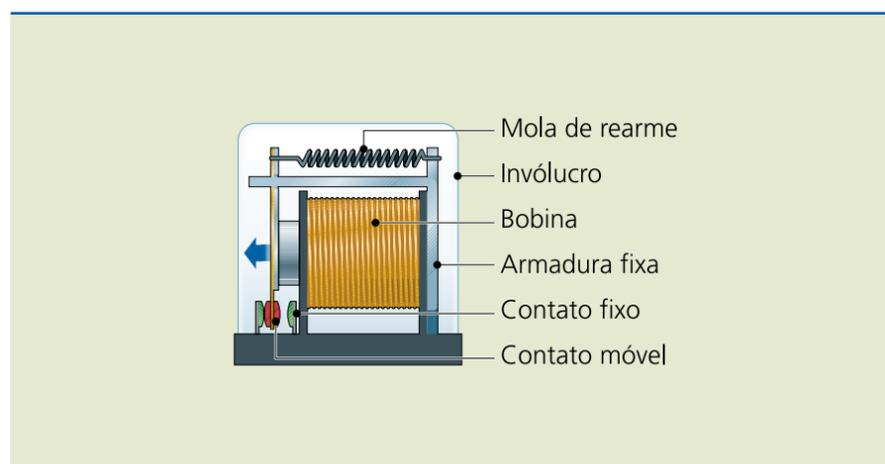


Relé

O princípio de funcionamento de um relé é por meio da ação da força magnética que surge na atração entre a parte móvel e a fixa (figura 1.48).

Figura 1.48

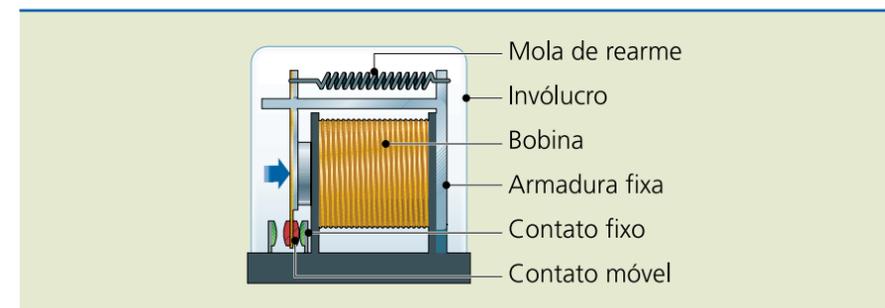
Relé.



Ao energizar a bobina, a corrente elétrica gera um campo magnético que magnetiza o núcleo fixo, tornando-se um eletroímã. O núcleo móvel sente a atração que movimenta os contatos, mudando de posição (figura 1.49).

Figura 1.49

Relé energizado.



Como os contatos móveis estão fixos na parte do núcleo móvel, um contato que antes estava fechado (normalmente fechado – NF) passa a estar aberto, e o outro, que estava aberto (normalmente aberto – NA), passa a estar fechado.

Na figura 1.49, o contato utilizado é um comutador, que possui um elemento em comum (o contato móvel) entre os contatos NF e NA.

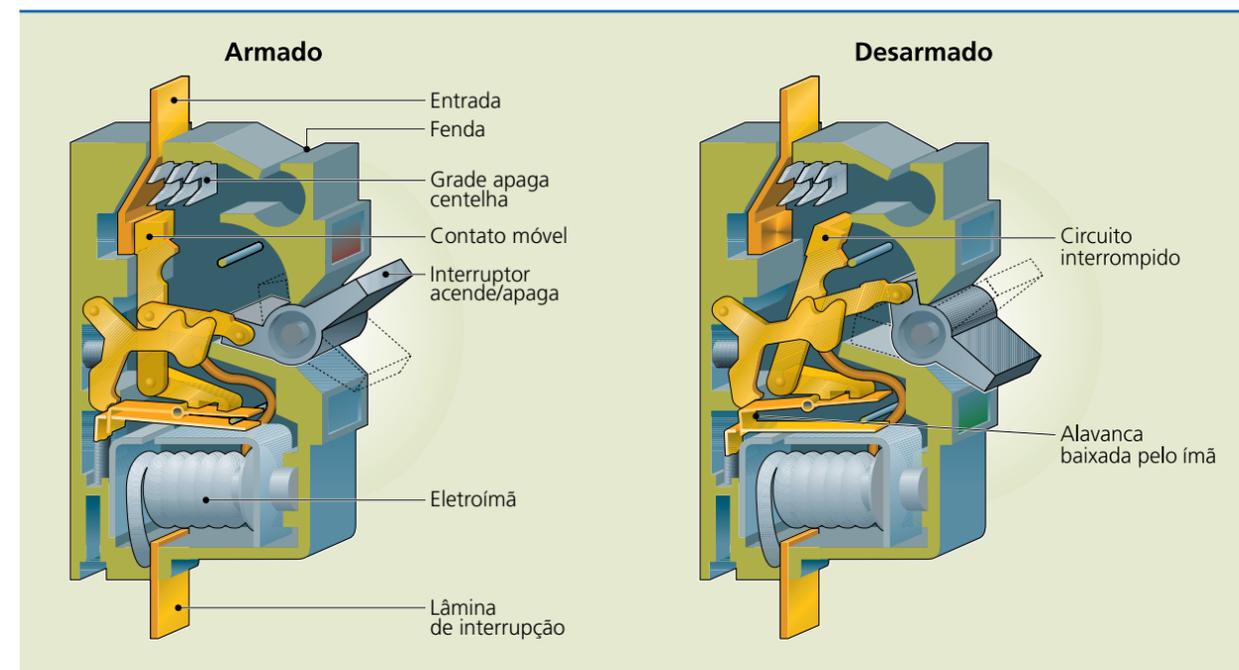
Ao cortar o fornecimento da corrente, uma mola empurra de volta o núcleo móvel, de modo que os contatos voltam a suas posições normais.

Disjuntor

É um dispositivo de proteção da instalação elétrica, que prevenine sobrecargas e curto-circuitos. Internamente, possui um eletroímã para agir em caso de curto-circuito. Quando uma corrente de curto-circuito, que é uma corrente acima do normal, passa pelo eletroímã, um forte campo magnético é gerado, magnetizando o núcleo e fazendo com que uma alavanca desarme o mecanismo do contato móvel (figura 1.50). Todo esse processo ocorre em fração de segundo, para evitar que o curto-circuito danifique a instalação elétrica.

Figura 1.50

Disjuntor.

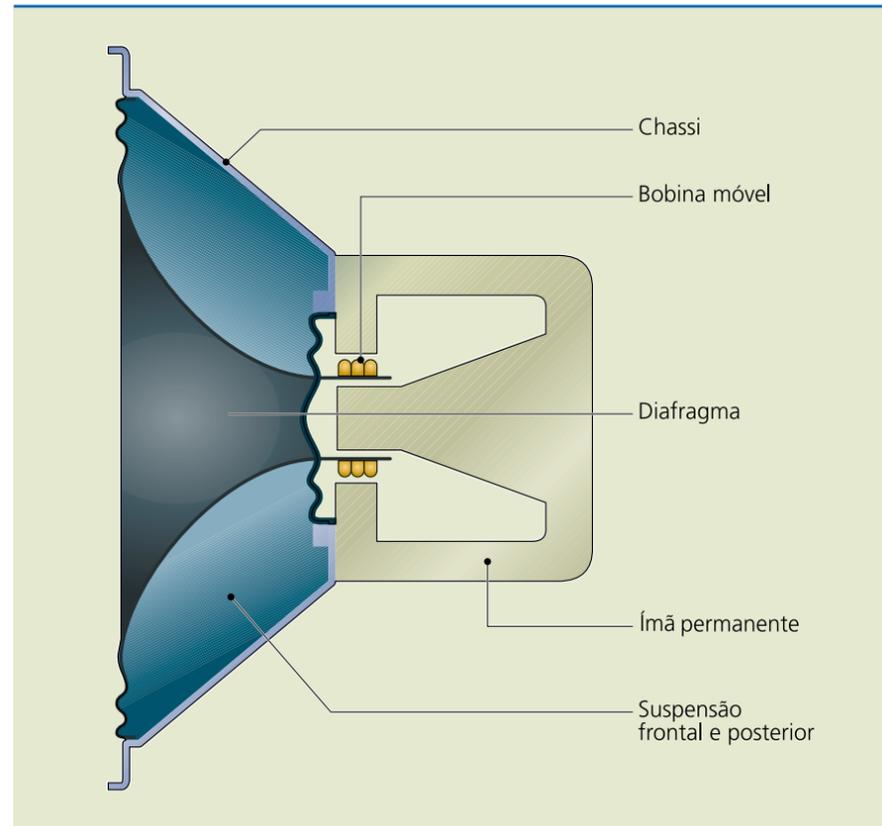


Alto-falante

O alto-falante transforma a energia elétrica em energia sonora. É, portanto, um transdutor que modifica um sinal elétrico em mecânico (ondas sonoras) por eletromagnetismo.

Ele funciona por meio de uma bobina móvel, fixada na parte central do diafragma, que recebe o sinal elétrico enviado do amplificador. Dessa maneira, surge um campo magnético, que interage com o campo magnético do ímã permanente, gerando uma força magnética, que faz com que o diafragma vibre de acordo com a intensidade e frequência do sinal elétrico. Essa vibração se manifesta no ar, sob a forma de ondas sonoras (figura 1.51).

Figura 1.51
Alto-falante de bobina móvel.



Gravação magnética

A gravação magnética é feita sobre uma camada tratada com material magnetizável, ou seja, composto de pequenos ímãs. As fitas magnéticas, os disquetes e os discos rígidos dos microcomputadores, mais conhecidos como HDs (*hard disks*), são cobertos por esse material magnetizável.

No caso dos computadores, no conjunto que protege o HD encontra-se o cabeçote de gravação (figura 1.52). Esse dispositivo é um eletroímã que magnetiza (orienta) os milhões de ímãs presentes no disco. A orientação desses ímãs pode ser interpretada como a gravação dos dados.



Figura 1.52
Cabeçote de gravação magnética de HD.

1.4 Indução eletromagnética

Com as experiências de Öersted e Ampère, descobriu-se que uma corrente elétrica pode gerar magnetismo. O físico inglês Michael Faraday realizou experimentos que comprovaram o efeito contrário: o magnetismo poderia gerar eletricidade (naquela época, a eletricidade só era obtida por meio de baterias e pilhas).

Faraday montou o circuito apresentado na figura 1.53.

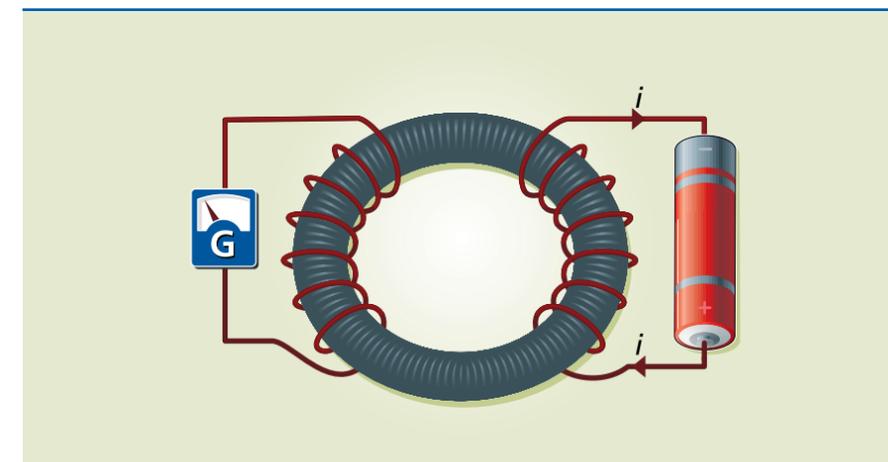


Figura 1.53
Experiência de Faraday.

Nele, a bateria fornece corrente elétrica para um enrolamento, gerando, consequentemente, um campo magnético que seria transportado para outro enrolamento ligado a um galvanômetro. O detalhe é que, como os dois enrolamentos compartilhariam o mesmo núcleo magnético – o anel –, o segundo receberia o campo magnético do primeiro, fazendo surgir uma corrente que seria lida pelo galvanômetro.



A experiência, porém, não deu certo, porque, pelo que vimos antes, faltou um componente importantíssimo.

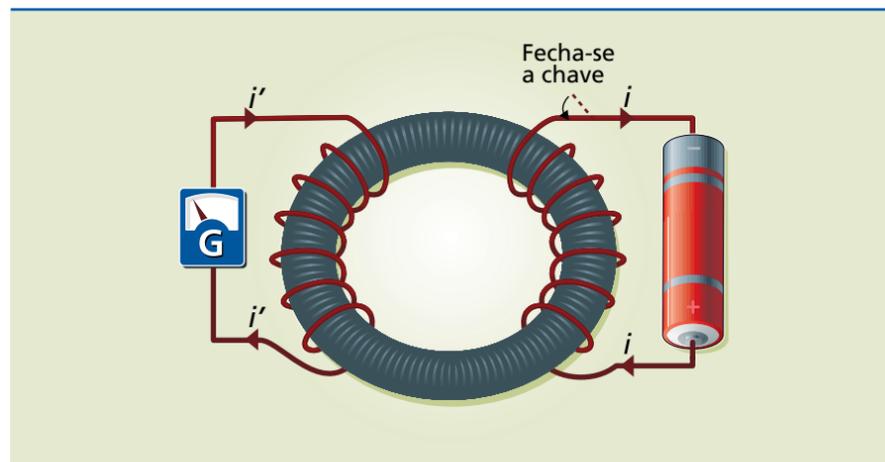
Vamos rever os fenômenos já estudados:
 campo magnético (magnetismo) = eletricidade + movimento
 força magnética (movimento) = magnetismo + eletricidade

Portanto, para gerar eletricidade, não basta o magnetismo; é necessário também o movimento. Como as baterias e pilhas fornecem tensão contínua, para obter o movimento (variação), é necessário incluir um interruptor. Foi o que Faraday fez, anos depois (figura 1.54).

No instante em que a chave (interruptor) fecha, ocorre uma variação – a corrente da bateria passa de zero a um valor qualquer – e, durante o intervalo do fechamento da chave, é gerada no segundo enrolamento uma corrente elétrica, chamada corrente induzida.

Figura 1.54

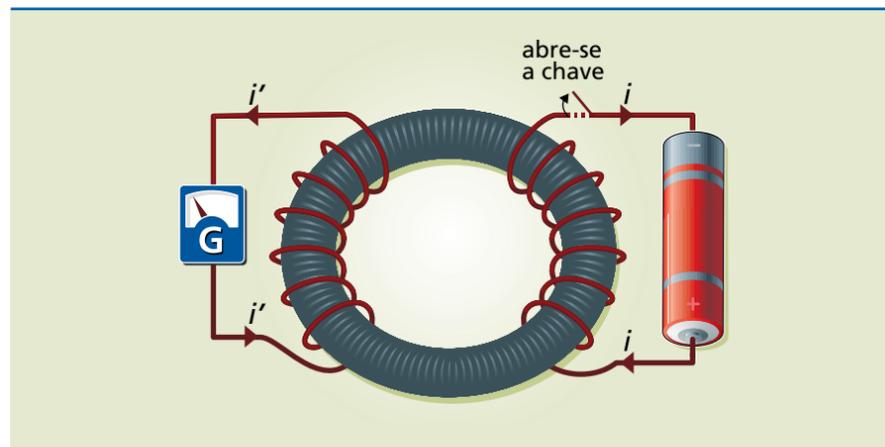
Princípio da indução eletromagnética.



Após esse tempo, não existe mais corrente no galvanômetro. Se a chave é aberta, durante o tempo de abertura (movimento), surge uma corrente no galvanômetro, mas com sentido contrário ao do caso anterior (figura 1.55).

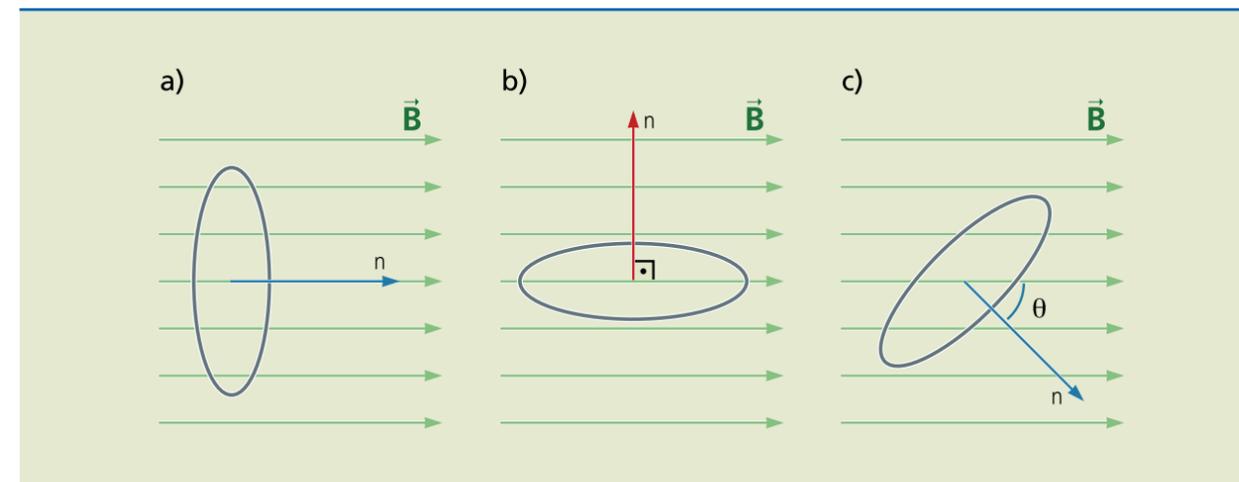
Figura 1.55

Geração da corrente induzida.



Faraday concluiu então que só há geração de eletricidade se ocorrer variação de uma grandeza associada ao campo magnético. Essa grandeza é o fluxo magnético (Φ), que nada mais é do que o número de linhas de indução dentro de uma área conhecida (figura 1.56).

Figura 1.56
Fluxo magnético.



Vamos analisar como o fluxo magnético varia:

- Considerando a figura 1.56a, o campo magnético está paralelo ao plano da área circular A (para verificar mais facilmente, foi colocado perpendicularmente ao plano da circunferência um vetor \vec{n} – normal). O ângulo entre o vetor normal e o campo B vale zero. Nesse caso, o máximo de linhas de indução atravessa a área A: o fluxo então é máximo;
- Na figura 1.56b, nenhuma linha atravessa a área A. O ângulo é de 90° e o fluxo vale zero.
- Na figura 1.56c, parte das linhas atravessa a área A.

Com base nessa análise, podemos concluir que o fluxo magnético depende:

- do campo magnético (T);
- da área (m^2) que as linhas atravessam;
- da posição entre a área e as linhas de indução (θ).

Calcula-se o fluxo magnético, medido em weber (Wb), pela seguinte fórmula:

$$\phi = B \cdot A \cdot \cos \theta \quad (1.12)$$

A geração de energia elétrica por meio do magnetismo é chamada de indução eletromagnética, mas como ela surge? Para entendê-la, vamos acompanhar as figuras 1.57 e 1.58, que apresentam passo a passo a geração da tensão elétrica.

Na figura 1.57, um condutor metálico está imerso em um campo magnético uniforme. Quando se movimentar esse condutor a uma velocidade v, seus elétrons livres também se movimentam à mesma velocidade.



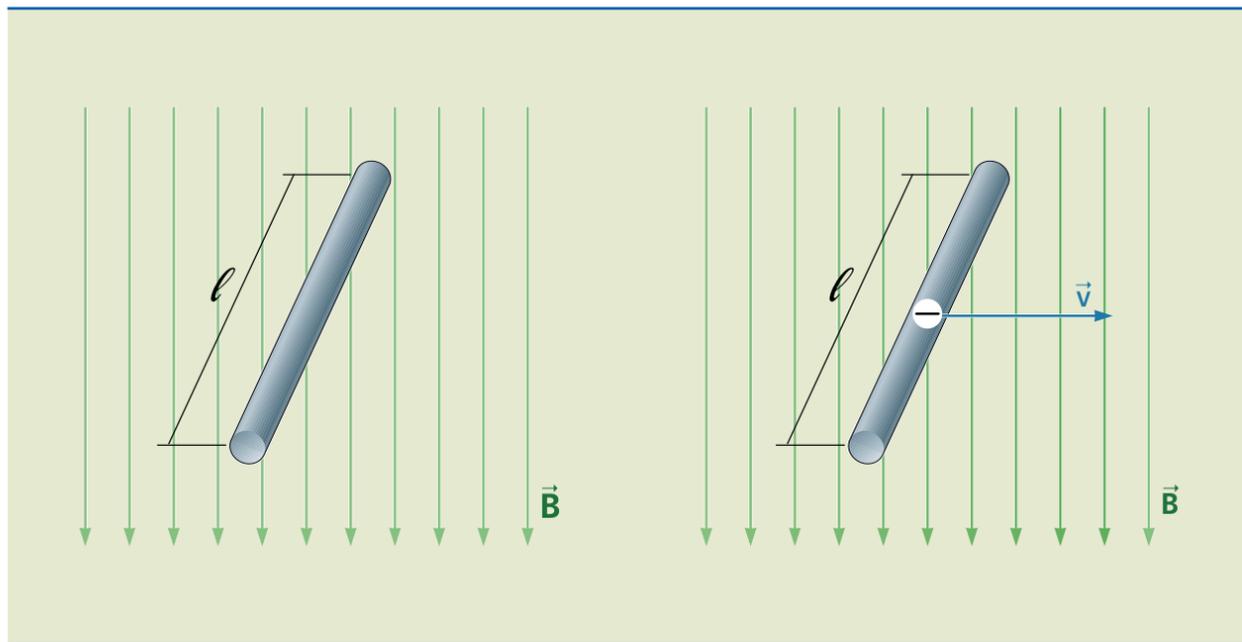


Figura 1.57

Geração da tensão induzida – parte 1.

Com isso, surgem campos magnéticos ao redor dos elétrons, que interagem com o campo uniforme \vec{B} , fazendo com que se manifeste uma força magnética \vec{F}_m . Essa força magnética, por sua vez, empurra os elétrons para uma das extremidades do condutor.

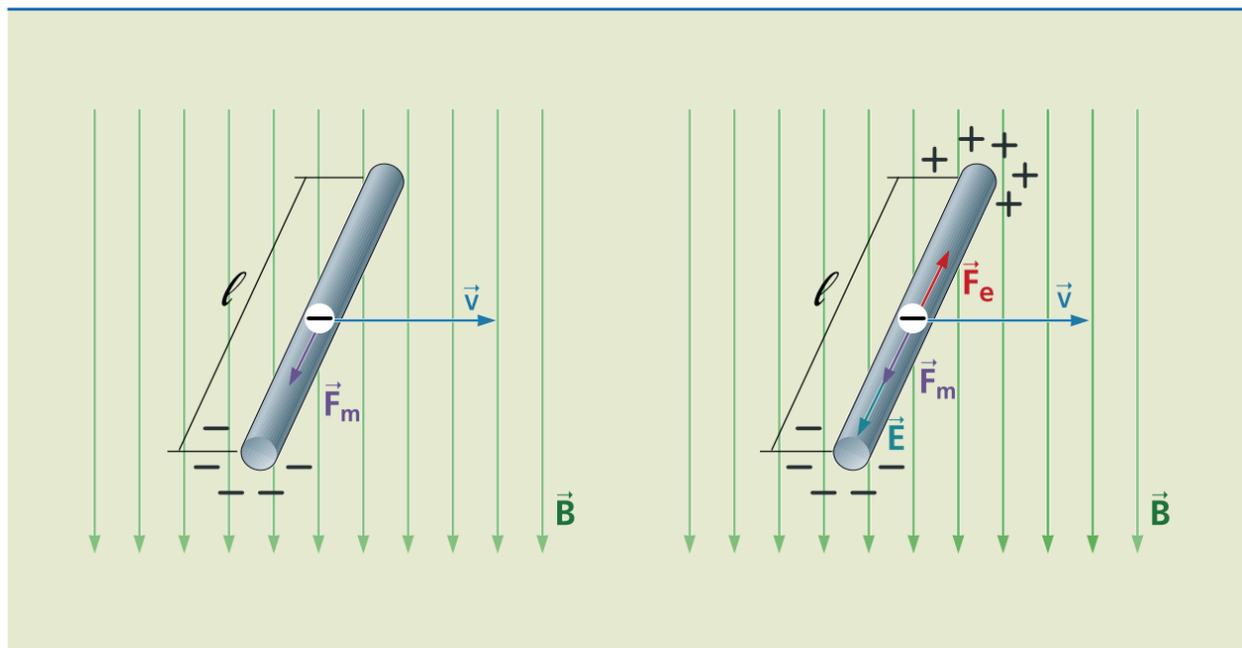


Figura 1.58

Geração da tensão induzida – parte 2.

Com falta de elétrons na outra extremidade, surge um campo elétrico \vec{E} , fazendo com que os elétrons fiquem submetidos a uma força elétrica \vec{F}_e , de sentido contrário ao da força magnética. Enquanto as forças não entrarem em equilíbrio, essa separação de cargas continua.

Como o campo elétrico no interior do condutor não será nulo, entre os terminais do condutor existirá uma diferença de potencial, que é a tensão induzida e .

A tensão induzida vale:

$$e = B \cdot l \cdot v \quad (1.13)$$

em que:

- e é a tensão induzida, em volt (V);
- B , o campo magnético, em tesla (T);
- l , o comprimento do condutor, em metro (m);
- v , a velocidade com que o condutor se move, em metro por segundo (m/s).

1.4.1 Lei de Lenz

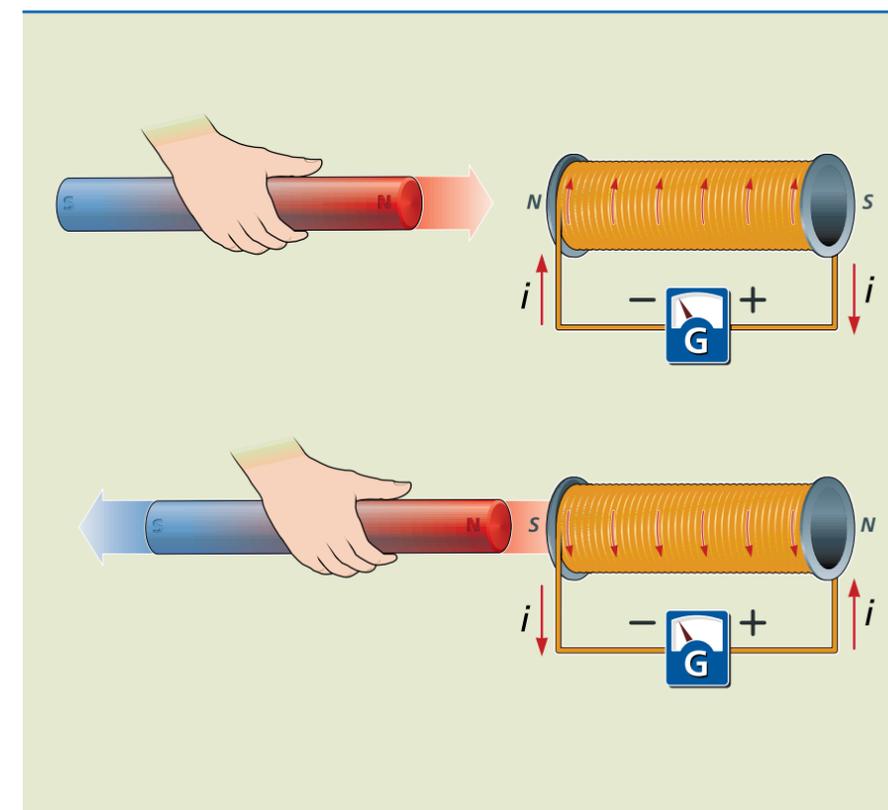


Figura 1.59

Lei de Lenz.

A figura 1.59 mostra que, ao aproximar ou afastar um ímã de uma bobina, verifica-se no galvanômetro a geração de uma tensão na bobina. Essa tensão induzida depende da variação do fluxo magnético e do tempo em que tal variação acontece.

Além disso, quando se aproxima o ímã da bobina, a corrente induzida na bobina cria um campo magnético que tende a repelir o ímã e, quando se afasta o ímã, surge na bobina um campo induzido que tende a atrair o ímã.



Em razão desse comportamento, também é possível determinar o sentido da corrente induzida com a regra da mão direita, que relaciona campo magnético e corrente elétrica. Todas essas informações podem ser reunidas em uma fórmula, a lei de Faraday-Neumann:

$$e = -\frac{\Delta\phi}{\Delta t} \quad (1.14)$$

em que:

- e é a tensão induzida, em volt (V);
- $\Delta\phi$, a variação do fluxo magnético, em weber (Wb);
- Δt , a variação do tempo, em segundo (s).

O sinal negativo da fórmula representa a oposição que o fluxo magnético induzido cria com relação ao campo indutor (ímã aproximando-se ou afastando-se). Essa oposição é a lei de Lenz.

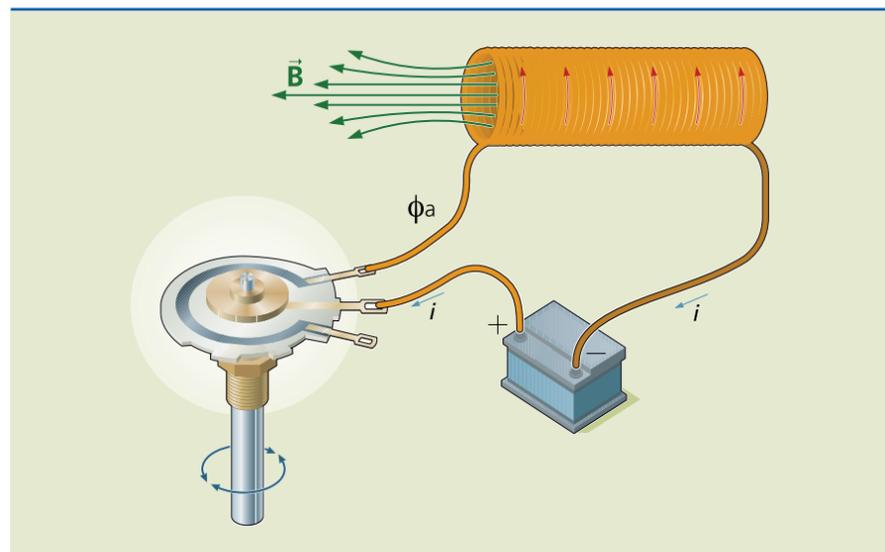
1.4.2 Autoindução

A autoindução foi descoberta no século XIX pelo cientista norte-americano Joseph Henry. Lembrando as experiências de Faraday representadas nas figuras 1.53 a 1.55, há dois circuitos bem distintos:

- **Circuito indutor:** aquele com a bateria e o interruptor, que vai gerar o campo magnético variável.
- **Circuito induzido:** aquele que receberá o campo do outro circuito e induzirá a corrente.

A autoindução acontece quando em um mesmo circuito há ao mesmo tempo o circuito indutor e o circuito induzido (figura 1.60).

Figura 1.60
Autoindução.



Analisando o circuito da figura 1.60, percebe-se que, se ocorre variação na resistência do potenciômetro, a corrente elétrica do circuito também varia, assim como o campo magnético e seu fluxo. Como há variação de fluxo magnético, surge no próprio circuito, no caso da bobina, um fluxo magnético autoinduzido, que vale:

$$\Phi_a = L \cdot i \quad (1.15)$$

em que:

- Φ_a é o fluxo magnético autoinduzido, em weber (Wb);
- L , a indutância, em henry (H).

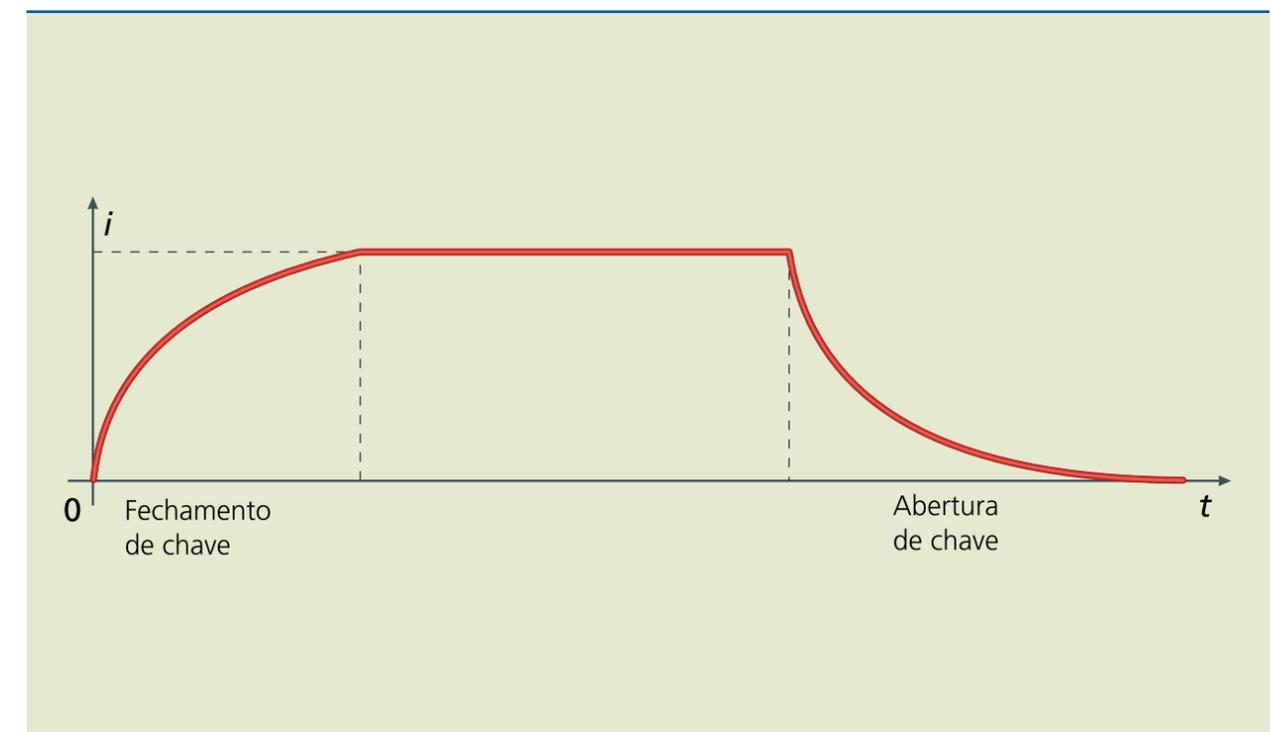
Portanto, autoindução ou indutância é a capacidade que um condutor possui de autoinduzir uma tensão elétrica quando a corrente elétrica que o percorre varia com o tempo:

$$e_a = -\frac{\Delta\phi_a}{\Delta t} = -L \cdot \frac{\Delta i}{\Delta t} \quad (1.16)$$

em que e_a é a tensão autoinduzida, em volts (V).

Isso significa que o sentido de e_a é contrário ao da tensão aplicada no condutor. Em alguns livros, a tensão autoinduzida é denominada força contraeletromotriz (f.c.e.m.). Essa força provoca certo atraso no estabelecimento da corrente em um circuito, assim como ocorre em um desligamento (figura 1.61).

Figura 1.61
Corrente autoinduzida.



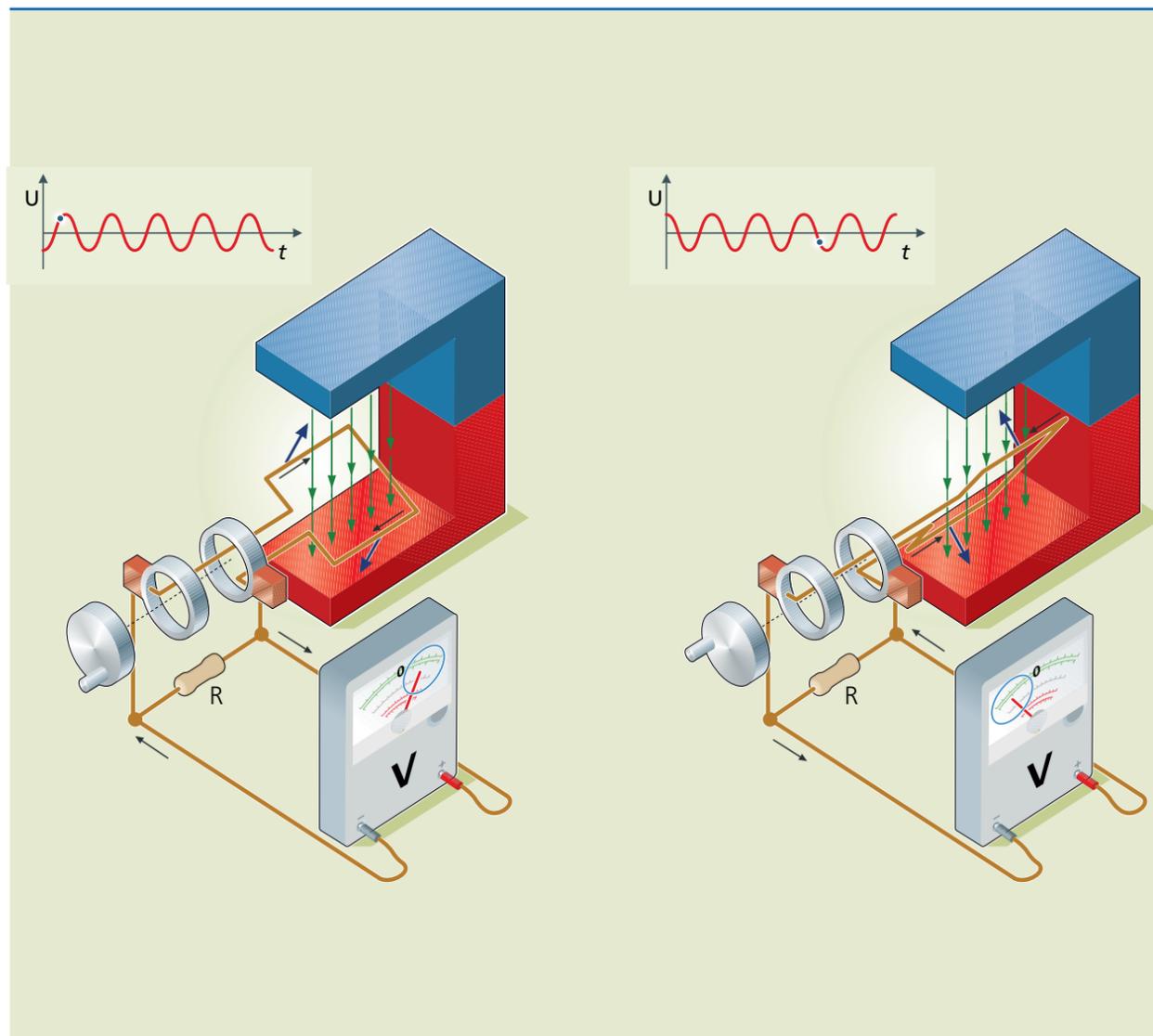
1.4.3 Aplicações práticas da indução eletromagnética

Apresentam-se a seguir as principais aplicações práticas da indução eletromagnética.

Gerador elétrico

Figura 1.62
Gerador CA.

Ao contrário do motor, o gerador elétrico transforma energia mecânica em energia elétrica.



No circuito da figura 1.62, uma manivela produz a energia mecânica externa necessária para girar as espiras que compõem o rotor. Como elas estão imersas em um campo magnético uniforme, há geração de tensão e corrente elétrica. Vimos que na indução eletromagnética a corrente inverte de sentido. Nesse caso, a tensão e a corrente geradas são denominadas alternadas, pois elas invertem de sentido com o tempo.

Os geradores utilizados nas usinas hidroelétricas e termoeletricas geram energia elétrica com base nesse princípio (figura 1.63). As hidroelétricas usam energia da água, e as termoeletricas, combustíveis fósseis ou energia nuclear para produzir o vapor que faz girar o rotor.

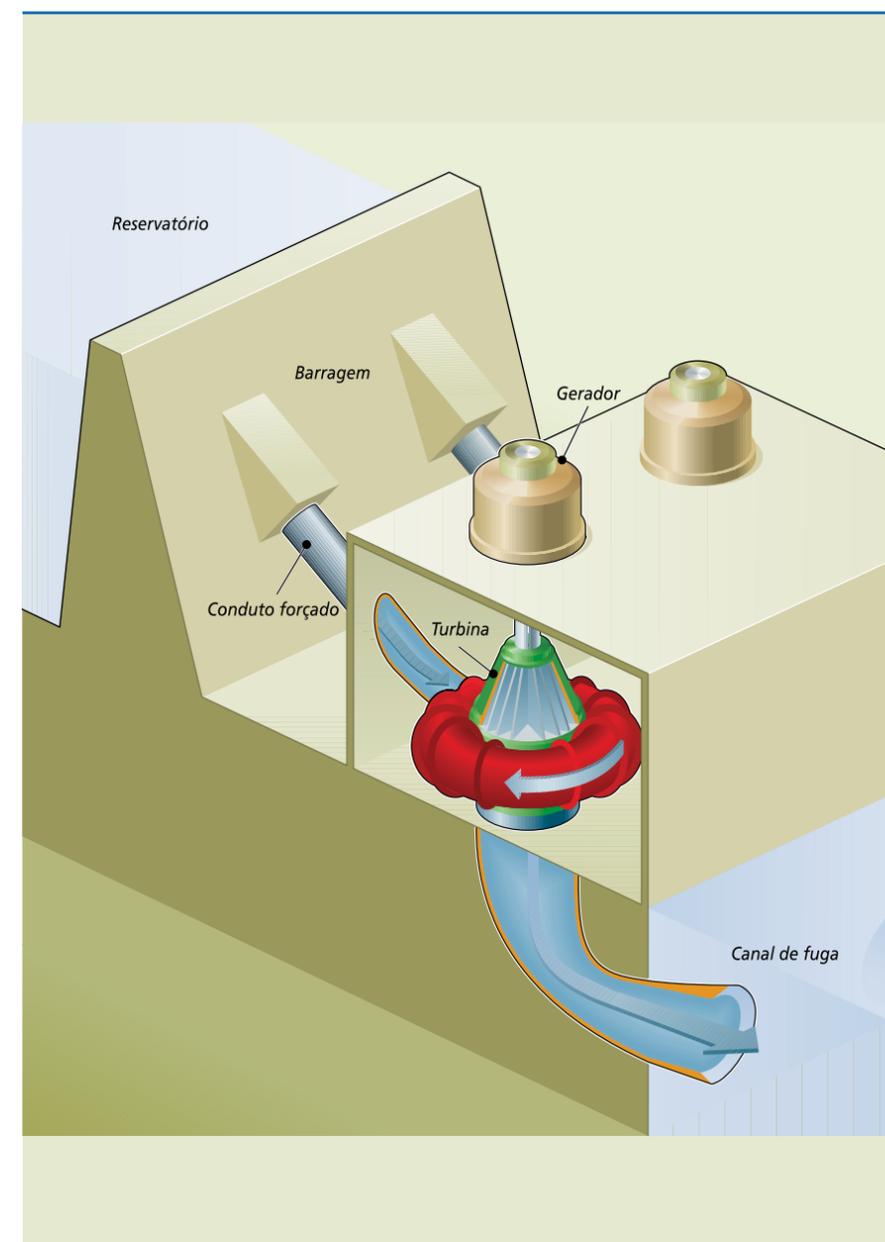


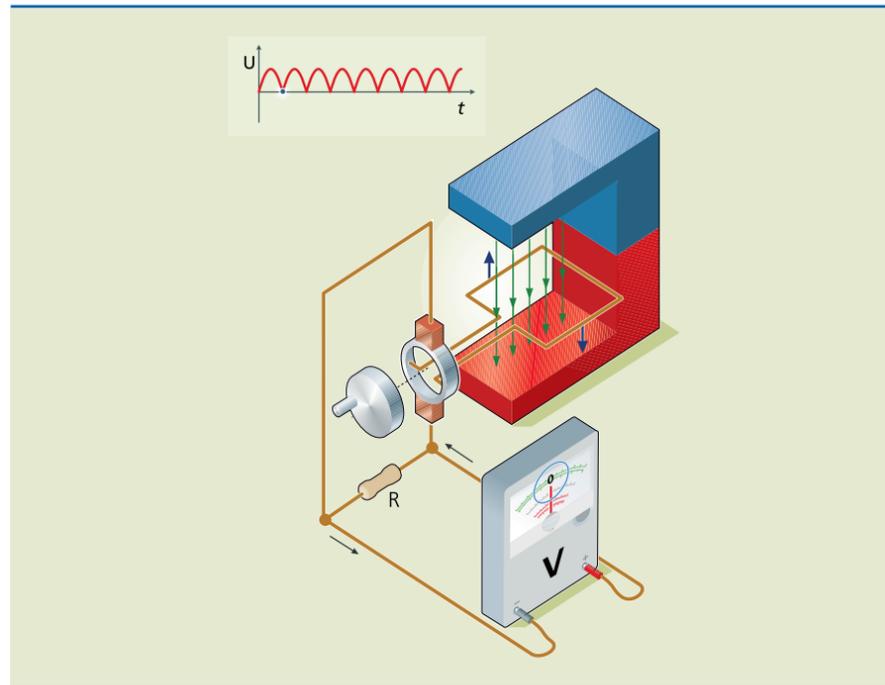
Figura 1.63
Gerador em usina hidroelétrica.

Agora, vamos considerar uma situação em que os anéis coletores são substituídos por um comutador. Nesse caso, a tensão e a corrente geradas são contínuas (não invertem de sentido), apesar de serem pulsantes, como mostra a figura 1.64.

O dínamo que carrega a bateria dos veículos automotores funciona com base nesse princípio; a energia mecânica rotativa é obtida por meio do acoplamento com eixo do motor.



Figura 1.64
Gerador CC.



Reprodução magnética

Como vimos, o cabeçote de gravação de um HD (figura 1.65) é um eletroímã, que, além de magnetizar os milhões de ímãs presentes no disco, pode ser utilizado para ler dados gravados no disco rígido, no CD, no DVD etc. Tal leitura é possível porque esses dados geram um campo magnético, devido a sua orientação, que, associado ao movimento do disco, faz com que surja uma tensão elétrica no cabeçote de leitura.

Figura 1.65
Cabeçote de reprodução magnética de HD.



Bobina de indução

A autoindução pode ser utilizada para gerar altas tensões. Para isso, usa-se uma bobina de autoindução, que consiste em um solenoide composto por um fio grosso, ligado a uma bateria por uma chave (figura 1.66).

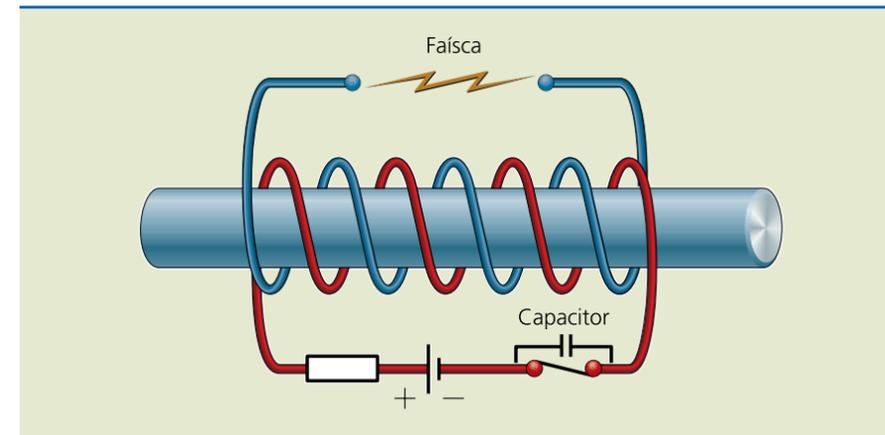


Figura 1.66
Bobina de indução.

Esse circuito funciona da seguinte maneira: ao interromper o circuito, surge uma força contraeletromotriz. Como a indutância é alta e o tempo em que isso ocorre é baixo, o valor da tensão induzida também é alto, podendo chegar a milhares de volts. O capacitor em paralelo com o interruptor serve para diminuir o efeito retardatório da interrupção do circuito.

Um exemplo de aplicação é o circuito de ignição de motores a explosão.

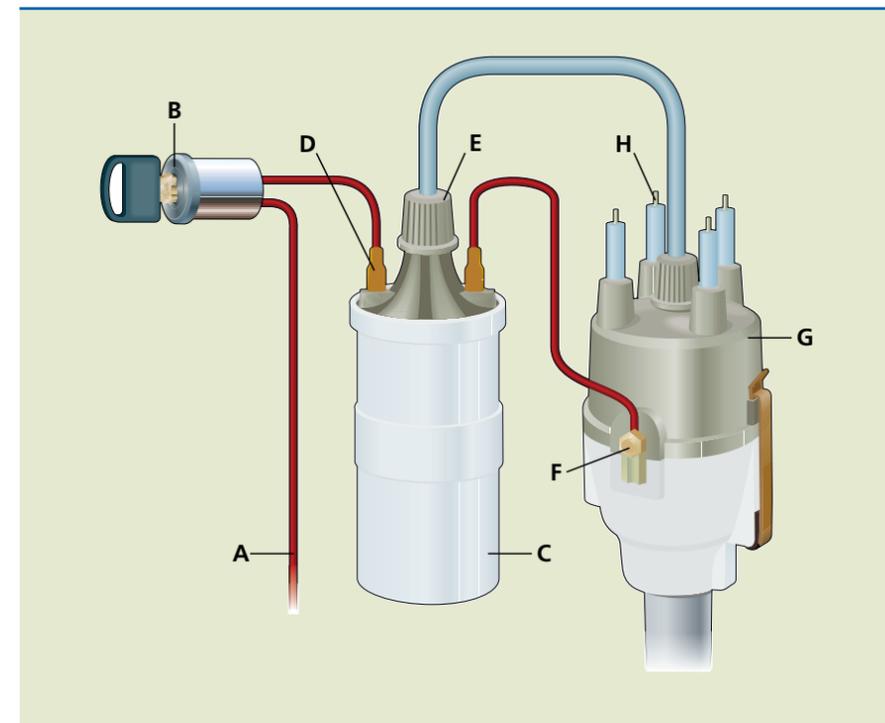


Figura 1.67
Circuito de ignição dos motores a explosão que utilizam distribuidor. Nos carros mais modernos o distribuidor foi substituído pela injeção eletrônica.

A figura 1.67 apresenta as partes principais do circuito de ignição. A alimentação proveniente da bateria (A) passa por um interruptor (B) que está associado à chave de ignição do carro. Antes de chegar à bobina (C), a alimentação passa pelo terminal de baixa tensão (D). Observe que o distribuidor (G), que leva a tensão às velas de ignição, também possui um terminal de baixa tensão (F).



A bobina tem alta indutância, fazendo com que, juntamente com o tempo decorrido da interrupção de alimentação (controlado por um circuito eletrônico), a tensão da bateria se eleve no terminal de alta tensão (E). Essa tensão elevada pode chegar a milhares de volts.

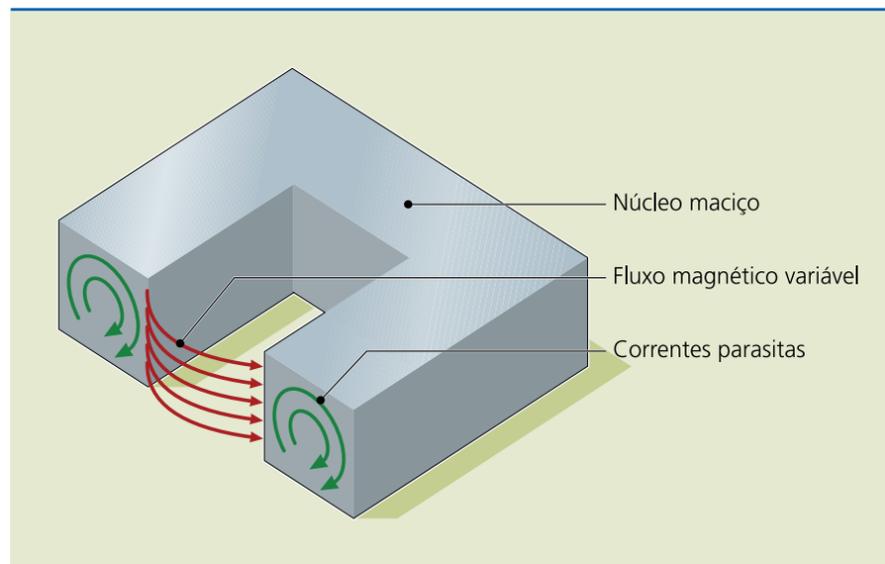
A alta tensão da bobina chega em picos ao distribuidor (G) pelo terminal central. O distribuidor, por sua vez, em determinada sequência, transfere esses picos de tensão às velas de ignição por meio de cabos de alta tensão (H) para gerar a explosão durante a mistura ar-combustível, fazendo o motor se mover.

Forno de indução

O princípio da indução eletromagnética pode ser utilizado para fundir uma peça metálica. Para isso, é preciso submeter a peça metálica maciça a um campo magnético variável de grande intensidade. Dessa maneira, surgirá no interior da peça pequenas correntes elétricas, conhecidas como correntes de Foucault ou correntes parasitas (figura 1.68).

Figura 1.68

Correntes parasitas.



Se a seção transversal da peça for grande, de acordo com a lei de Ohm, sua resistência elétrica será pequena, e as correntes parasitas possuirão intensidade capaz de fundir a peça por meio do efeito Joule.

Transformador

Utilizado para elevar ou abaixar os valores da tensão e da corrente elétrica em determinadas partes do circuito, esse dispositivo é composto por dois enrolamentos que compartilham o mesmo núcleo magnético (figura 1.69).

Embora parecido com o circuito da experiência de Faraday, o transformador não necessita de um interruptor para causar variação no campo magnético, pois a tensão a ser transformada é alternada.

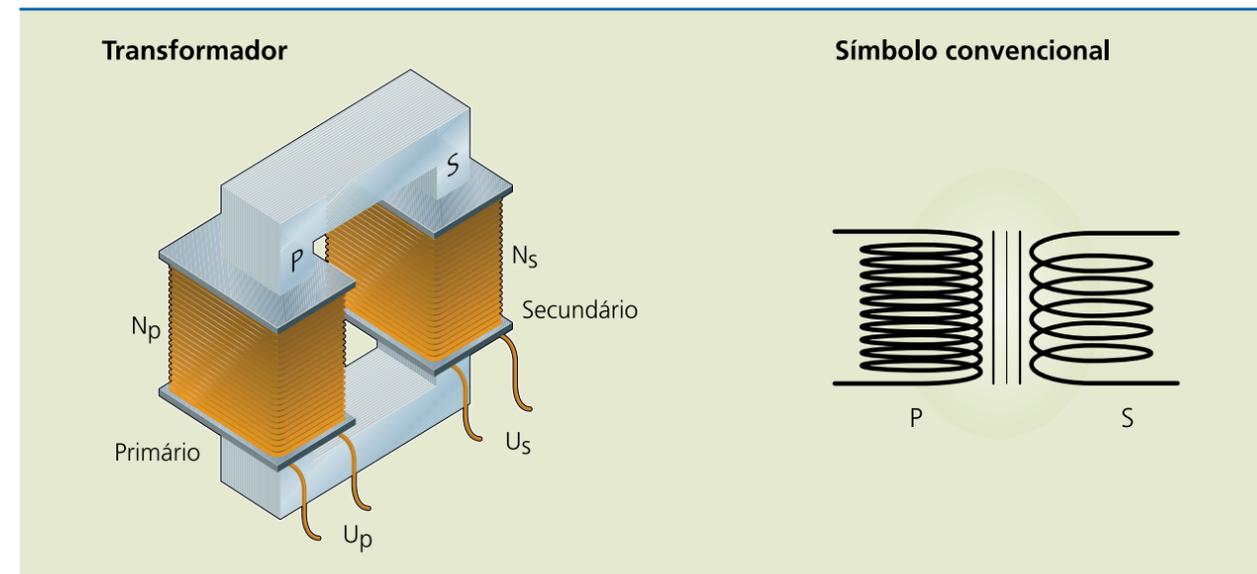


Figura 1.69

Transformador monofásico.

O enrolamento que recebe a tensão da rede é o enrolamento primário, e o que fornece a tensão para a carga, o secundário. A mudança de valores de tensão e corrente é obtida pelo número de voltas (espiras) que cada enrolamento possui, de acordo com a seguinte regra:

- Se o enrolamento secundário possui menos voltas que o primário, o transformador é do tipo que abaixa a tensão.
- Se o enrolamento secundário possui mais voltas que o primário, o transformador é do tipo que eleva a tensão.

Essa regra pode ser descrita como a relação de transformação (RT):

$$RT = \frac{U_P}{U_S} = \frac{N_P}{N_S} = \frac{I_S}{I_P} \quad (1.17)$$

em que:

- U_P é a tensão no enrolamento primário (V);
- U_S , a tensão no enrolamento secundário (V);
- N_P , o número de espiras no enrolamento primário;
- N_S , o número de espiras no enrolamento secundário;
- I_P , a corrente no enrolamento primário (A);
- I_S , a corrente no enrolamento secundário (A).

Perceba que a relação de transformação de corrente é inversa à da tensão, pois a diferença entre potência elétrica primária e secundária deve ser a menor possível para que o transformador tenha eficiência máxima, isto é, para que seja capaz de transformar a tensão elétrica com pouco consumo de energia.

O transformador será abordado com mais detalhes na seção 1.6.

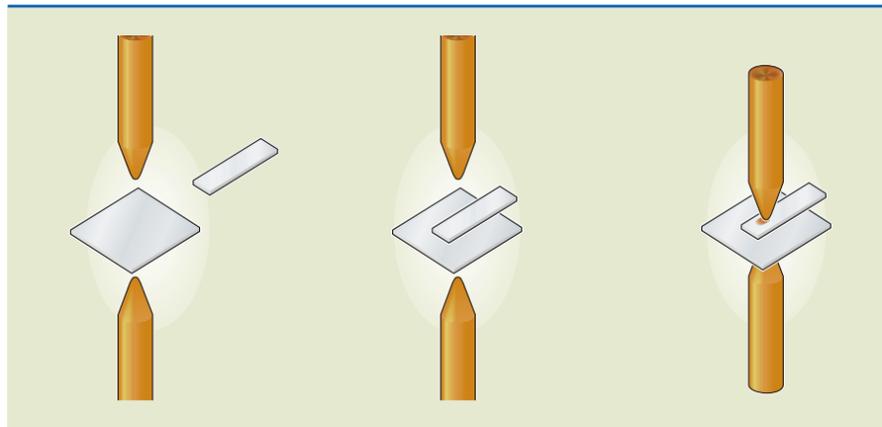


Ponteadeira

Também chamada de solda a ponto, a ponteadeira é bastante utilizada na indústria automobilística para união de chapas. Seu princípio de funcionamento baseia-se no funcionamento do transformador, com o enrolamento secundário possuindo menos espiras que o primário; assim, a corrente elétrica é mais elevada.

Figura 1.70

Ponteadeira:
fusão de chapas.



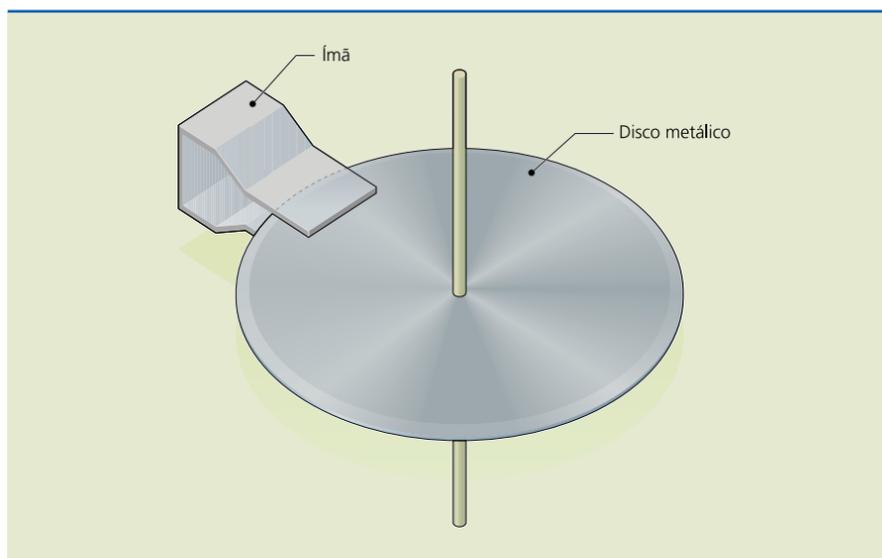
A ponteadeira funde duas chapas sem a necessidade de outro material (figura 1.70). Para isso, ao aproximar os dois eletrodos das chapas que se deseja unir, uma corrente elétrica as percorre, e a temperatura nesse ponto se eleva, fundindo-as sem que seja necessário adicionar outro material, como acontece em uma solda elétrica ou com estanho.

Freio magnético

As correntes parasitas podem ser utilizadas para a construção de um freio magnético (figura 1.71).

Figura 1.71

Princípio do freio magnético.



Ao colocar uma peça maciça, como um disco metálico, em movimento dentro de um campo magnético (gerado pelo ímã permanente), as correntes parasitas que surgem geram outro campo magnético. Como há interação de campos magnéticos (do ímã permanente e das correntes parasitas), uma força magnética entra em oposição ao movimento (lei de Lenz), tendendo a frear o disco.

Os freios magnéticos são utilizados em máquinas operatrizes com CNC (comando numérico computadorizado, torno, fresa, retífica) e bicicletas ergométricas.

Relógio de medição de energia elétrica

Nas residências, o aparelho que mede a energia elétrica é o relógio de medição (figura 1.72). Normalmente, ele se localiza próximo ao poste que recebe a fiação que alimenta a rede elétrica da residência.



Figura 1.72

Relógio de medição
de energia elétrica.

O mecanismo de registro do consumo de energia é acionado por uma engrenagem, ligada ao eixo do circuito induzido. Um disco metálico fica submetido a diversos campos magnéticos alternados, fazendo surgir correntes parasitas que provocam o movimento de rotação do disco. Conforme a velocidade com que esse disco se movimenta, ele aciona um sistema de engrenagens que registra o valor em quilowatt-hora (kWh) consumido em determinado período, em geral um mês.

Alicate-amperímetro

Muitas vezes é necessário medir a corrente elétrica sem interromper o circuito para ligar o amperímetro convencional. Nessas ocasiões, costuma-se utilizar o alicate-amperímetro digital (figura 1.73). Esse equipamento mede a corrente que percorre o campo magnético ao redor do fio sem a necessidade de fazer ligação em série.

No modelo da figura 1.73, quando o botão lateral é acionado, as pontas em formato de garra se abrem. Entre elas, coloca-se o fio cuja corrente elétrica se deseja avaliar. Como a corrente elétrica ao percorrer um fio gera campo magnético, o mecanismo indutivo do aparelho sente a ação desse campo e registra o valor da corrente no visor digital.



Figura 1.73

Alicate-amperímetro.



Vale salientar que o alicate-amperímetro mede apenas corrente alternada, e o núcleo que compõe as garras é laminado, para que as perdas por correntes de parasitas sejam minimizadas.

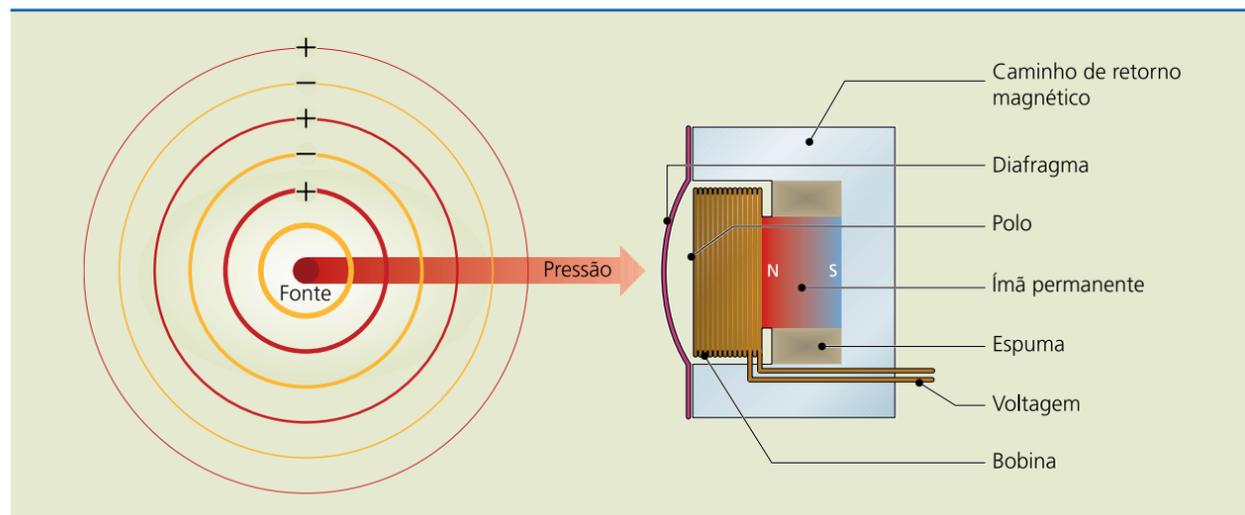
Microfone

Esse dispositivo funciona por indução eletromagnética, convertendo energia sonora em energia elétrica, ou seja, o contrário do alto-falante.

O microfone do tipo dinâmico é composto por um diafragma acoplado a uma pequena bobina imersa em um campo magnético uniforme (figura 1.74). Quando o som atinge o diafragma, provoca vibrações nessa membrana e, conseqüentemente, a bobina também se move. Por estar imersa em um campo magnético uniforme, esse movimento induz uma tensão em seus terminais, que varia em intensidade e frequência proporcionais à pressão do ar (som) no diafragma.

Figura 1.74

Microfone dinâmico.



1.5 Circuitos magnéticos

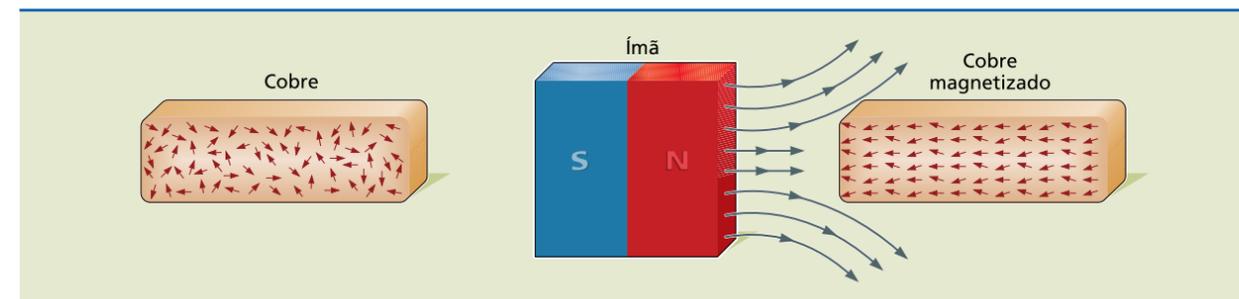
Circuito magnético é o espaço no qual o conjunto de linhas de indução magnética se manifesta. Para analisarmos um circuito magnético, devemos conhecer qual substância magnética é utilizada como núcleo e como o núcleo se comporta durante a magnetização e desmagnetização.

1.5.1 Substâncias magnéticas

Ao submeter uma amostra de cobre à ação de um campo magnético, seus dipolos magnéticos sofrem pequena influência desse campo, ficando ligeiramente orientados em sentido contrário ao do campo magnetizante. Entre o cobre e o ímã manifesta-se, assim, uma pequena força de repulsão. As substâncias que apresentam esse comportamento são denominadas diamagnéticas (figura 1.75).

Figura 1.75

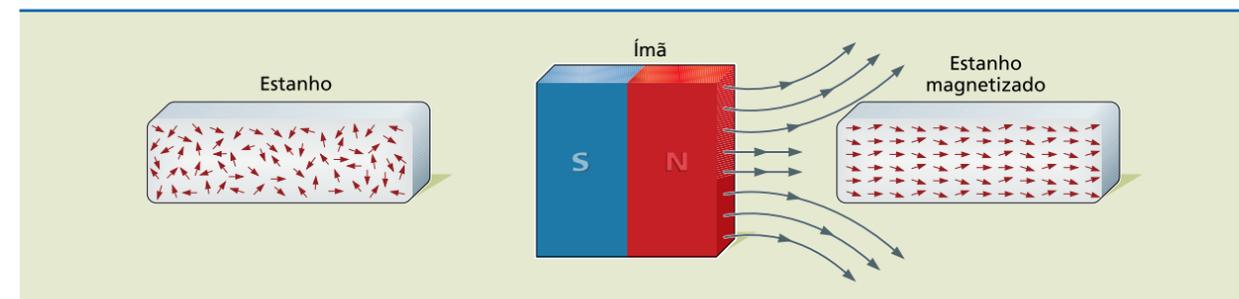
Substância diamagnética.



Ao submeter uma amostra de estanho à ação de um campo magnético, seus dipolos magnéticos sofrem pequena influência desse campo, ficando ligeiramente orientados no mesmo sentido do campo magnetizante. Entre o estanho e o ímã manifesta-se, assim, uma pequena força de atração. As substâncias que apresentam esse comportamento são denominadas paramagnéticas (figura 1.76).

Figura 1.76

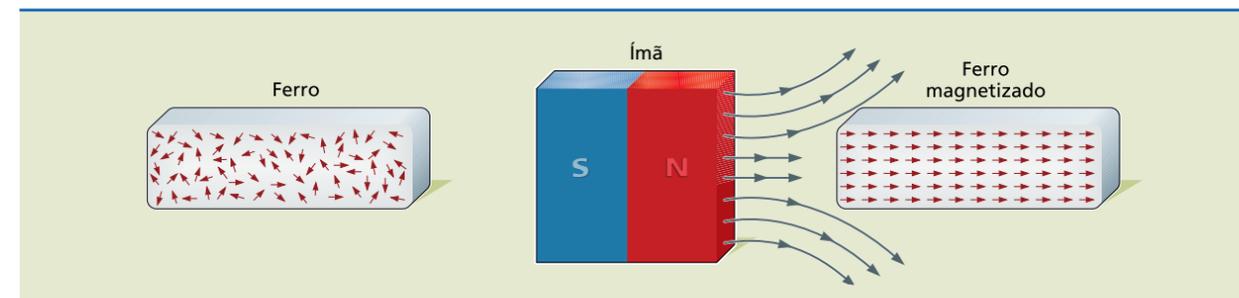
Substância paramagnética.



Ao submeter uma amostra de ferro à ação de um campo magnético, seus dipolos magnéticos sofrem grande influência desse campo, ficando fortemente orientados no mesmo sentido do campo magnetizante. Entre o ferro e o ímã manifesta-se, assim, uma força de atração muito forte. As substâncias que apresentam esse comportamento são denominadas ferromagnéticas (figura 1.77).

Figura 1.77

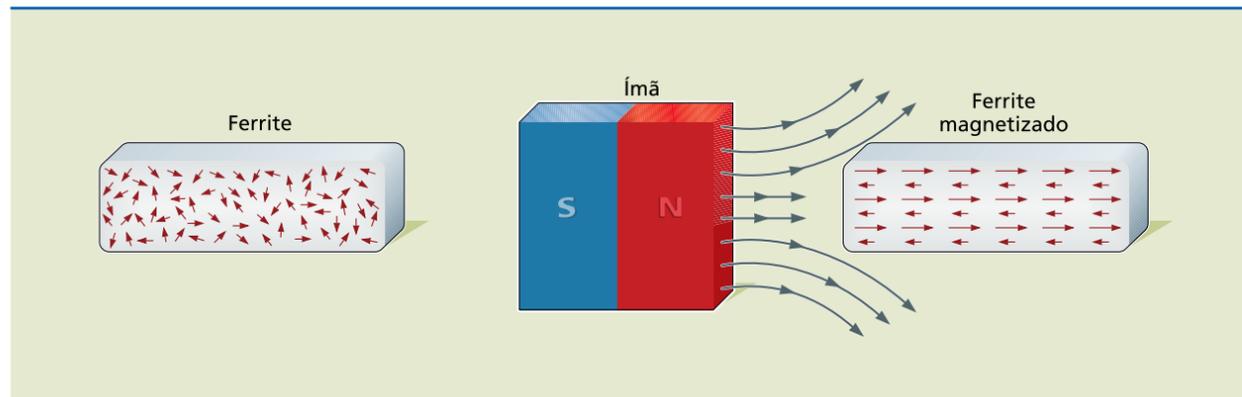
Substância ferromagnética.



Ao submeter uma amostra de ferrite ($\text{Fe}_2\text{O}_3\text{FeO}$) à ação de um campo magnético, seus dipolos magnéticos sofrem influência desse campo; a maioria deles fica fortemente orientada no mesmo sentido do campo magnetizante, e a minoria, fracamente alinhada em sentido contrário. As substâncias que apresentam esse comportamento são denominadas ferrimagnéticas (figura 1.78) e costumam ser empregadas na construção de cabeçotes de gravação e reprodução magnética.

Figura 1.78

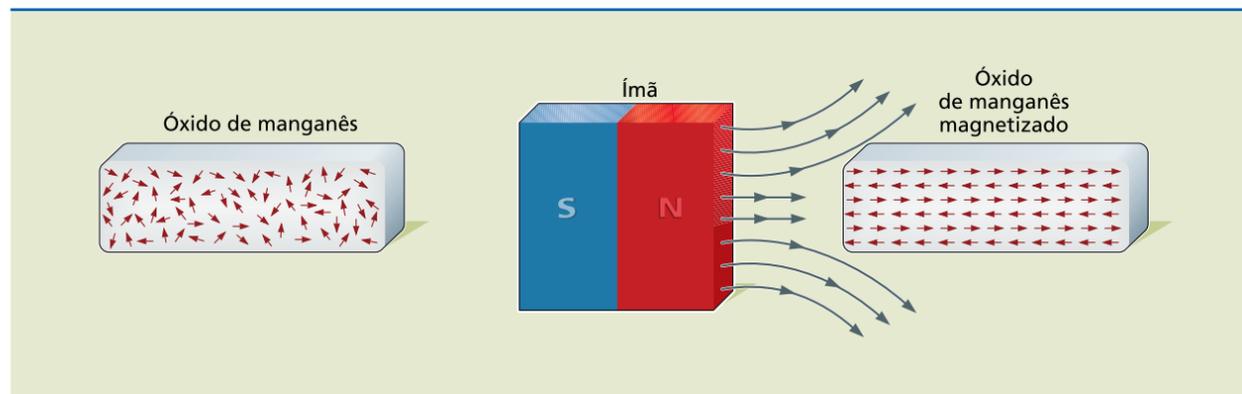
Substância ferrimagnética.



Ao submeter uma amostra de óxido de manganês (MnO) à ação de um campo magnético, seus dipolos magnéticos sofrem grande influência desse campo; uma parte fica fortemente orientada no mesmo sentido do campo magnetizante, e a outra, fortemente alinhada em sentido contrário.

Figura 1.79

Substância antiferromagnética.



As substâncias que apresentam esse comportamento são denominadas antiferromagnéticas (figura 1.79) e costumam ser empregadas como blindagem magnética.

De acordo com o comportamento que apresentam ao serem submetidas à ação do campo magnético, as substâncias ferromagnéticas e ferrimagnéticas são usadas como núcleo de circuitos magnéticos. Essa utilização lhes é atribuída porque, na presença de campo magnético, elas se magnetizam fortemente, até um ponto em que todos os seus dipolos estejam orientados. Tal ponto é chamado de saturação magnética (figura 1.80).

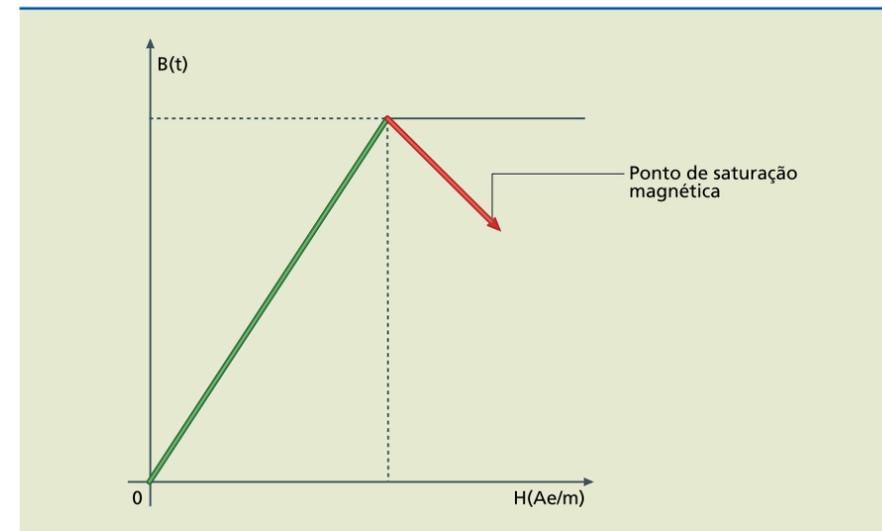


Figura 1.80

Curva de magnetização.

A relação entre B e H é conhecida como permeabilidade magnética:

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (1.18)$$

em que:

- μ é a permeabilidade magnética, em terametro por ampere (Tm/A);
- B, a densidade magnética ou a densidade de fluxo, medida em tesla (T);
- H, a intensidade de campo magnético, medida em **ampere por metro** (A/m).

As substâncias magnetizáveis levam mais tempo para se desmagnetizar. Esse atraso é denominado histerese magnética (figura 1.81).

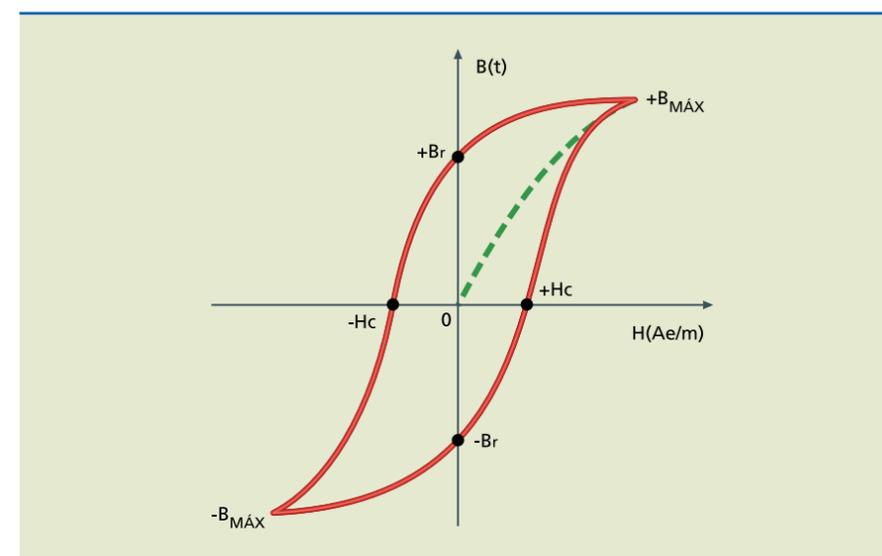


Figura 1.81

Histerese magnética.

É comum referir-se à unidade de intensidade de corrente quando produzida por espiras como ampere-espira. No entanto, o número de espiras, associado a essa "unidade" é adimensional, ou seja, não tem unidade. Assim, ampere-espira é o mesmo que ampere, a unidade do Sistema Internacional, que adotamos neste livro.



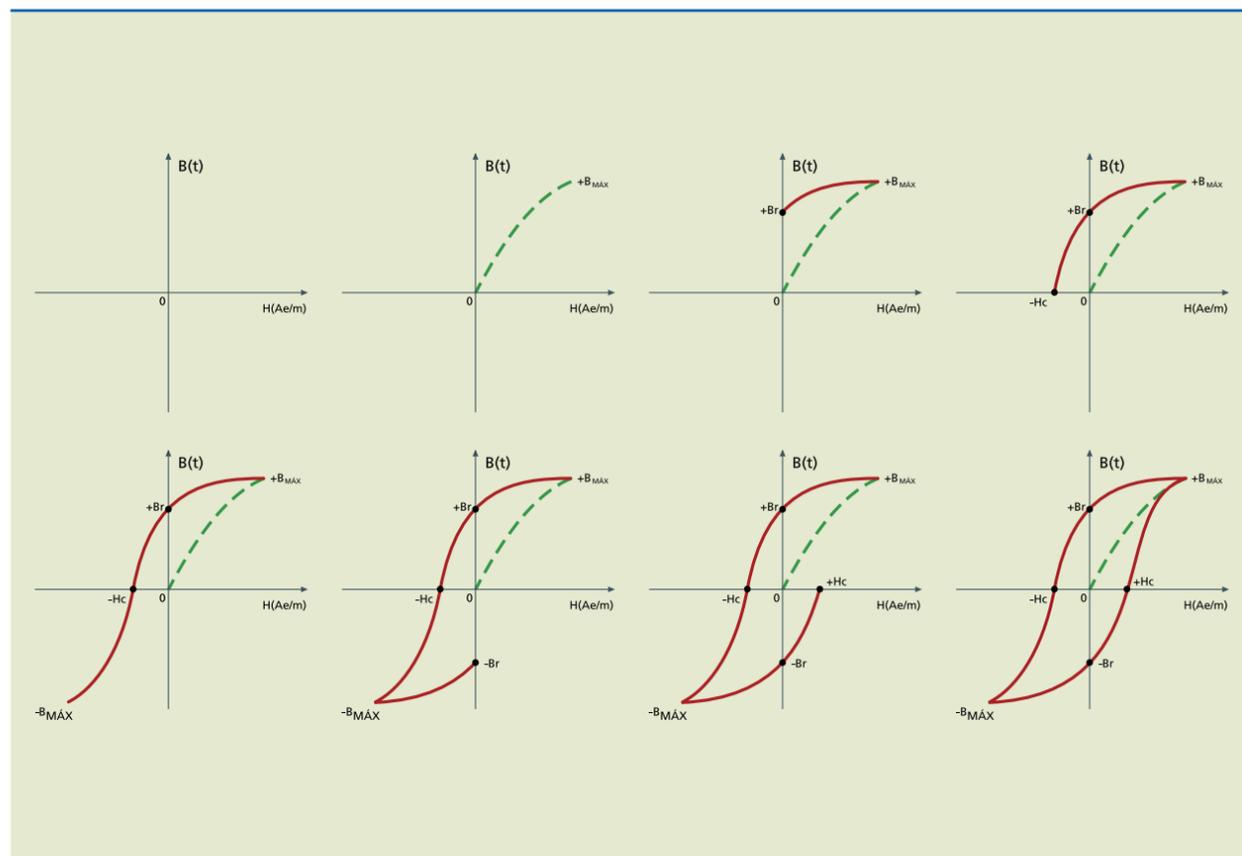
Vamos considerar um material ferromagnético submetido a um campo magnético (+H) proveniente de uma corrente elétrica, com ponto de saturação magnética (+B_{MÁX}) atrelado a certa intensidade de corrente elétrica.

Se diminuirmos a corrente elétrica, o valor de H reduzirá. Ao atingir o valor zero, o magnetismo do corpo não desaparece, permanecendo uma densidade de fluxo magnético residual (+Br), denominado remanência ou retentividade.

Para reduzirmos a remanência, invertamos a corrente elétrica, o que origina um campo magnético de sentido contrário ao anterior (-H). Mantendo essa situação, se aumentarmos a intensidade de corrente até um valor em que uma força denominada coerciva (-H_C) atue, a densidade de fluxo será reduzida a zero. No entanto, se elevarmos a corrente, ocorrerá novamente uma saturação magnética, só que de sentido contrário (-B_{MÁX}). Ao reduzirmos a corrente mais uma vez a ponto de zerar o campo H, a remanência não desaparecerá (-Br). Então, invertamos a corrente novamente e aumentamos sua intensidade, a ponto de surgir a força coerciva (+H_C). Se elevarmos a intensidade de corrente, obteremos o ponto de saturação inicial. Observe na figura 1.82 a representação gráfica das situações descritas anteriormente, finalizando com o laço de histerese, expressão usada para designar a curva fechada do gráfico quando o material adquire o estado de magnetização após um ciclo completo.

Figura 1.82

Laço de histerese magnética.



A substância submetida ao campo magnético realizará magnetização e desmagnetização percorrendo o laço de histerese. A curva de magnetização inicial somente ocorre na primeira magnetização do material.

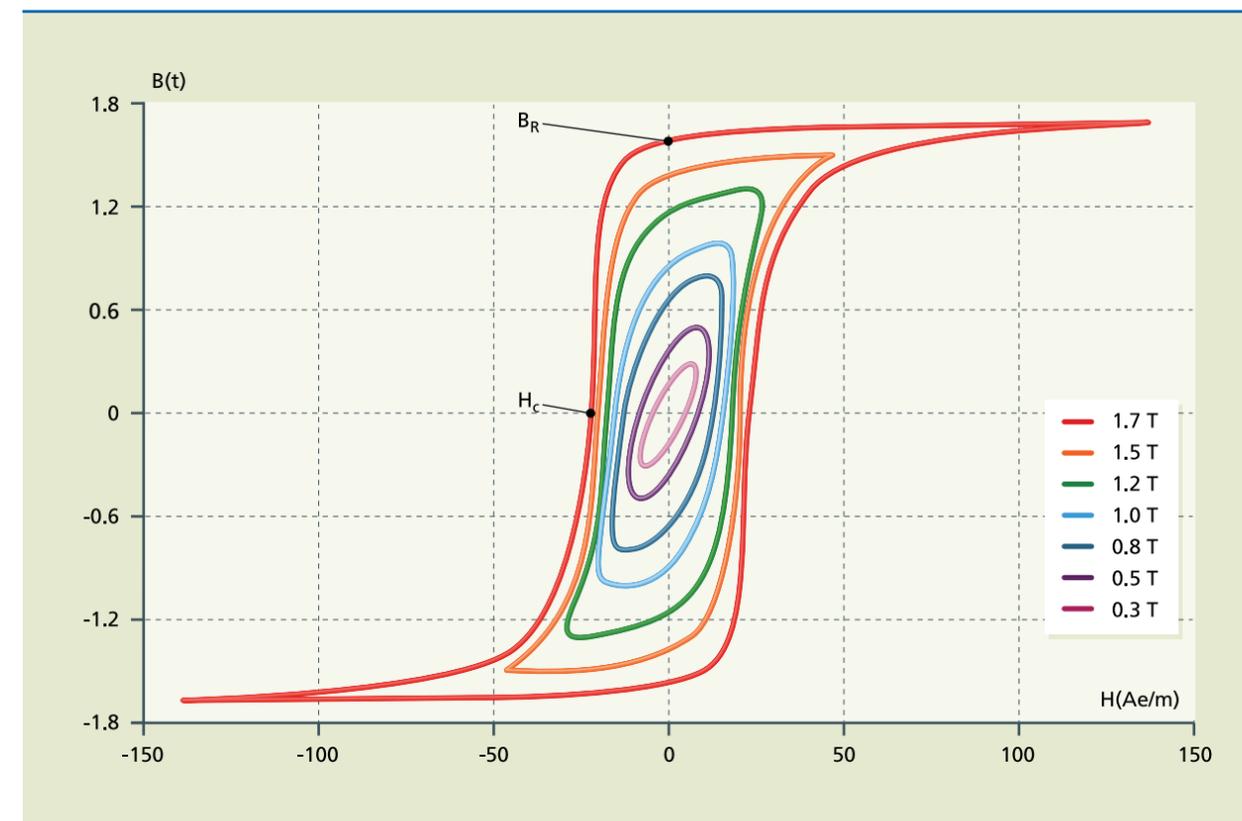
Esse fenômeno provoca perdas de energia, provenientes do aquecimento, pois o material ferromagnético necessita de considerável intensidade de potência elétrica para inverter o sentido de um campo magnético a fim de desmagnetizá-lo, como é o caso de eletroímãs.

Cada material apresenta um laço de histerese específico de acordo com as substâncias que o compõem. A escolha do melhor material depende do tipo de aplicação, para diminuir ao máximo as perdas por histerese magnética (quanto maior a área do laço, maior a perda). Por exemplo, em transformadores de alta potência, utiliza-se como núcleo uma liga de ferro-silício para que as perdas por histerese sejam mínimas.

O gráfico da figura 1.83 apresenta alguns laços de histerese.

Figura 1.83

Curvas típicas de histerese magnética.

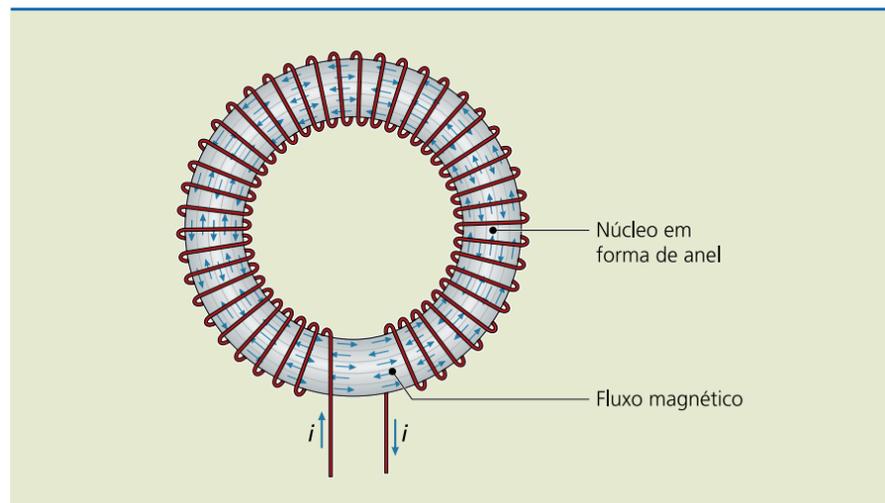


1.5.2 Circuitos magnéticos lineares

Circuito magnético é aquele percorrido pelo fluxo magnético (Φ). O toroide é um solenoide fechado (figura 1.84). Recebe a denominação de circuito magnético perfeito porque consegue concentrar em seu interior todo o fluxo magnético, sem dispersão.



Figura 1.84
Toróide.



Se uma corrente i percorre o toróide de comprimento ℓ , que possui N espiras, cria um campo magnético H . A expressão matemática que determina essa análise é:

$$H = \frac{N \cdot i}{\ell} \quad (1.19)$$

A magnetização do circuito ocorre de acordo com a relação $\mu = \frac{B}{H}$.

Como $B = \mu \cdot H$ e $\varphi = B \cdot A$, portanto:

$$\varphi = B \cdot A \rightarrow \varphi = \mu \cdot H \cdot A \rightarrow \varphi = \mu \cdot \frac{N \cdot i}{\ell} \cdot A$$

$$N \cdot i = \varphi \cdot \frac{\ell}{\mu \cdot A} \quad (1.20)$$

Essa equação é a lei de Hopkinson, ou equação do circuito magnético. Fazendo uma analogia entre essa lei e a lei de Ohm, obtém-se:

$$U = i \cdot R \rightarrow N \cdot i = \varphi \cdot \frac{\ell}{\mu \cdot A} \quad (1.21)$$

O produto $N \cdot i$ representa o trabalho realizado para que o fluxo magnético atravesse o circuito (na verdade, é essa grandeza que origina o fluxo), comportando-se como tensão elétrica (ou força eletromotriz); o produto $N \cdot i$ é chamado de força magnetomotriz (f.m.m.). O fluxo magnético é como se fosse a corrente i .

A grandeza $\frac{\ell}{\mu \cdot A}$ pode ser relacionada com a resistência elétrica por analogia

com a lei de Ohm:

$$R = \rho \cdot \frac{\ell}{A} \rightarrow \frac{1}{\mu} \cdot \frac{\ell}{A} \quad (1.22)$$

em que R_M é a relutância magnética, medida em ampere-espira por weber (Ae/Wb):

$$R_M = \frac{\ell}{\mu \cdot A} \quad (1.23)$$

Então, a equação do circuito magnético pode ser expressa por:

$$\text{f.m.m.} = \varphi \cdot R_M \quad (1.24)$$

em que $\text{f.m.m.} = N \cdot i$ e $\varphi = B \cdot A$.

Além da bobina, responsável pelo campo magnético, e da substância magnetizável, alguns circuitos magnéticos apresentam um espaço entre os polos, conhecido como entreferro. A existência de um entreferro de ar (figura 1.85) aumenta a relutância magnética do circuito, uma vez que a permeabilidade do ar é muito baixa.

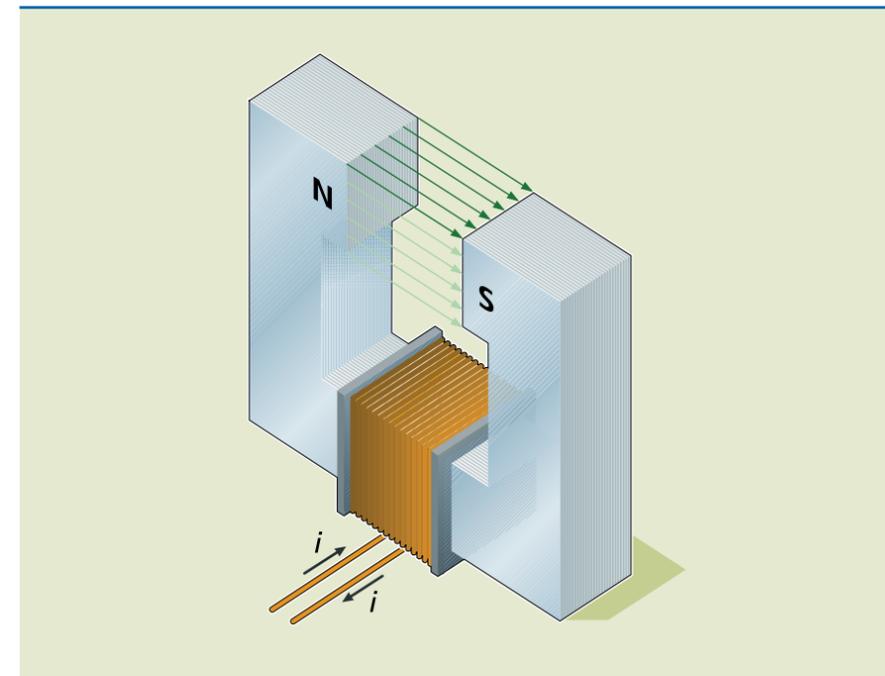


Figura 1.85
Entreferro de ar.

1.5.3 Circuitos magnéticos não lineares

Aplicando em amostras de materiais ferromagnéticos um campo magnético crescente de intensidade H , obtêm-se os valores correspondentes de densidade de fluxo B , como mostra a figura 1.86. Vimos anteriormente que alguns materiais são melhores que outros em termos de magnetização, respeitada a devida aplicação prática. Contudo, esses materiais podem ter uma resposta não linear à magnetização, obrigando a uma análise por meio de gráficos, caso sejam utilizados em circuitos magnéticos. Os gráficos das figuras 1.86 e 1.87 mostram os aspectos de não linearidade para alguns materiais ferromagnéticos.



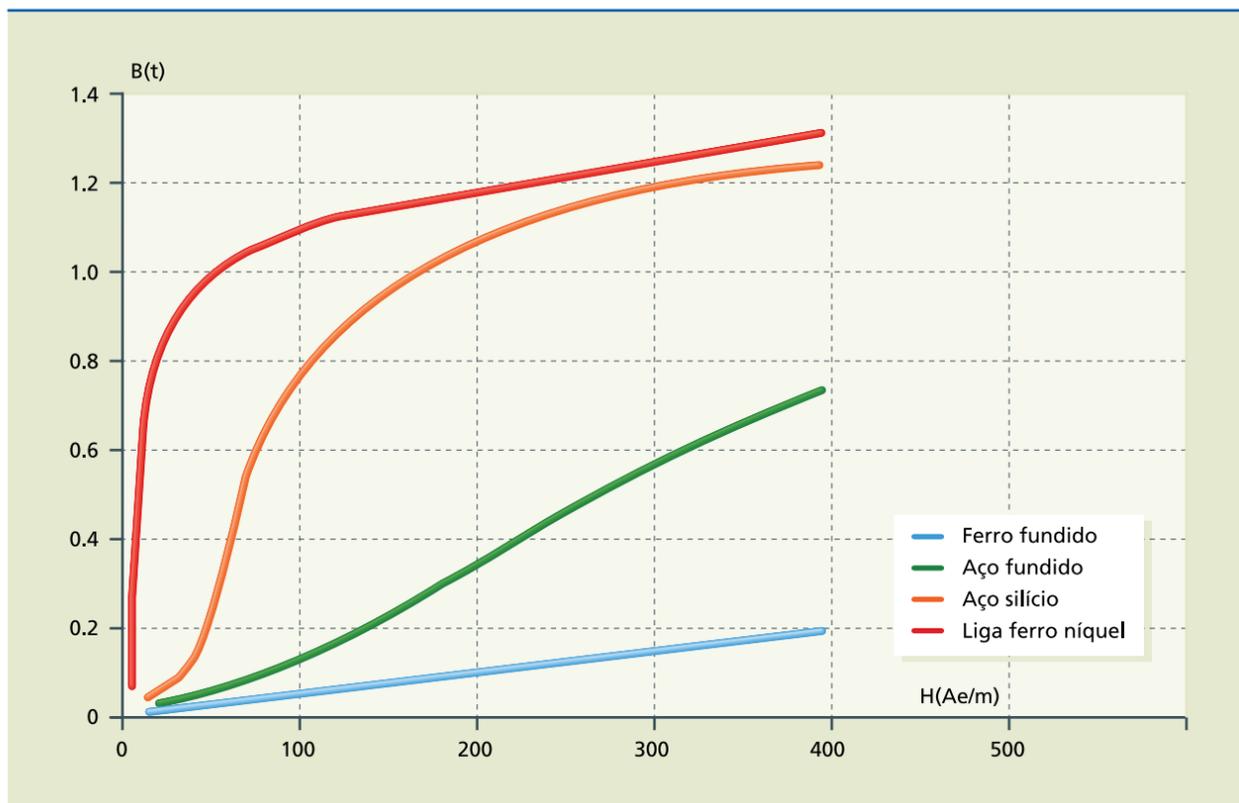
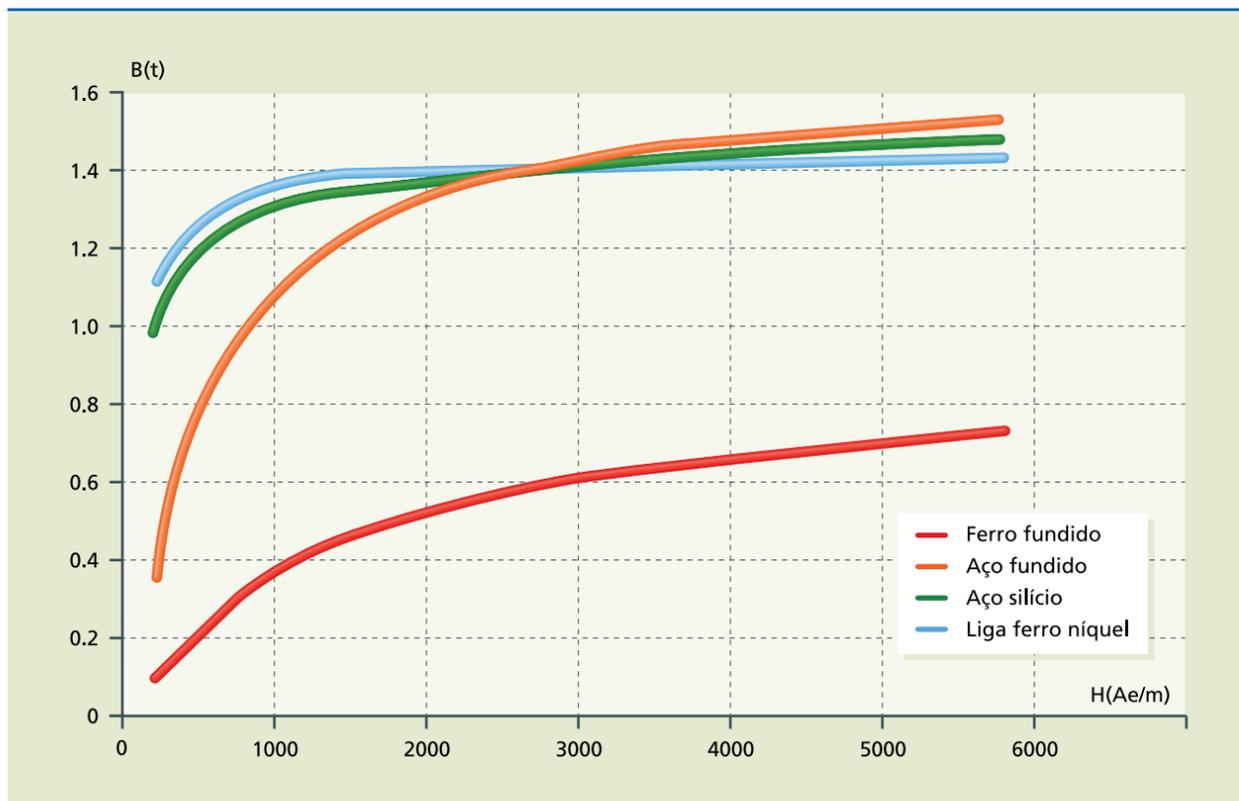


Figura 1.86

Curvas de magnetização para $H < 400$ Ae/m.

Figura 1.87

Curvas de magnetização para $H > 400$ Ae/m.



Circuito magnético em série sem entreferro

Uma bobina com N espiras, percorrida por uma corrente i , produz uma força magnetomotriz (f.m.m.) que faz com que o fluxo magnético circule pelo núcleo formado por três materiais ferromagnéticos distintos e não lineares. Cada um desses materiais possui relutância magnética (R_M) específica, o que provoca uma espécie de “queda” da f.m.m., definida pelo produto $H \cdot \ell$.

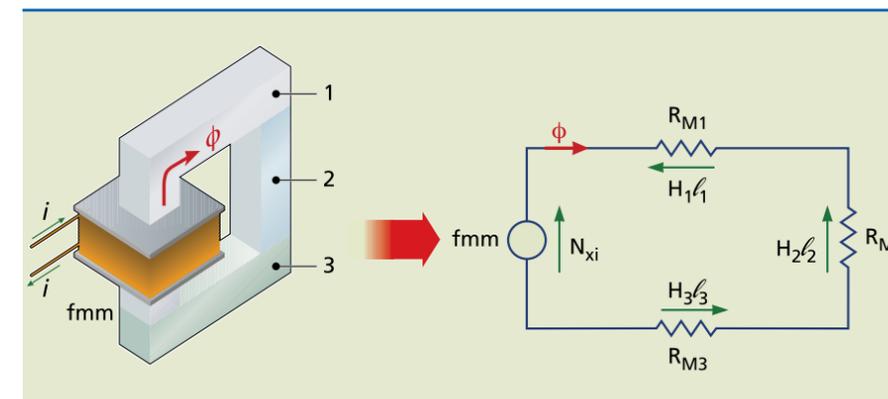


Figura 1.88

Circuito magnético não linear em série sem entreferro.

Analisando o circuito da figura 1.88, podem-se admitir:

$$fmm = N \cdot i$$

$$fmm = \phi \cdot R_{M_{EQU}}$$

e

$$R_{M_{EQU}} = R_{M1} + R_{M2} + R_{M3} \quad (1.25)$$

em que $R_{M_{EQU}}$ é a relutância magnética equivalente do circuito.

Lembrando que $R_M = \frac{\ell}{\mu \cdot A}$, obtém-se:

$$fmm = \phi \cdot R_{M_{EQU}}$$

$$fmm = \phi \cdot (R_{M1} + R_{M2} + R_{M3})$$

$$fmm = \phi \cdot \left(\frac{\ell_1}{\mu_1 \cdot A_1} + \frac{\ell_2}{\mu_2 \cdot A_2} + \frac{\ell_3}{\mu_3 \cdot A_3} \right)$$

Efetuada a distributiva:

$$fmm = \left(\frac{\phi \cdot \ell_1}{A_1 \cdot \mu_1} + \frac{\phi \cdot \ell_2}{A_2 \cdot \mu_2} + \frac{\phi \cdot \ell_3}{A_3 \cdot \mu_3} \right)$$



Como $B = \frac{\phi}{A}$, então:

$$fmm = \left(\frac{B_1 \cdot l_1}{\mu_1} + \frac{B_2 \cdot l_2}{\mu_2} + \frac{B_3 \cdot l_3}{\mu_3} \right)$$

Sabe-se que $H = \frac{B}{\mu}$, logo:

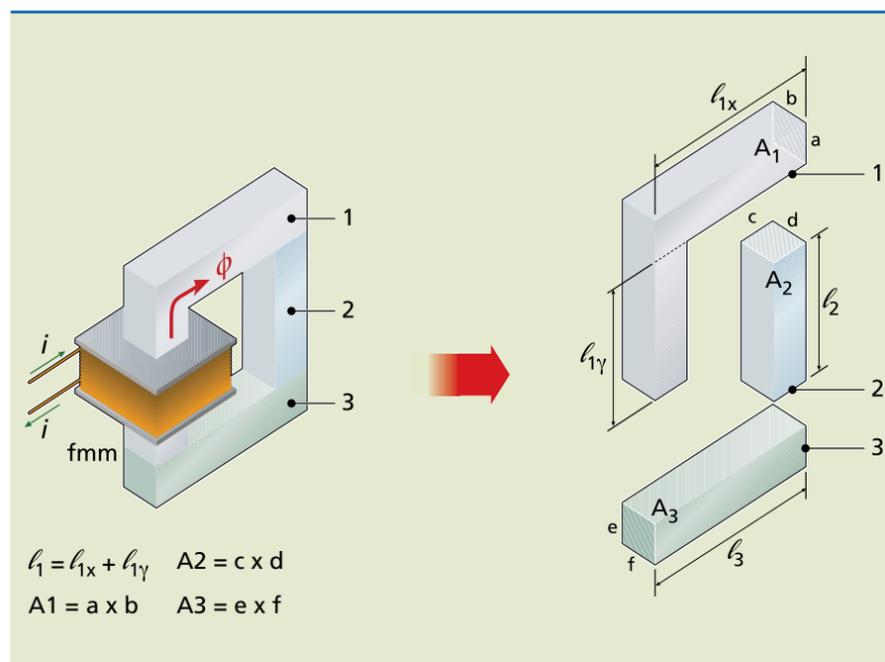
$$fmm = H_1 \cdot l_1 + H_2 \cdot l_2 + H_3 \cdot l_3$$

Uma vez que o circuito é não linear, é preciso consultar os gráficos das curvas B-H (figuras 1.86 e 1.87) para obter os valores de H, desde que se conheçam os valores de B e os materiais ferromagnéticos a serem utilizados já estejam determinados.

A figura 1.89 mostra como se determinam os comprimentos e as áreas dos entreferros. Cada parte é calculada separadamente.

Figura 1.89

Circuito magnético não linear em série com entreferro de material não magnético.



Circuito magnético em série com entreferro

Os circuitos magnéticos com entreferro de ar são bastante utilizados. Suas dimensões têm de ser muito pequenas (o comprimento do entreferro não deve ultrapassar um décimo da menor dimensão do núcleo), pois a relutância do ar é muito alta, resultando em “queda” da f.m.m. maior que a do núcleo. Um exemplo de circuito de entreferro de ar é o do cabeçote de gravação magnética dos HDs (figura 1.90).

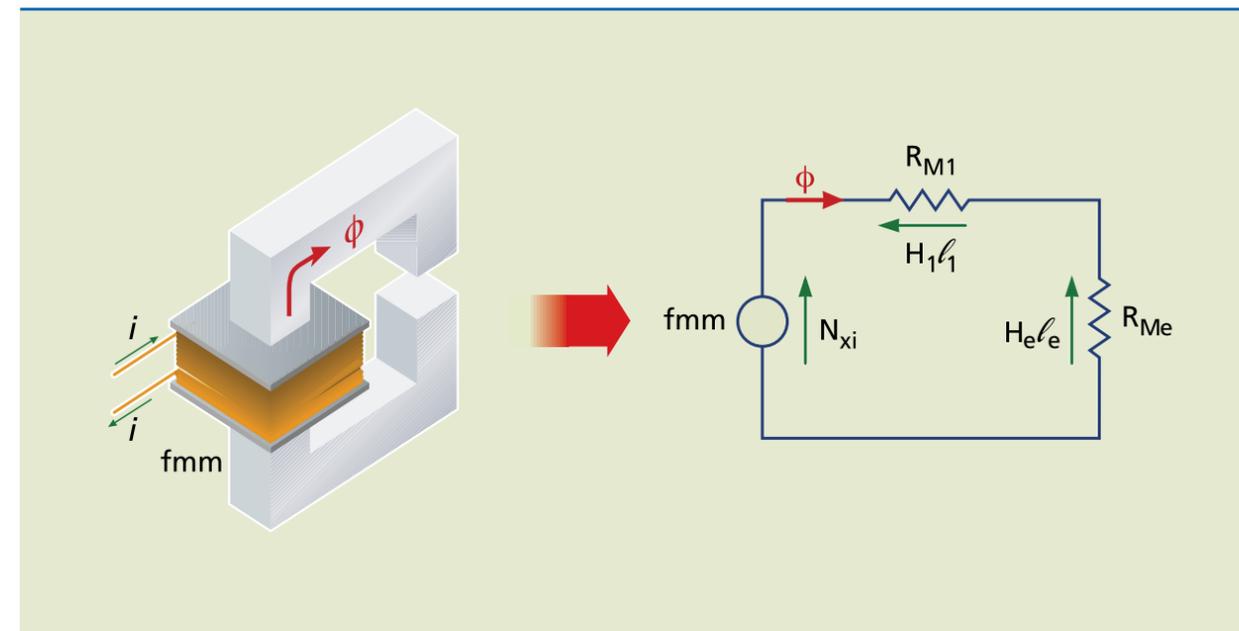


Figura 1.90

Circuito magnético não linear em série com entreferro de ar.

Nessas condições, as equações do circuito podem ser:

$$fmm = N \cdot i$$

$$fmm = \phi \cdot R_{MEQU} \quad (1.26)$$

ou

$$fmm = H_1 \cdot l_1 + H_e \cdot l_e$$

Calcula-se a relutância magnética equivalente por:

$$R_{MEQU} = R_{M1} + R_{Me}$$

lembrando que:

$$R_{M1} = \frac{l_1}{\mu_1 \cdot A_1}$$

$$R_{Me} = \frac{l_e}{\mu_0 \cdot A_e}$$

em que:

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Tm}{A}$$

Para determinar as dimensões do núcleo e do entreferro, procede-se como apresentado na figura 1.91.



Figura 1.91
Circuito magnético não linear em série com entreferro.

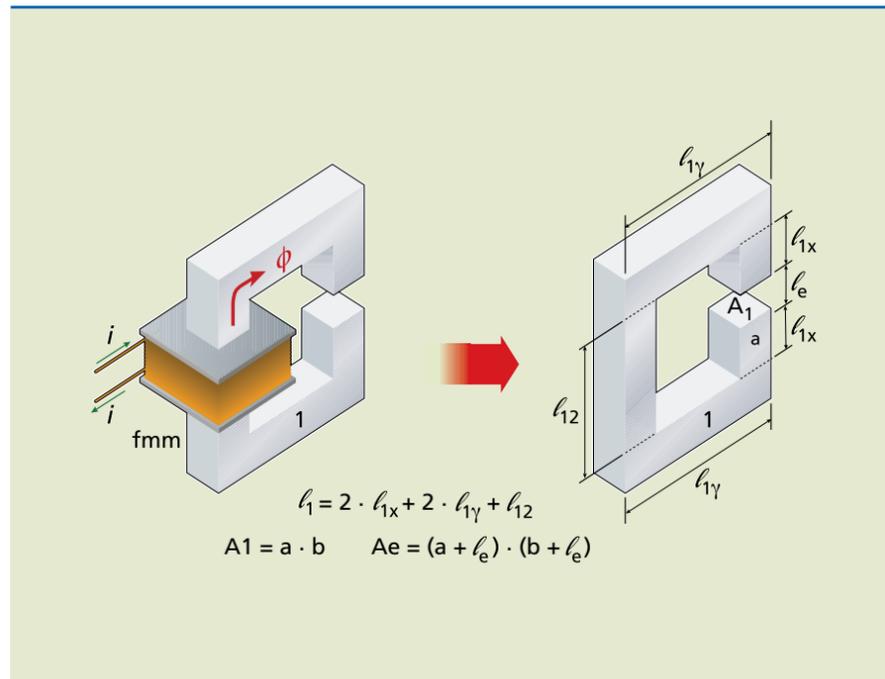
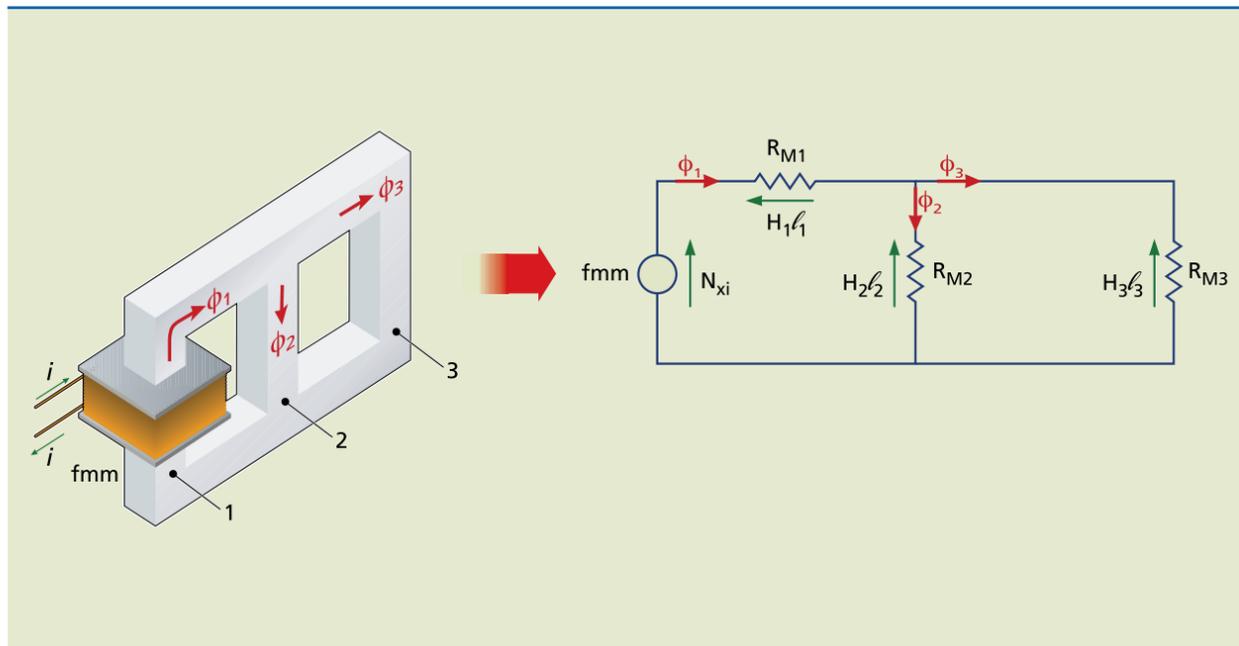


Figura 1.92
Circuito magnético não linear paralelo sem entreferro.

Circuito magnético em paralelo

A análise de um circuito magnético paralelo é semelhante à de um circuito elétrico em paralelo (figura 1.92).



Nesse caso, o fluxo magnético total ($\Phi_1 = \Phi_2 + \Phi_3$), que não são iguais (mesmo que o núcleo seja homogêneo), pois os comprimentos das partes 2 e 3 são diferentes (figura 1.93).

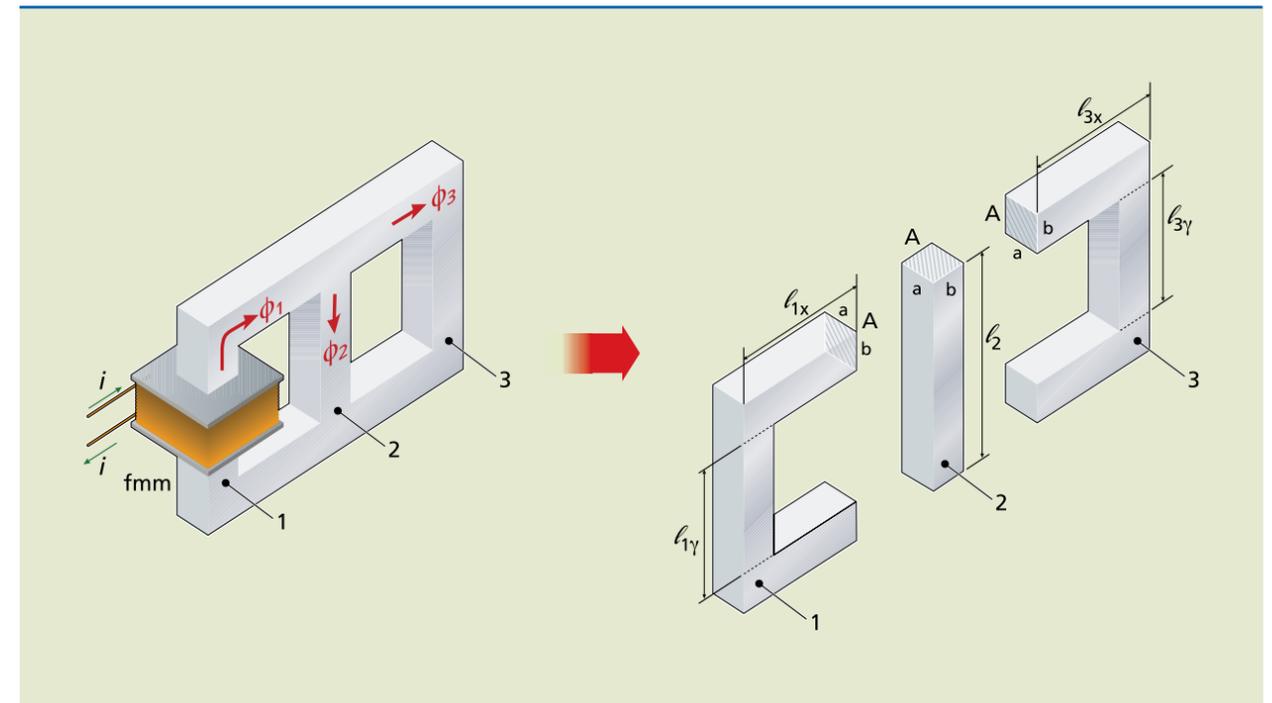


Figura 1.93
Circuito magnético não linear paralelo sem entreferro.

Como:

$$H_1 \cdot l_1 = R_{M1} \cdot \Phi_1, \text{ em que } R_{M1} = \frac{l_1}{\mu \cdot A_1},$$

$$H_2 \cdot l_2 = R_{M2} \cdot \Phi_2, \text{ em que } R_{M2} = \frac{l_2}{\mu \cdot A_2}, \text{ e}$$

$$H_3 \cdot l_3 = R_{M3} \cdot \Phi_3, \text{ em que } R_{M3} = \frac{l_3}{\mu \cdot A_3} \quad (1.27),$$

então, a força magnetomotriz é:

$$fmm = H_1 \cdot l_1 + H_2 \cdot l_2$$

ou

$$fmm = H_1 \cdot l_1 + H_3 \cdot l_3, \text{ já que } H_2 \cdot l_2 = H_3 \cdot l_3,$$

ou

$$fmm = N \cdot i \quad fmm = \Phi_1 \cdot R_{M_{EQU}}$$

em que:

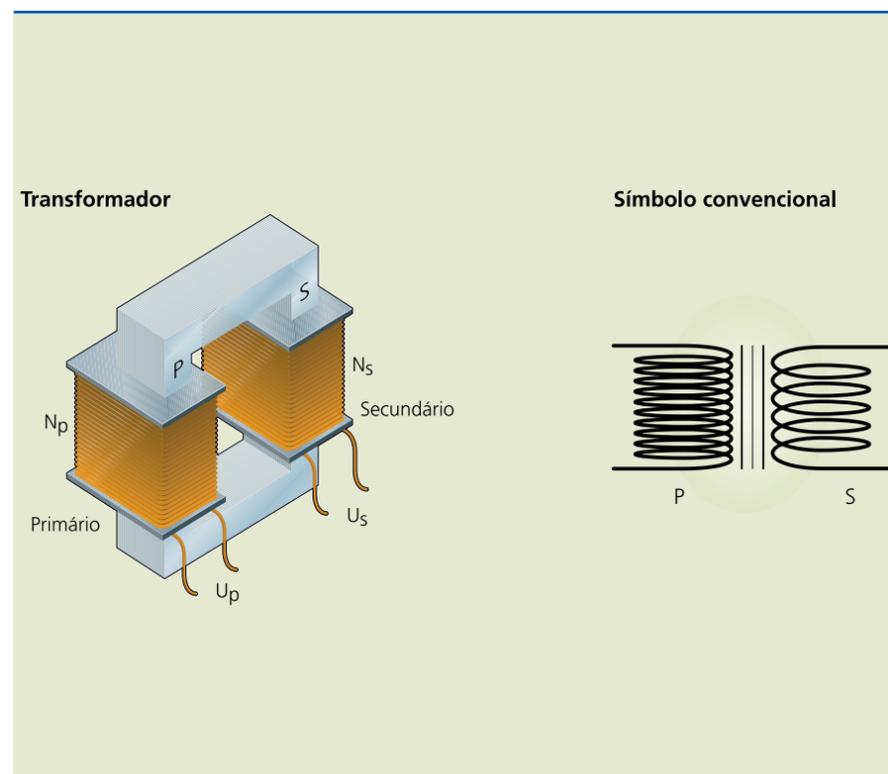
$$R_{M_{EQU}} = R_{M1} + \frac{R_{M2} \cdot R_{M3}}{R_{M2} + R_{M3}}$$



1.6 Transformadores

O fenômeno da indução eletromagnética possibilitou o desenvolvimento de inúmeros dispositivos, entre eles o transformador, capaz de alterar os valores da tensão e da corrente elétrica alternada (figura 1.94).

Figura 1.94
Transformador elétrico.



Em 1884, na exposição de eletricidade realizada na cidade de Turim, Itália, o inventor francês Lucien Gaulard apresentou um aparelho destinado a transmitir energia elétrica em grandes distâncias. Esse dispositivo, que funcionava por meio de corrente alternada, foi o primeiro transformador de uso industrial. A patente do invento foi comprada pelo empresário norte-americano George Westinghouse.

Anos mais tarde, Nikola Tesla, cientista sérvio naturalizado norte-americano, realizou estudos no campo do eletromagnetismo e foi autor de invenções importantíssimas utilizando transformadores. Pode ser atribuído a ele o desenvolvimento de todo o conceito e sistema de geração e transmissão de energia elétrica na forma alternada, além do aperfeiçoamento dos transformadores.

1.6.1 Transformador monofásico

O transformador é uma máquina elétrica estática, que altera a tensão e a corrente elétrica para valores adequados de acordo com a aplicação específica do projeto. Na figura 1.95, um transformador monofásico representado de maneira elementar.

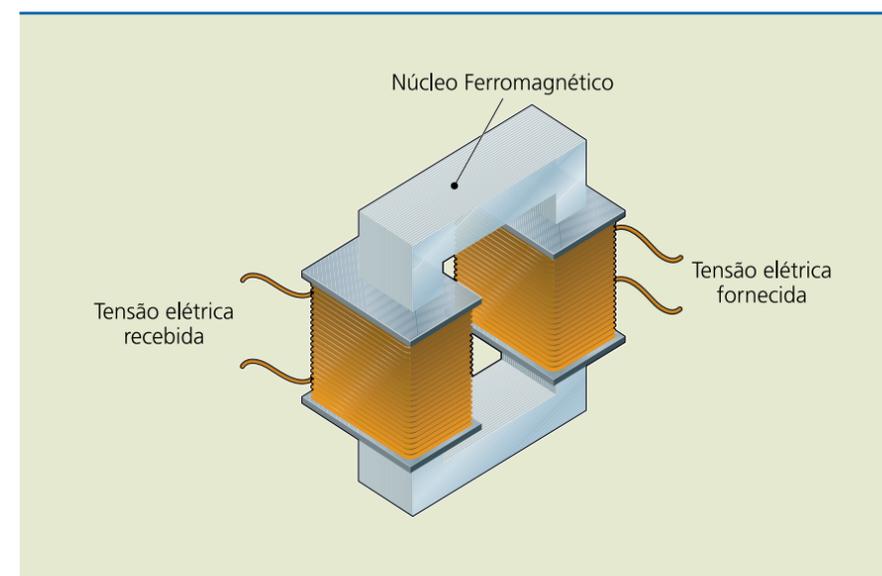


Figura 1.95
Transformador elétrico monofásico.

O enrolamento que recebe a tensão da rede é o enrolamento primário, e o que fornece tensão para a carga, o secundário. Os enrolamentos primário e secundário estão enrolados em um núcleo ferromagnético, porém eletricamente isolados. Essa separação entre o primário e o secundário está representada na figura 1.96.

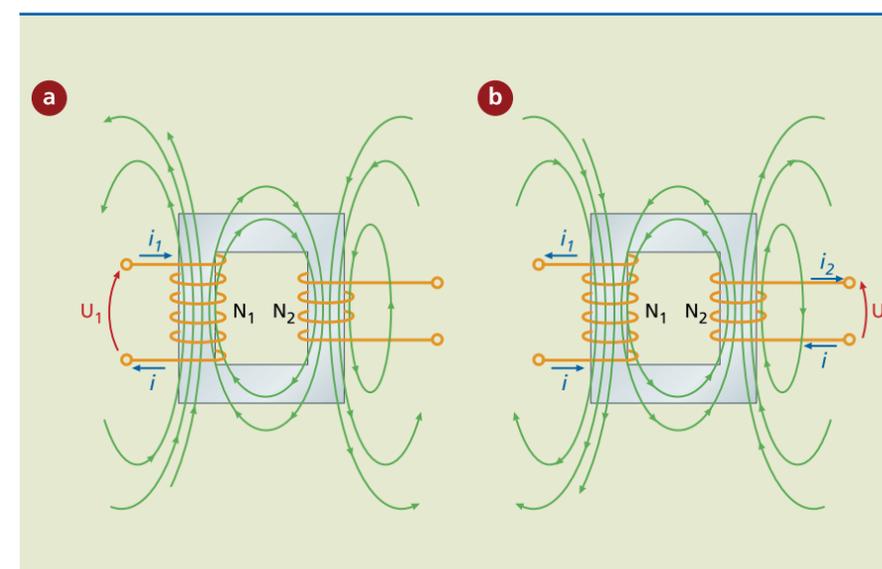


Figura 1.96
Princípio de funcionamento de um transformador.

Na figura, as grandezas indicadas são:

- U_1 , a tensão elétrica primária (V);
- I_1 , a corrente elétrica primária (A);
- N_1 , o número de espiras do enrolamento primário;
- U_2 , a tensão elétrica secundária (V);
- I_2 , a corrente elétrica secundária (A);
- N_2 , o número de espiras do enrolamento secundário.



Vamos analisar a figura 1.96a. Quando se aplica ao enrolamento primário uma tensão elétrica, cria-se uma corrente. Surge, então, um campo magnético, que alcança o enrolamento secundário, pois ambos compartilham o mesmo núcleo.

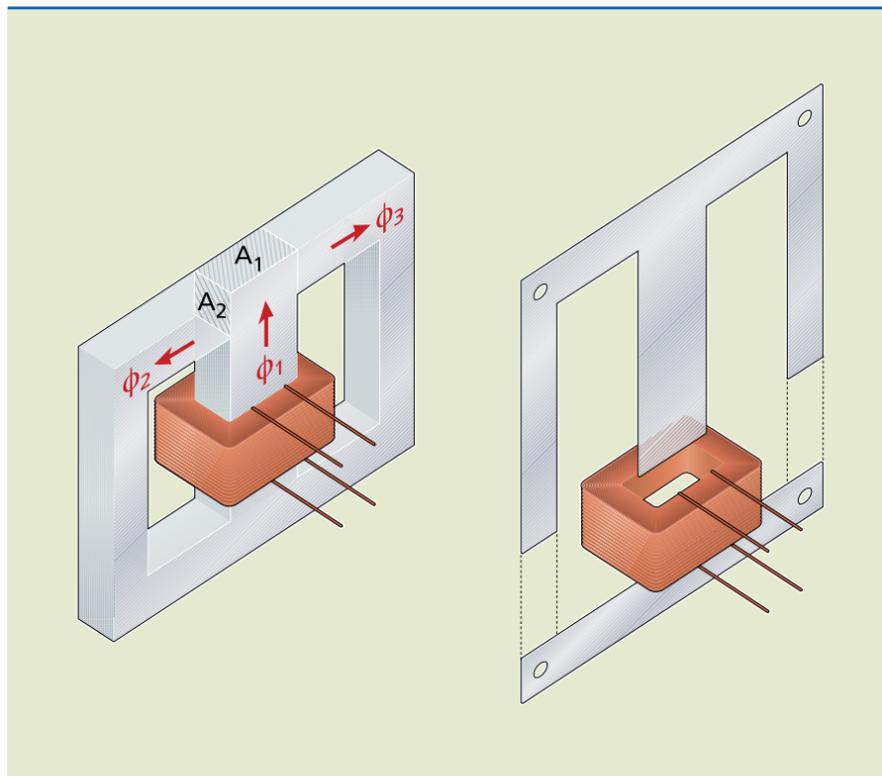
Observando agora a figura 1.96b, percebemos que, ao inverter o sentido da tensão no primário, o campo magnético também inverte de sentido. A inversão de sentido pode ser interpretada como movimento, e, de acordo com o princípio da indução eletromagnética, magnetismo associado a movimento gera eletricidade. Portanto, no enrolamento secundário, gera-se uma tensão elétrica, que, ao ser aplicada em uma carga, fornece uma corrente elétrica.

O transformador apresenta dispersão do fluxo magnético por correntes parasitas. Para minimizar essas perdas por histerese, seu núcleo é composto por lâminas, feitas de uma liga metálica especial.

O transformador monofásico é construído de maneira diferente do transformador elementar (figura 1.97).

Figura 1.97

Transformador monofásico.



Os enrolamentos, montados em um carretel e separados por papel isolante, ficam posicionados no centro do núcleo. O núcleo é composto por lâminas nos formatos “E” e “I”. Na lâmina “E”, a área da seção transversal do centro é o dobro da área da seção transversal das laterais; com isso, o fluxo magnético gerado no centro se divide em duas partes iguais nas laterais. Assim, a densidade de fluxo magnético B ($B = \frac{\Phi}{A}$) é constante para todo o núcleo.

Uma das aplicações dos transformadores é na alteração da tensão e da corrente elétrica nas usinas geradoras de energia elétrica, possibilitando que elas atendam o maior número possível de consumidores finais que utilizam a tensão em diferentes valores: industrial, comercial e residencial. As usinas hidroelétricas usam a água dos reservatórios de grandes lagos ou rios para mover as turbinas (figura 1.98). Já as usinas termoeletricas empregam combustíveis fósseis ou energia nuclear, cujo vapor faz girar as turbinas. Em geral, as usinas hidroelétricas e termoeletricas ficam distantes dos grandes consumidores de energia elétrica, e esta chega até eles por meio de linhas de transmissão, estações e subestações. Durante o percurso, são utilizados inúmeros transformadores, que não apenas alteram o valor da tensão e controlam a corrente, como mantêm a potência elétrica estável e reduzem as perdas por efeito Joule. Outra vantagem dos transformadores é que os cabos usados na linha de transmissão não precisam ser muito grossos.

Figura 1.98

Usina hidroelétrica.

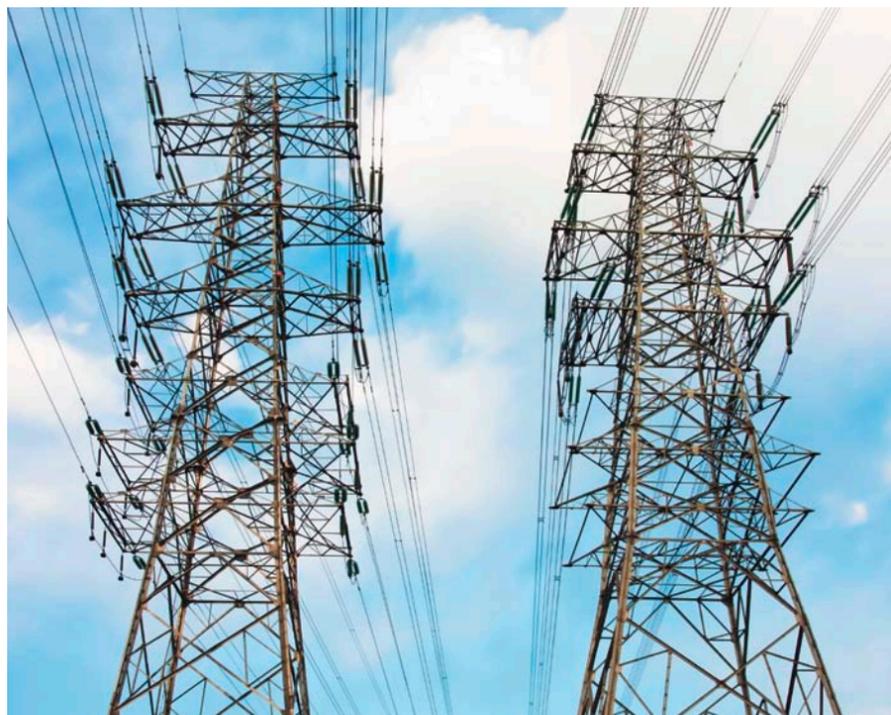


Vamos acompanhar o percurso desde a usina de geração de energia até os consumidores. Normalmente, a usina gera tensão na ordem de 10 000 V, que o transformador elevador de tensão aumenta para 150 000 a 400 000 V. Não se eleva a tensão acima de 400 000 V para evitar o efeito corona (uma espécie de descarga elétrica através do ar), que causa perda de energia.

Para ser transportada em grandes distâncias, a energia elétrica segue por cabos instalados em linhas de transmissão (figura 1.99). Por ficarem suspensos, os cabos da linha de transmissão não oferecem risco às pessoas, motivo pelo qual não recebem revestimento isolante. Eles são compostos por um trançado de alumínio com aço que garante a condutibilidade e resistência mecânica para suportar o próprio peso, as mudanças climáticas e os fortes ventos.



Figura 1.99
Linha de transmissão.



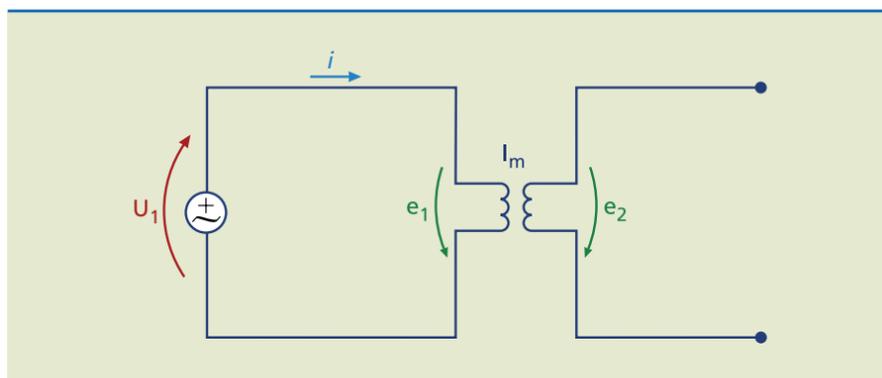
Durante a transmissão, ocorrem perdas de energia nos cabos, porque estes, apesar de apresentarem baixa resistência elétrica, são muito longos. Para amenizar as perdas, instalam-se subestações de energia. Assim, quando a tensão é mais uma vez elevada, as perdas são compensadas.

Ao chegar próximo aos consumidores, a tensão deve ser reduzida, para não oferecer risco à vida e também para fazer funcionar os aparelhos elétricos, eletrônicos e eletroeletrônicos na tensão adequada.

1.6.2 Transformador ideal

O transformador ideal é aquele que funciona sem apresentar perdas. Na prática, ele não existe, mas, na teoria, pode ser representado conforme a figura 1.100.

Figura 1.100
Transformador em vazio.



Analisando essa figura, percebemos que, ao aplicar a tensão U_1 no primário, com o secundário sem carga (em aberto), o transformador absorve uma corrente elétrica de magnetização (I_m). Como o circuito é indutivo, a tensão U_1 está adiantada em 90° em relação a essa corrente (figura 1.101).

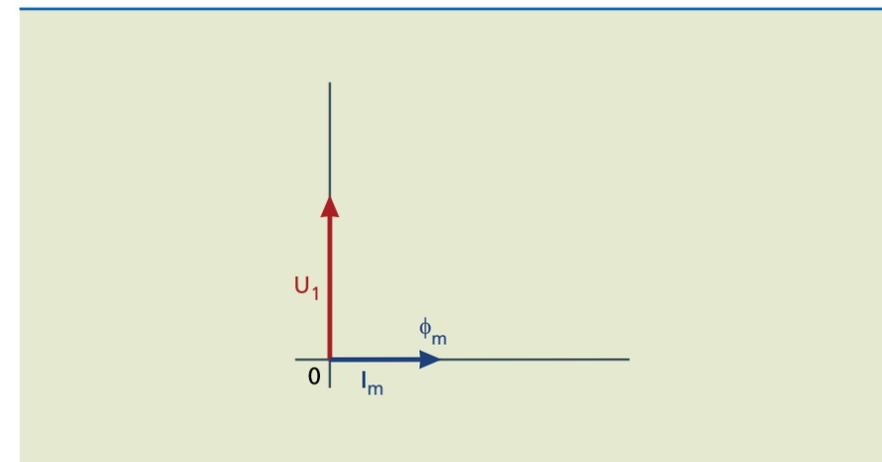


Figura 1.101
Tensão no primário e corrente de magnetização.

A corrente I_m gera o fluxo magnético (ϕ_m) no núcleo do transformador, o qual induz a força contraeletromotriz (f.c.e.m.) nos enrolamentos primário (e_1) e secundário (e_2), conforme ilustrado na figura 1.102.

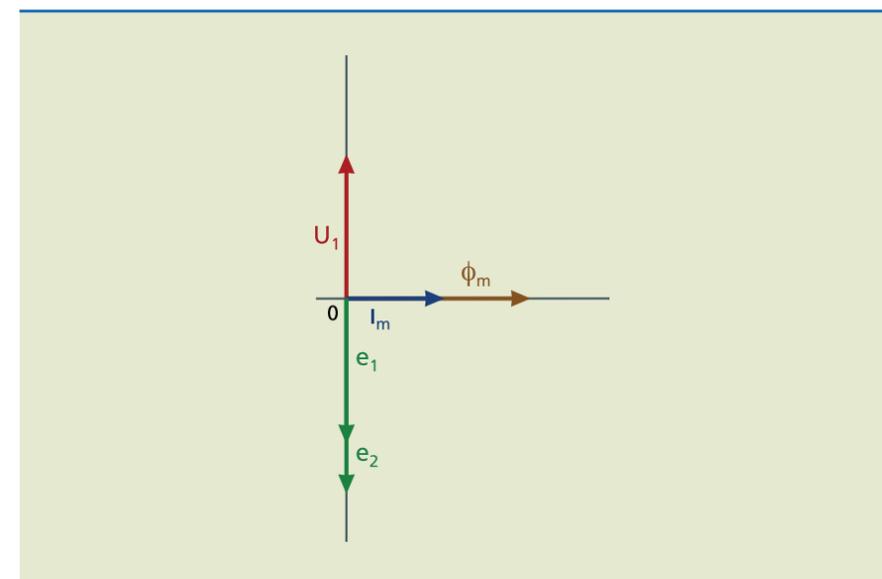


Figura 1.102
Tensões induzidas no transformador.

As forças contraeletromotrices e_1 e e_2 estão defasadas de 180° em relação a U_1 (o motivo dessa defasagem foi abordado na seção 1.4.1, sobre a lei de Lenz). Então, pela lei de Faraday-Neumann, temos:

$$e_1 = -N_1 \cdot \frac{\Delta\phi_m}{\Delta t} \quad e \quad e_2 = -N_2 \cdot \frac{\Delta\phi_m}{\Delta t} \quad (1.28)$$



A relação entre e_1 e e_2 pode ser determinada por:

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{-N_1 \cdot \frac{\Delta\phi_m}{\Delta t}}{-N_2 \cdot \frac{\Delta\phi_m}{\Delta t}} \quad \frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (1.29)$$

Como o núcleo apresenta relutância magnética, a força magnetomotriz ($N_1 \cdot I_m$) vale $f.m.m. = R_m \cdot \phi_m$, ou seja, o transformador funciona graças à relação entre U_1 e e_1 . Desse modo, como estamos considerando um transformador ideal, podemos substituir e_1 por U_1 e e_2 pela tensão que se manifesta nos terminais do secundário, U_2 . Assim, a relação de transformação da tensão é:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (1.30)$$

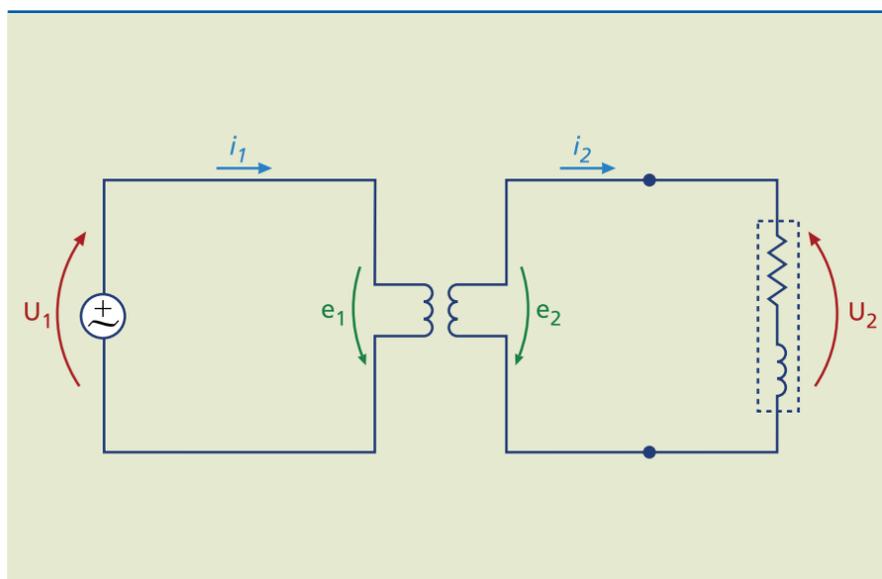
Observando essa equação, notamos que:

- Para que um transformador eleve a tensão, o número de espiras do enrolamento secundário deve ser maior que o do primário.
- Para que um transformador abaixe a tensão, o número de espiras do enrolamento secundário deve ser menor que o do primário.

Vamos analisar agora o funcionamento de um transformador com carga no secundário (figura 1.103).

Figura 1.103

Transformador com carga.



Ao colocar uma carga no secundário, haverá uma corrente I_2 circulando, atrasada de um ângulo θ_2 em relação a e_2 (figura 1.104).

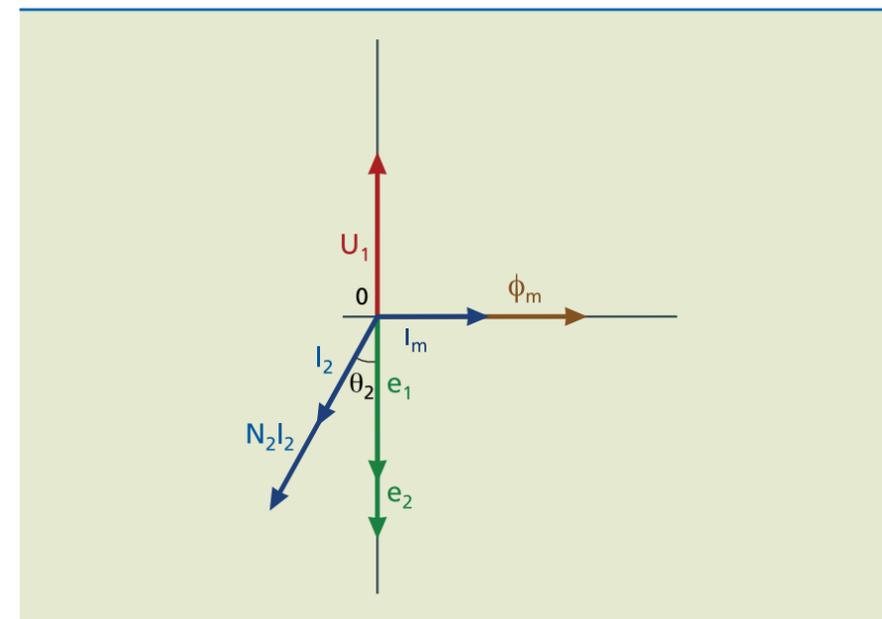


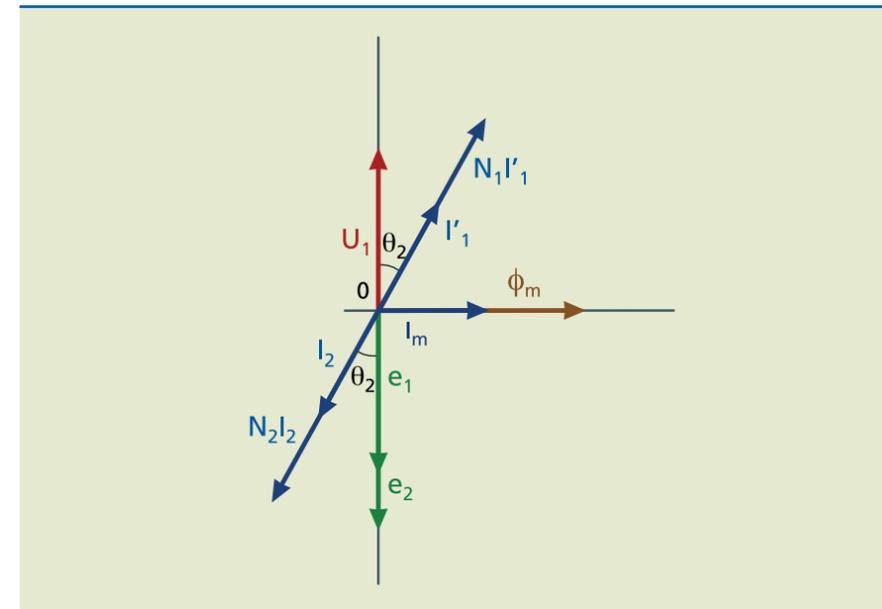
Figura 1.104

Corrente no secundário.

A corrente I_2 gera uma força magnetomotriz $f.m.m._2$. Essa força, conseqüentemente, altera o equilíbrio do sistema obtido em função do fluxo mútuo ϕ_m , que foi proporcionado pela $f.m.m.$ produzida ($N_1 \cdot I_m$). Nessas condições, o transformador absorve uma corrente elevada de tal maneira que o equilíbrio entre U_1 e e_1 se restabelece. Assim, além de circular uma corrente magnetizante I_m no primário, haverá uma corrente de reação I'_1 , cuja finalidade é gerar uma $f.m.m.$ para compensar a $f.m.m._2$. Com isso, a $f.m.m.$ resultante do sistema continuará sendo a gerada por $N_1 \times I_m$. A figura 1.105 ilustra essa situação.

Figura 1.105

Corrente de reação I'_1 .



Essa corrente de reação deve variar juntamente com a corrente no secundário, o que acontecerá se a carga instalada no secundário variar de valor.



Temos, então:

$$N_2 \cdot I_2 = N_1 \cdot I'_1$$

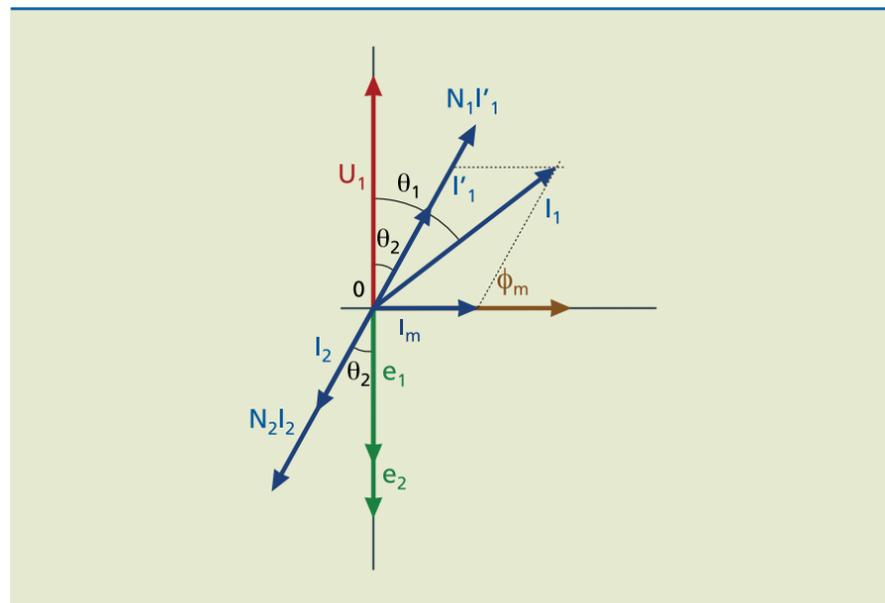
ou seja:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I'_1} \quad (1.31)$$

A resultante entre as correntes de magnetização e de reação é a corrente no primário (figura 1.106).

Figura 1.106

Corrente do enrolamento primário.



Com base nessas análises, é possível concluir que a corrente elétrica do enrolamento primário é formada por duas parcelas: a primeira magnetiza o núcleo e a segunda contrabalança a força magnetomotriz secundária. Podemos, então, analisar esse diagrama fasorial de duas maneiras:

- **Com carga reduzida** – A corrente no secundário é muito baixa; assim, a corrente de reação I'_1 também será baixa. Então, o ângulo θ_1 tende a ser de 90° , aproximando I_1 de I_m .
- **A plena carga** – A corrente no secundário é alta; assim, a corrente de reação I'_1 também será alta, resultando em uma corrente de magnetização muito baixa, e um ângulo θ_1 tendendo a 0° , o que aproxima I_1 de I'_1 .

Como na maioria das vezes o transformador estará ligado a plena carga, podemos utilizar a expressão que representa a relação de transformação da corrente elétrica:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (1.32)$$

Analisando essa equação, podemos concluir que, se a tensão no secundário for aumentada, sua corrente diminuirá e vice-versa; assim, um transformador ideal manteria a potência elétrica inalterada ($P_1 = P_2$), com eficiência de 100%. No entanto, como o transformador tem características indutivas, os enrolamentos apresentam impedância, medida em ohms, que pode ser determinada por:

$$Z_1 = \frac{U_1}{I_1} \quad \text{e} \quad Z_2 = \frac{U_2}{I_2} \quad (1.33)$$

Dividindo Z_1 por Z_2 , a relação entre as impedâncias passa a ser:

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{\frac{U_1}{I_1}}{\frac{U_2}{I_2}} \quad \frac{Z_1}{Z_2} = \frac{U_1}{I_1} \cdot \frac{I_2}{U_2} \quad \frac{Z_1}{Z_2} = \frac{U_1}{U_2} \cdot \frac{I_2}{I_1}$$

ou seja:

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2$$

Conhecendo essa relação, é possível utilizar o transformador para acoplar dois circuitos de impedâncias distintas. Por exemplo, para que haja máxima transferência de potência entre um circuito e outro, suas impedâncias têm de ser iguais. Como na maioria das vezes isso não ocorre, pode-se usar o transformador para realizar o casamento de impedâncias (figura 1.107), bastando proceder à relação de espiras dos enrolamentos.

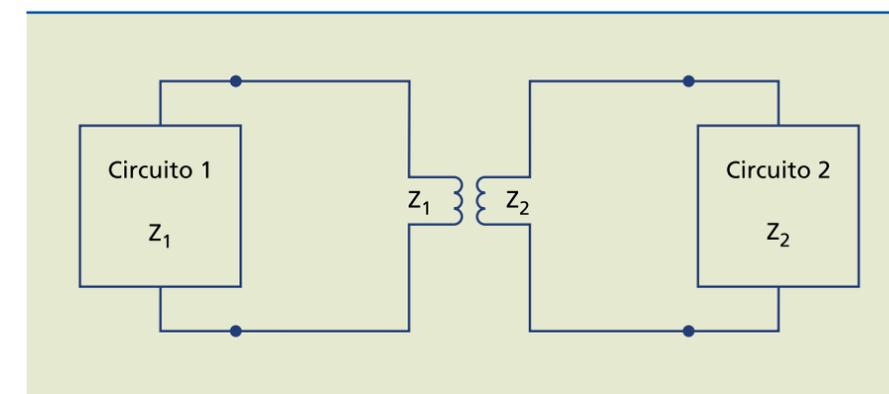


Figura 1.107

Transformador utilizado para casamento de impedâncias.

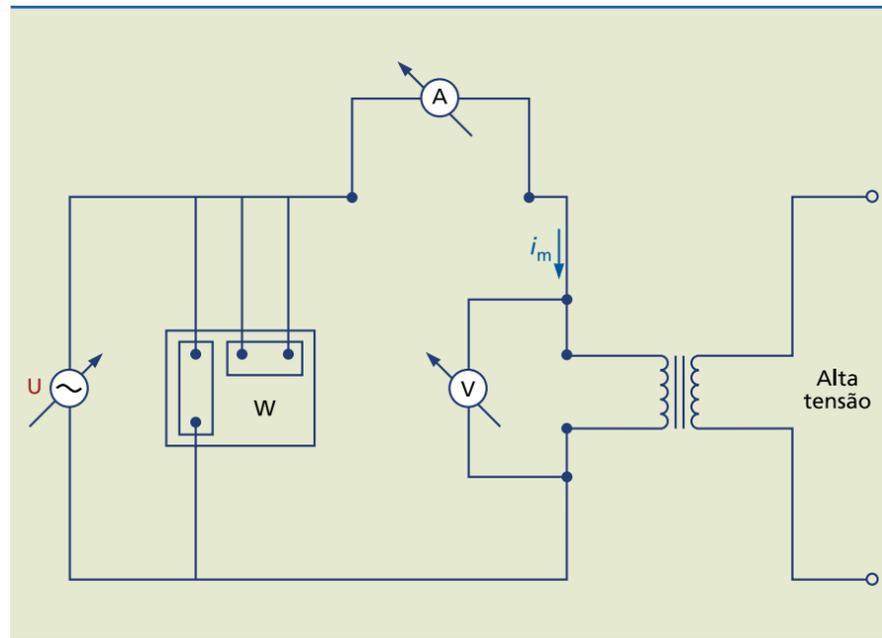
1.6.3 Transformador real

Um transformador real não possui 100% de eficiência, porque ocorrem perdas magnéticas no ferro. As perdas no ferro ou no núcleo (P_N) dependem da densidade de fluxo B , ou seja, da tensão elétrica aplicada no enrolamento.



Para determinar experimentalmente as perdas magnéticas em um transformador, efetua-se um teste conhecido como ensaio a vazio (figura 1.108), tomando o cuidado de deixar o lado de alta tensão em aberto.

Figura 1.108
Ensaio a vazio.



Para realizar o ensaio a vazio, é necessário monitorar algumas grandezas elétricas por meio de instrumentos de medida e compará-las com as especificadas pelo fabricante. Por exemplo: se a tensão U sofrer variação até que o voltímetro registre a tensão nominal, o valor específico da corrente de magnetização do núcleo I_m será indicada no amperímetro. Nessas condições, a potência registrada no wattímetro deve ser proporcional à perda que ocorre no núcleo do transformador, originada pela histerese magnética – reduzida quando se escolhe o melhor material para compor as lâminas – e por correntes parasitas – reduzidas quando o núcleo é formado por lâminas finas.

As perdas por histerese magnética (P_H) e por correntes parasitas (P_P) podem ser calculadas pelas seguintes fórmulas:

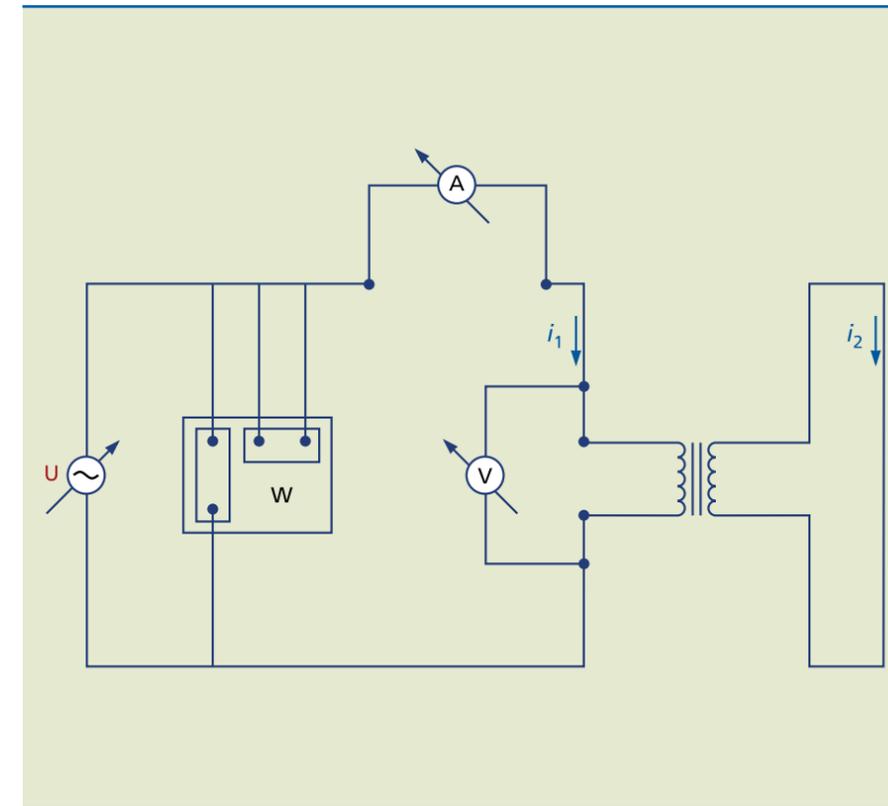
$$P_H = 10^{-7} \cdot \xi \cdot B^{1.6} \cdot f \cdot V \quad \text{e} \quad P_P = 10^{-12} \cdot \frac{\pi^2}{8 \cdot \rho} \cdot B^2 \cdot f^2 \cdot \delta^2 \cdot V \quad (1.34)$$

em que:

- ξ é o coeficiente de Steinmetz, que depende do material;
- B a densidade do fluxo magnético;
- f a frequência do fluxo magnético;
- V o volume das lâminas que compõem o núcleo;
- ρ a resistividade específica do material que compõe o núcleo;
- δ a espessura das lâminas que compõem o núcleo.

Para determinar experimentalmente as perdas no cobre em um transformador, efetua-se o ensaio em curto-circuito (figura 1.109).

Figura 1.109
Ensaio em curto-circuito.



Como os enrolamentos são compostos por fios de cobre, a resistência elétrica desses fios pode ser responsável por perdas bastante consideráveis. Para definir essas perdas, deve-se realizar um curto-circuito do lado de baixa tensão do transformador e variar a tensão U até que a tensão (voltímetro) e a corrente (amperímetro) nominais se manifestem no primário. Nesse caso, a potência lida no wattímetro será referente à perda no cobre.

As perdas no cobre (P_C) podem ser calculadas pela seguinte fórmula:

$$P_C = R_1 \cdot I_1^2 + R_2 \cdot I_2^2 \quad (1.35)$$

em que:

- R_1 é a resistência elétrica do enrolamento primário;
- R_2 , a resistência elétrica do enrolamento secundário.

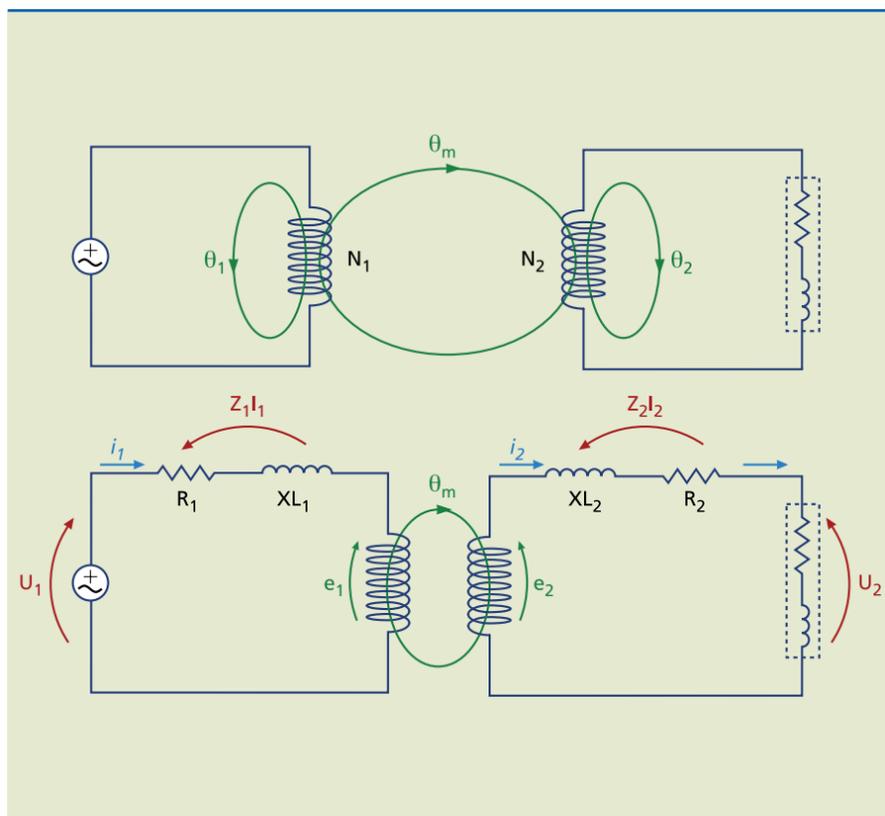
Então, a eficiência de um transformador real é expressa por:

$$E_f = \frac{P_2}{P_2 + P_C + P_N} \quad (1.36)$$



Um transformador real com suas perdas pode ser representado pelo circuito da figura 1.110.

Figura 1.110
Transformador real.



Como mencionado, o transformador não é um circuito magnético perfeito; então, aplicando a tensão U_1 no primário e ligando uma carga de natureza indutiva (Z_L) ao secundário, haverá correntes circulando pelos enrolamentos. Parte do fluxo magnético do núcleo é dispersa no primário (ϕ_1) e no secundário (ϕ_2). Esses fluxos dispersos geram uma reatância indutiva (XL) em ambos os enrolamentos.

Com a circulação das correntes primária e secundária, as impedâncias formadas por R e XL provocam quedas de tensão internas no transformador, representadas pelos produtos $Z_1 I_1$ e $Z_2 I_2$. Assim, podemos deduzir que:

- 1) No enrolamento primário: $e_1 = U_1 - Z_1 I_1$, sendo $U_1 > e_1$.
- 2) No enrolamento secundário: $e_2 = U_2 + Z_2 I_2$, sendo $e_2 > U_2$.

em que:

$$Z_1 = R_1 + jXL_1 \text{ e } Z_2 = R_2 + jXL_2$$

Podemos simplificar a representação do transformador utilizando um método chamado impedância refletida, como mostra a figura 1.111.

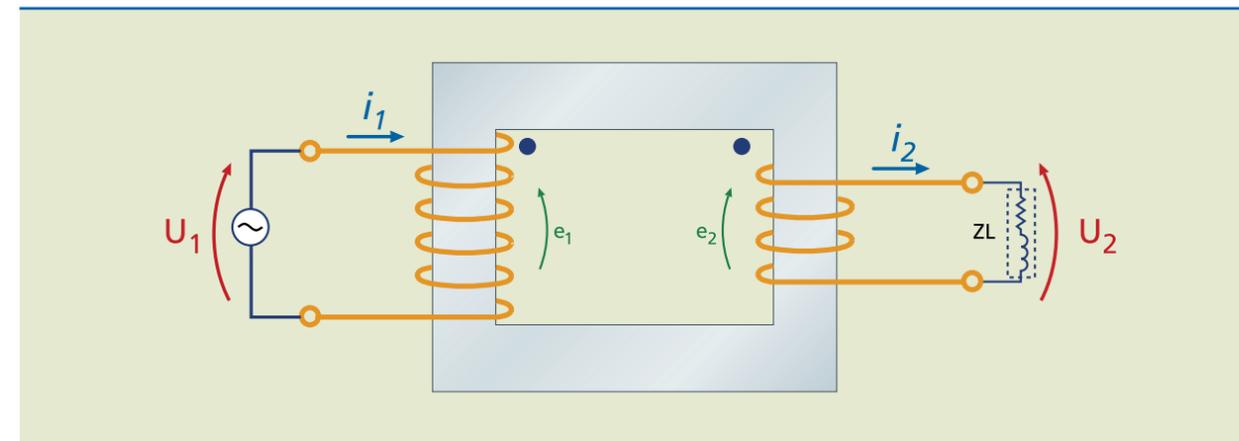


Figura 1.111
Transformador ideal com carga indutiva Z_L .

Colocando o transformador em vazio, ou seja, $Z_L = \infty$, a corrente secundária tende a zero. Então, para qualquer valor de Z_L , a impedância secundária Z_2 , tendo como referência os terminais do enrolamento secundário a partir da carga, vale:

$$Z_2 = \frac{U_2}{I_2}, \text{ conforme representado na figura 1.112.}$$

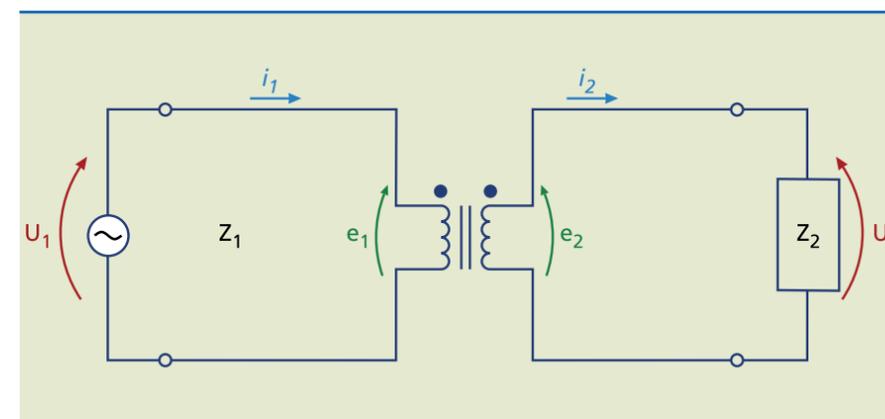


Figura 1.112
Transformador com as impedâncias de entrada e de saída equivalentes.

Da mesma forma, a impedância equivalente de entrada, tomando como referência os terminais do enrolamento primário a partir da fonte de tensão U_1 , vale:

$$Z_1 = \frac{U_1}{I_1}.$$

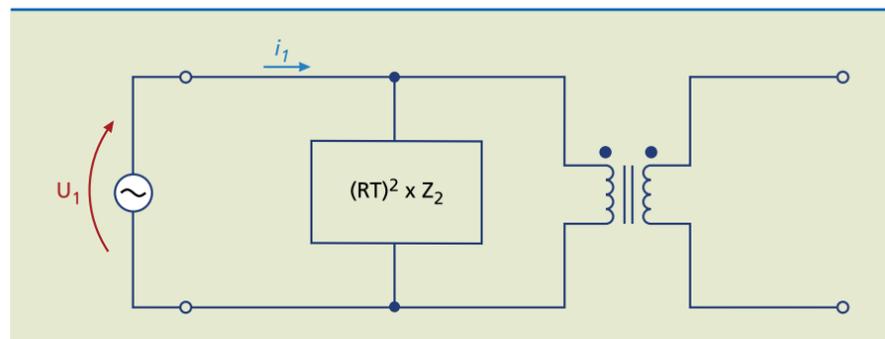
Com base na equação anterior, concluímos que qualquer alteração na carga implica alteração na corrente do secundário e, conseqüentemente, na intensidade de corrente primária.

Assim, podemos refletir a impedância do secundário no primário, simplificando a representação de um transformador (figura 1.113).



Figura 1.113

Transformador com a impedância do secundário refletida no primário.



Dessa maneira, com o secundário em aberto e com Z_1 de valor desprezível, em comparação com Z_L (que é igual a Z_2), temos:

$$Z_1 = (RT)^2 \cdot Z_2$$

em que:

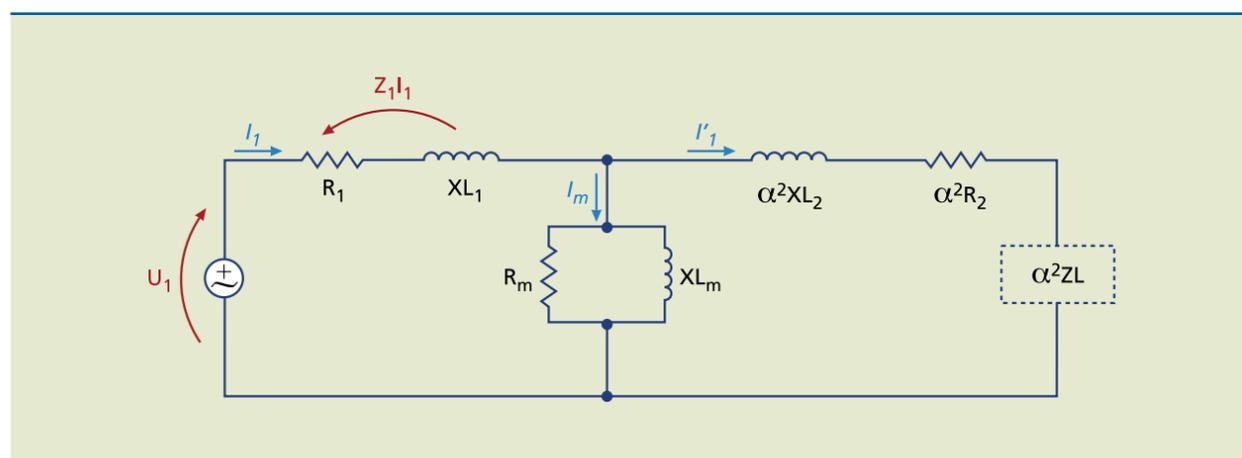
$$RT = \frac{N_1}{N_2} \quad (1.37)$$

Essa expressão é verdadeira, pois o transformador pode ser utilizado para casamento de impedâncias, como descrito anteriormente.

É possível, então, desenhar o circuito que equivale a um transformador, com suas perdas no ferro, relutâncias e impedâncias secundárias refletidas no primário (figura 1.114).

Figura 1.114

Circuito equivalente de um transformador em vazio ou com carga. O termo XL_m representa a componente reativa do transformador em aberto, e o parâmetro α , a relação de transformação RT .



Se colocarmos o secundário em aberto, a corrente do secundário será zero. Nessa condição, a corrente de reação I'_1 é anulada e apenas a corrente de magnetização circula, produzindo pequena queda de tensão em Z_1 .

Se a impedância Z_1 e a queda de tensão $Z_1 I_1$ forem pequenas, podemos construir outro circuito equivalente, conforme descrito na figura 1.115.

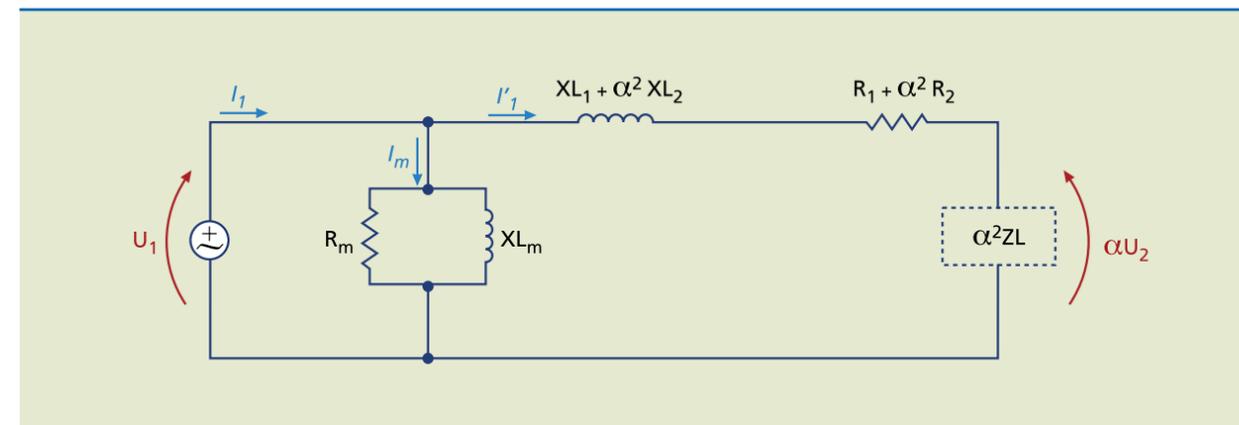


Figura 1.115

Circuito equivalente de um transformador com impedâncias refletidas.

Nesse circuito, deslocando o ramo $R_m - XL_m$, as impedâncias internas do primário e do secundário podem ser agrupadas, resultando nos seguintes parâmetros:

- Impedância equivalente referida ao primário: $Z_{e1} = R_{e1} + j XL_{e1}$
- Resistência equivalente referida ao primário: $R_{e1} = R_1 + \alpha^2 R_2$
- Reatância equivalente referida ao primário: $XL_{e1} = XL_1 + \alpha^2 XL_2$

Ainda analisando o mesmo circuito, se colocarmos uma carga no primário, a corrente de reação I'_1 será bem maior que a corrente de magnetização I_m , como já explicado. Assim, desprezando a corrente de magnetização, o circuito equivalente simplificado pode ser representado conforme a figura 1.116.

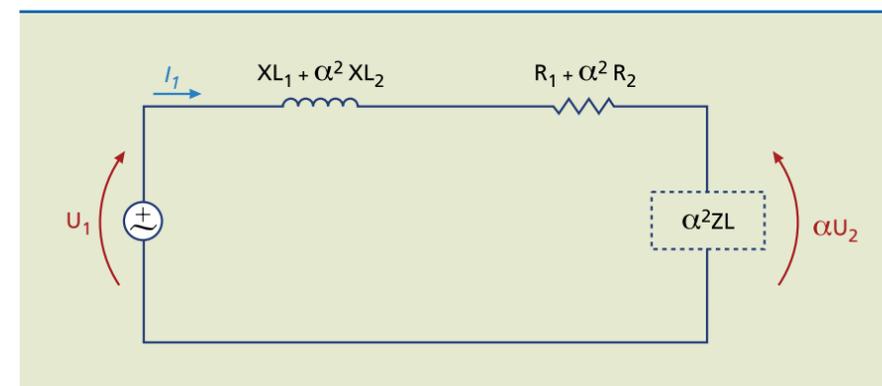


Figura 1.116

Circuito equivalente de um transformador com corrente de magnetização desprezada.

Nessas condições, a corrente primária I_1 passa a valer:

$$I_1 = \frac{U_1}{Z_{e1} + \alpha^2 ZL} \quad (1.38)$$

Considerando que a carga a ser ligada ao secundário pode ter caráter resistivo, indutivo ou capacitivo, podemos fazer uma análise fasorial das correntes e tensões para saber que efeito a carga tem no primário, como ilustram as figuras 1.117 a 1.119.



Figura 1.117

Diagrama fasorial com carga de caráter resistivo – impedância refletida no primário.

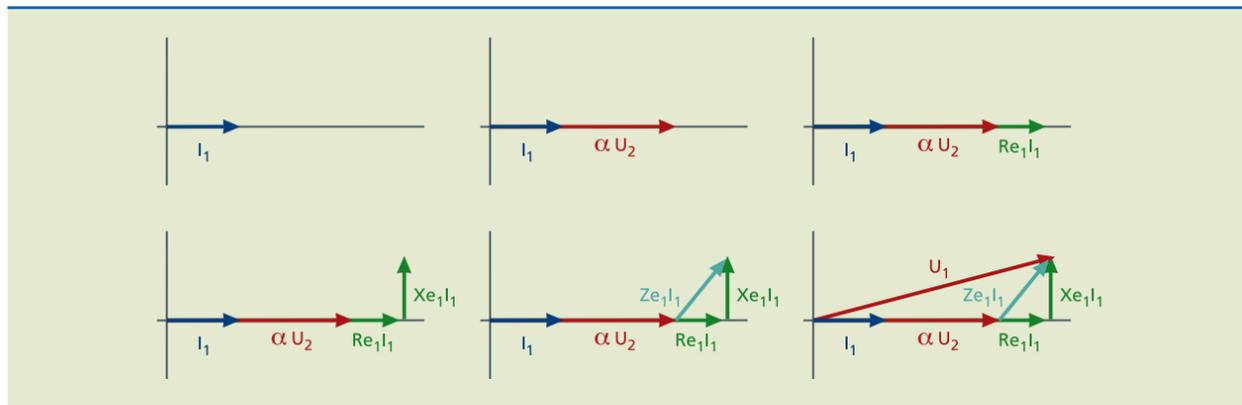


Figura 1.118

Diagrama fasorial com carga de caráter indutivo – impedância refletida no primário.

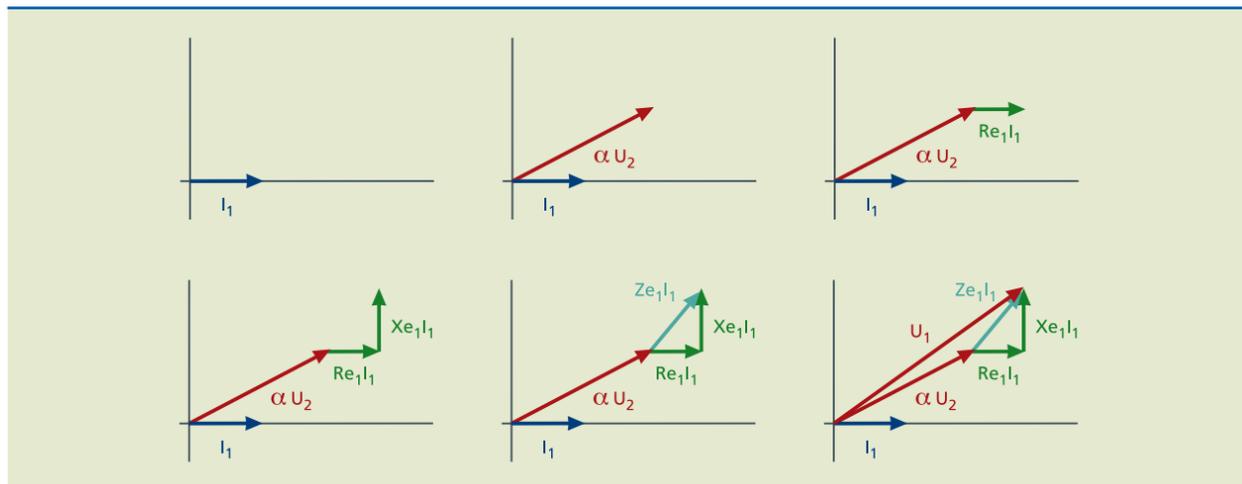
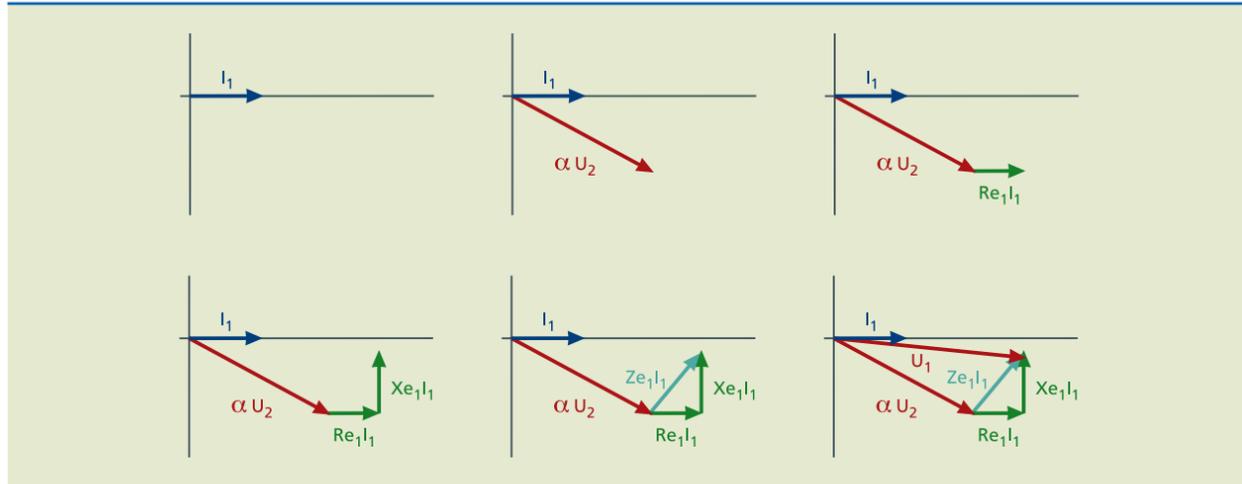


Figura 1.119

Diagrama fasorial com carga de caráter capacitivo – impedância refletida no primário.



Nos três casos apresentados, verificamos que a diferença fasorial entre U_1 e αU_2 será sempre proporcional à queda de tensão $Z_{e1}I_1$, ou seja, a relação entre αU_2 e U_1 terá a mesma proporção que existe na relação entre a tensão nos terminais do secundário e a tensão em vazio, respectivamente.

É possível também refletir os valores do primário no secundário e verificar o diagrama fasorial considerando as cargas resistiva, indutiva e capacitiva, conforme ilustra a figura 1.120.

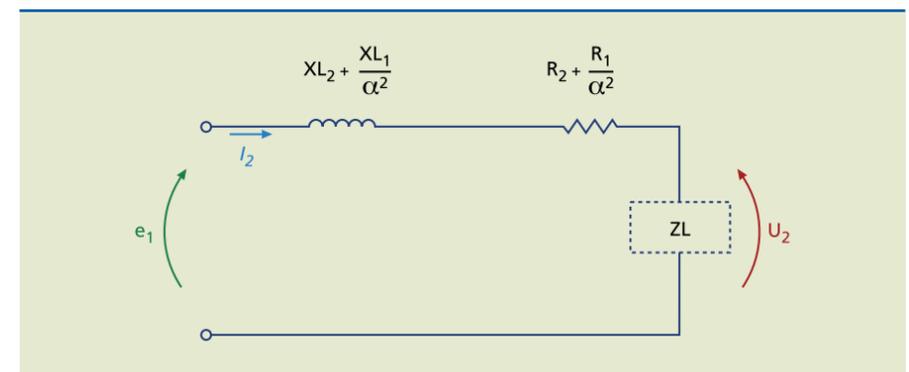


Figura 1.120

Circuito equivalente com impedância refletida no secundário.

Com base nesse circuito e nas expressões representadas em seus componentes, pode-se concluir que:

- Impedância equivalente referida ao secundário: $Z_{e2} = R_{e2} + j XL_{e2}$
- Resistência equivalente referida ao secundário: $R_{e2} = R_2 + \frac{R_1}{\alpha^2}$
- Reatância equivalente referida ao secundário: $XL_{e2} = XL_2 + \frac{XL_1}{\alpha^2}$

Figura 1.121

Diagrama fasorial com carga de caráter resistivo – impedância refletida no secundário.

As figuras 1.121 a 1.123 representam os diagramas fasoriais com cargas de caráter resistivo, indutivo e capacitivo, respectivamente, para a nova situação.

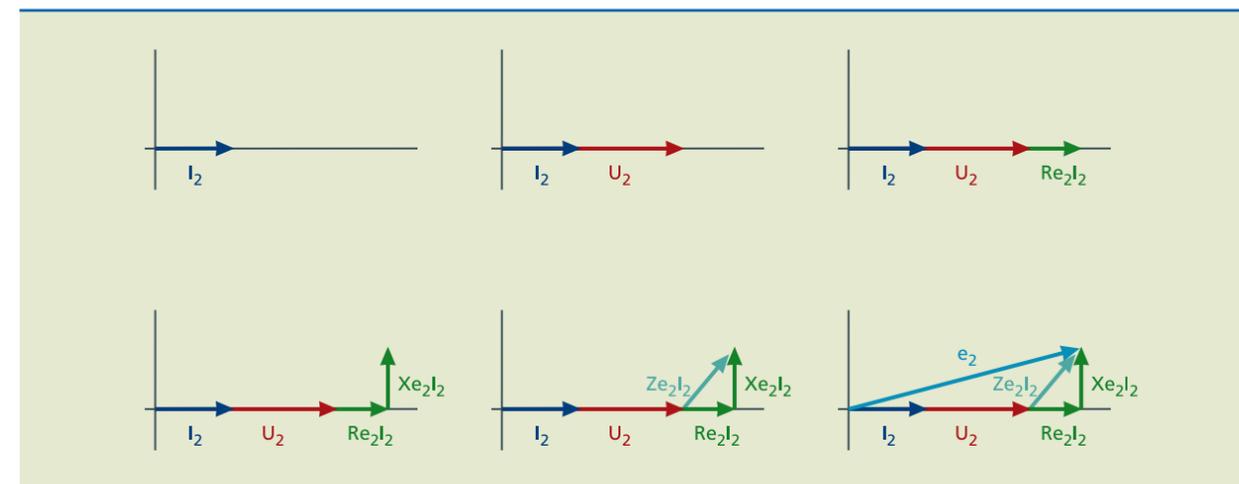


Figura 1.122

Diagrama fasorial com carga de caráter indutivo – impedância refletida no secundário.

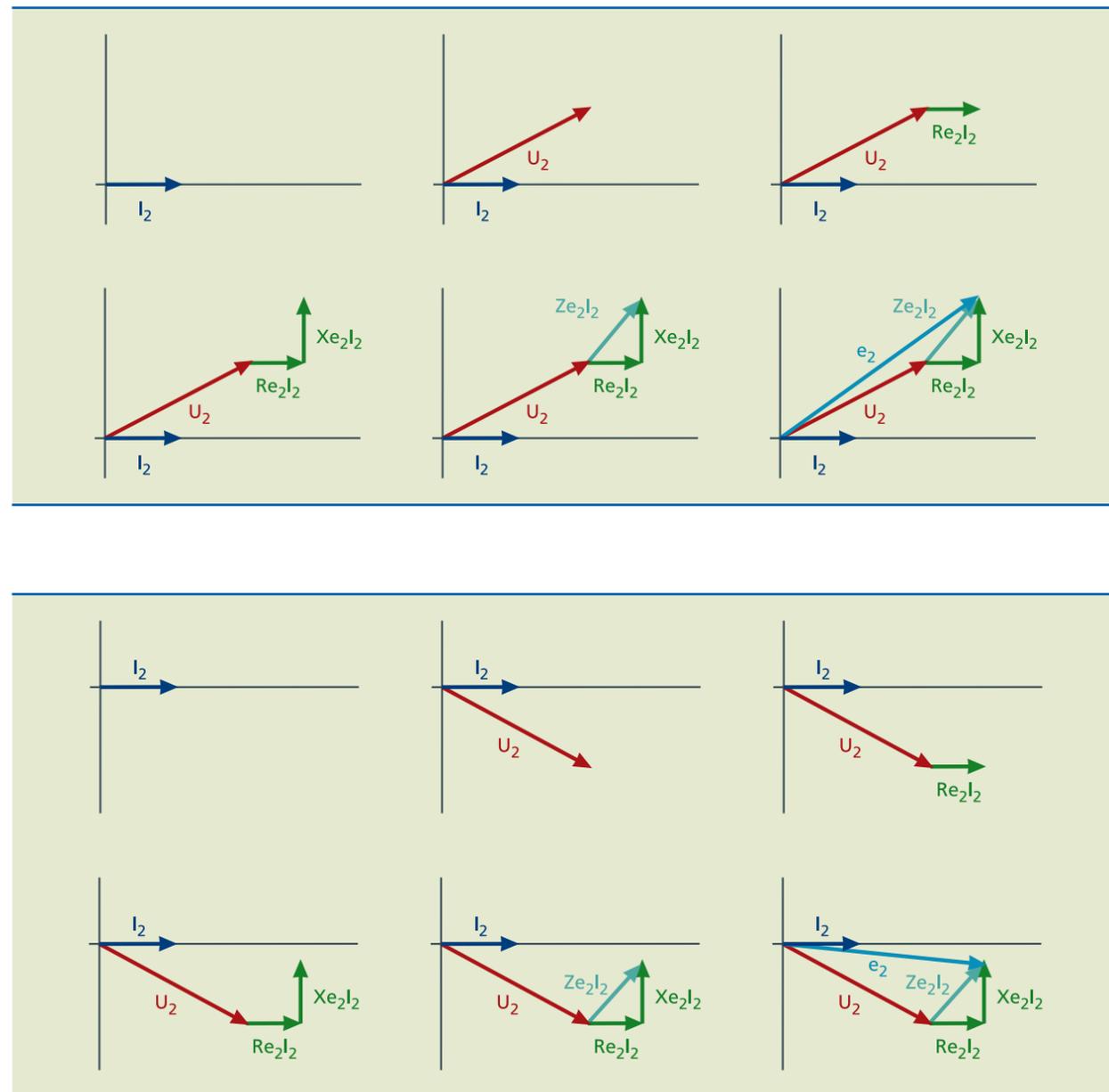


Figura 1.123

Diagrama fasorial com carga de caráter capacitivo – impedância refletida no secundário.

1.6.4 Autotransformador

O autotransformador é um transformador que possui somente um enrolamento, em que, efetuando-se diversas derivações, podem ser obtidos diferentes valores de tensão. O transformador monofásico tem dois enrolamentos isolados eletricamente. Na figura 1.124, verifica-se a colocação de um terminal em um deles para construir um autotransformador.

Emprega-se o autotransformador para tensões mais baixas, pois, como ele utiliza o mesmo enrolamento para primário e secundário, seria arriscado usá-lo em altas tensões, principalmente se ocorresse interrupção no enrolamento (circuito

aberto). Por exemplo, vamos imaginar que em um transformador abaixador de tensão utilizado na distribuição de energia elétrica há abertura do enrolamento primário, que tem uma tensão de dezenas de milhares de volts e relação de transformação de 100:1. Em razão desse rompimento, nada chegará ao secundário, uma vez que os enrolamentos são isolados eletricamente. No entanto, se fosse um autotransformador, a interrupção do enrolamento implicaria uma tensão primária na carga. Dessa maneira, em vez de receber 220 V, receberia cem vezes mais, 22 000 V. Por causa desse risco, sua aplicação é restrita a algumas aplicações da área de eletrotécnica, mas, comparado com o transformador convencional, ele apresenta perdas menores e utiliza menos núcleo de ferro.

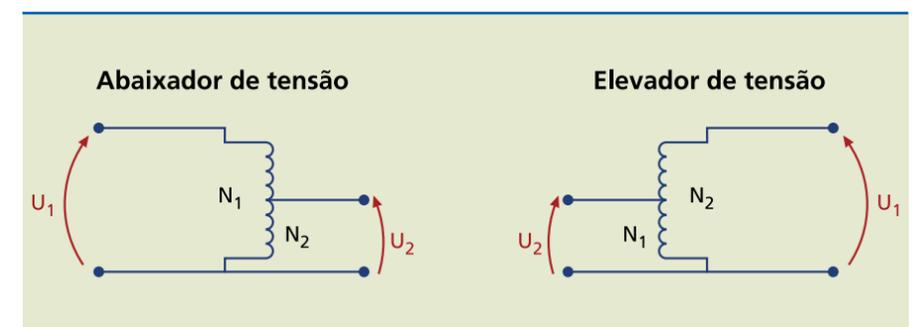


Figura 1.124

Autotransformador.

1.6.5 Princípio da transformação trifásica

A forma mais eficaz de transmitir uma corrente elétrica em longas distâncias é por corrente alternada. O uso em escala industrial da corrente alternada teve início no século XIX, quando George Westinghouse contratou Nikola Tesla para montar uma linha de transmissão que pudesse transportar a energia elétrica produzida pela energia hidráulica das Cataratas do Niágara até as indústrias da cidade de Buffalo, no estado norte-americano de Nova York.

Tesla estudava o campo magnético girante (abordado no capítulo 4) e sistemas polifásicos e patenteou o termo “corrente alternada”. A Westinghouse Electric Corporation, usando a patente de Tesla, ganhou o contrato de comissão internacional das Cataratas, contrariando a ideia de fornecer energia elétrica por corrente contínua, proposta por Thomas Edison, representante da General Electric (GE). No final das negociações, porém, o contrato de construção das linhas de transmissão de energia para Buffalo foi concedido à GE.

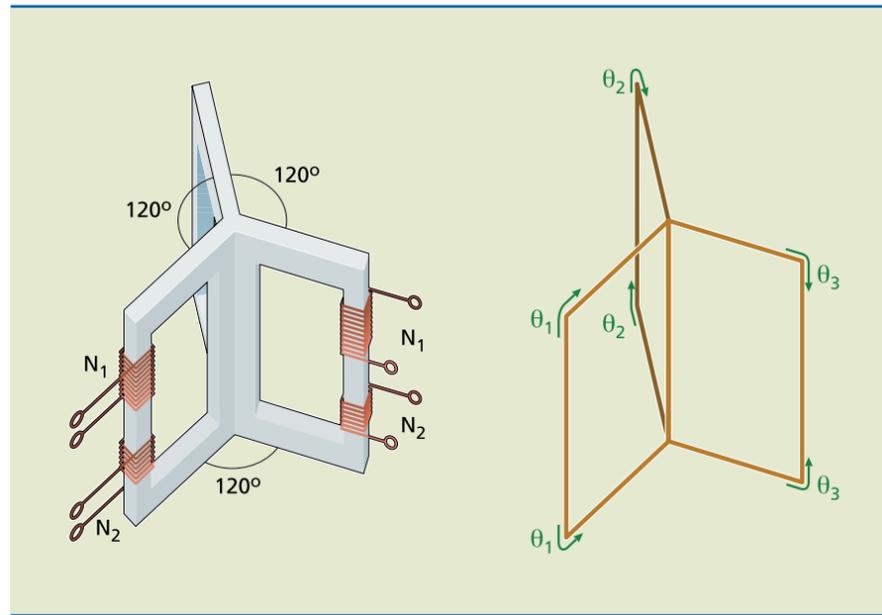
Desde aquela época, a forma mais comum de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica em corrente alternada é o sistema trifásico, pois as máquinas trifásicas são mais eficientes que as monofásicas. Atribui-se esse ganho de eficiência à utilização plena dos circuitos magnéticos (dispersão reduzida ao mínimo de fluxo magnético).

Um transformador trifásico é desenvolvido com três transformadores monofásicos reunidos em um núcleo trifásico. O princípio de funcionamento dessa união de três circuitos magnéticos em um único conjunto está ilustrado na figura 1.125.



Figura 1.125

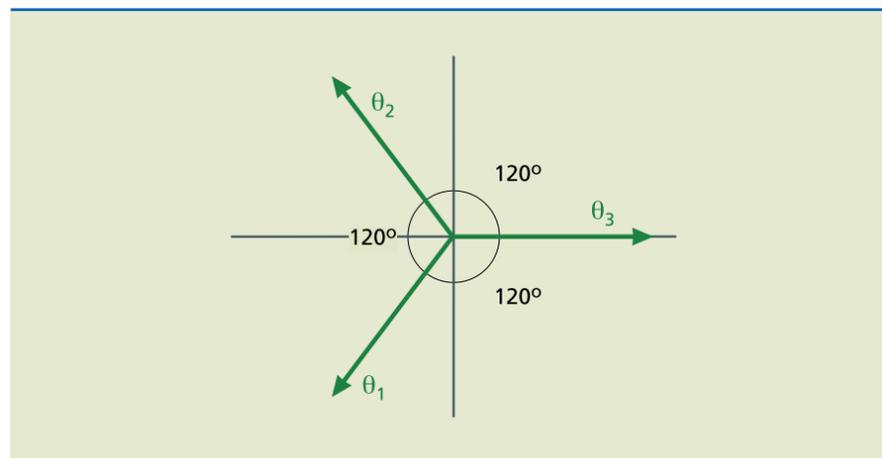
Princípio de funcionamento de um transformador trifásico.



Esse conjunto é formado por três núcleos montados de maneira que suas colunas externas fiquem distanciadas fisicamente de 120° . Cada coluna externa possui enrolamento primário (N_1) e secundário (N_2), e cada enrolamento primário recebe uma tensão elétrica de mesmo valor numérico, mas com defasagem de 120° . Dessa maneira, os fluxos magnéticos Φ_1 , Φ_2 e Φ_3 também estão defasados de 120° (figura 1.126).

Figura 1.126

Diagrama fasorial do fluxo magnético.

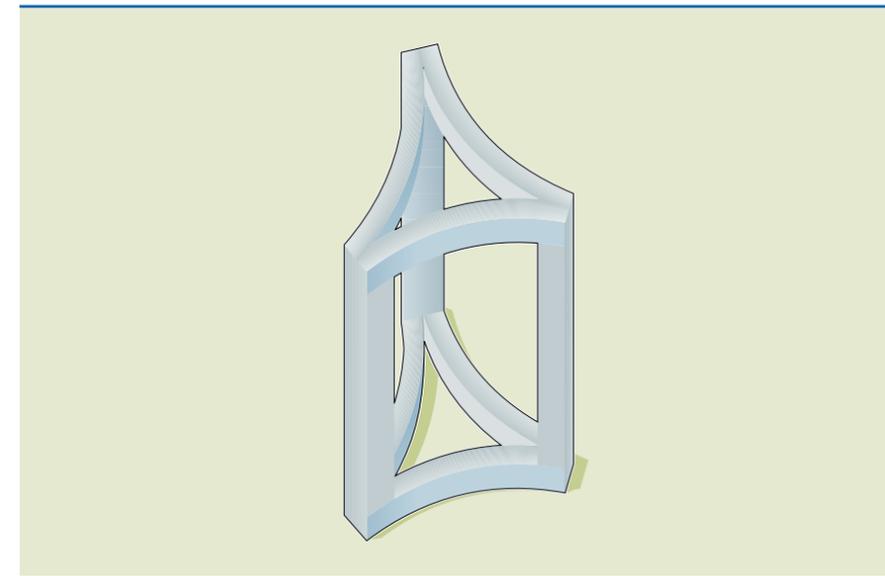


Como a resultante dos três fluxos magnéticos é nula, a coluna central do núcleo não é atravessada por fluxo magnético, podendo, então, ser eliminada da constituição do núcleo (figura 1.127).

Esse formato é simétrico em relação às três colunas e os três circuitos magnéticos apresentam a mesma relutância magnética e as mesmas correntes magnetizantes, resultando em um sistema de tensão trifásico simétrico (120° de defasagem em cada tensão) e equilibrado (mesmo valor para cada tensão).

Figura 1.127

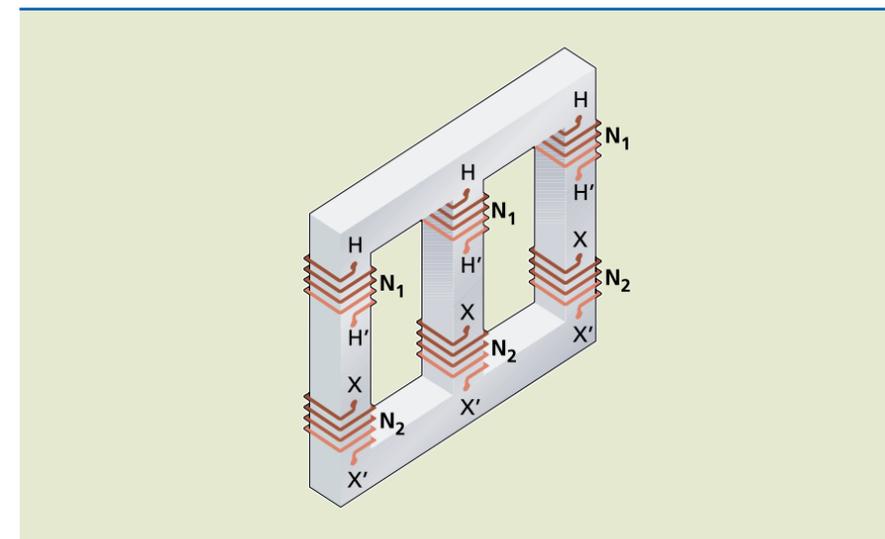
Núcleo trifásico.



No entanto, como a construção de um núcleo com essa disposição é muito trabalhosa, a condição de simetria não é levada em consideração – praticamente não possui importância – e constrói-se o núcleo do transformador trifásico como mostrado na figura 1.128.

Figura 1.128

Transformador trifásico.



Nesse conjunto, os fluxos magnéticos têm de ser equilibrados e simétricos, pois devem induzir em cada enrolamento primário uma força contraeletromotriz em relação à tensão aplicada.

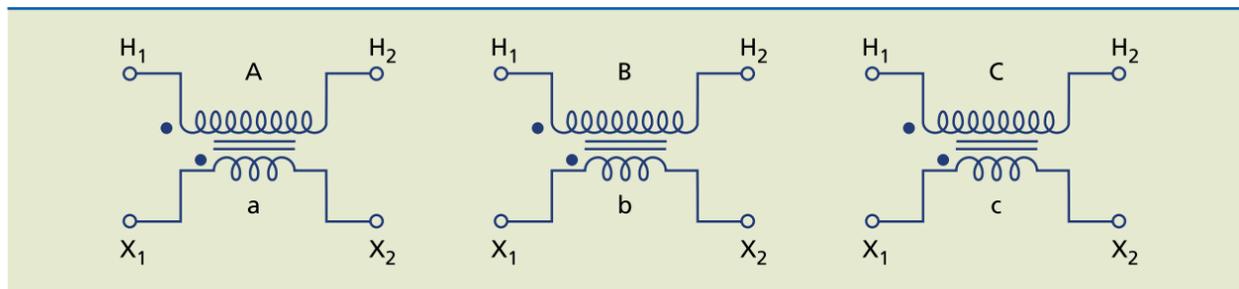
Pode-se notar que a relutância magnética no braço central é menor que nas laterais, o que faz com que a corrente magnetizante central seja menor, gerando, então, um desequilíbrio, na verdade desprezível, pois somente com o transformador em vazio esse desequilíbrio se manifesta (como visto, a corrente magnetizante pode ser desprezada com o transformador com carga).



Figura 1.129

Três transformadores monofásicos idênticos.

Assim, um transformador trifásico não é muito diferente de três transformadores monofásicos idênticos (figura 1.129).



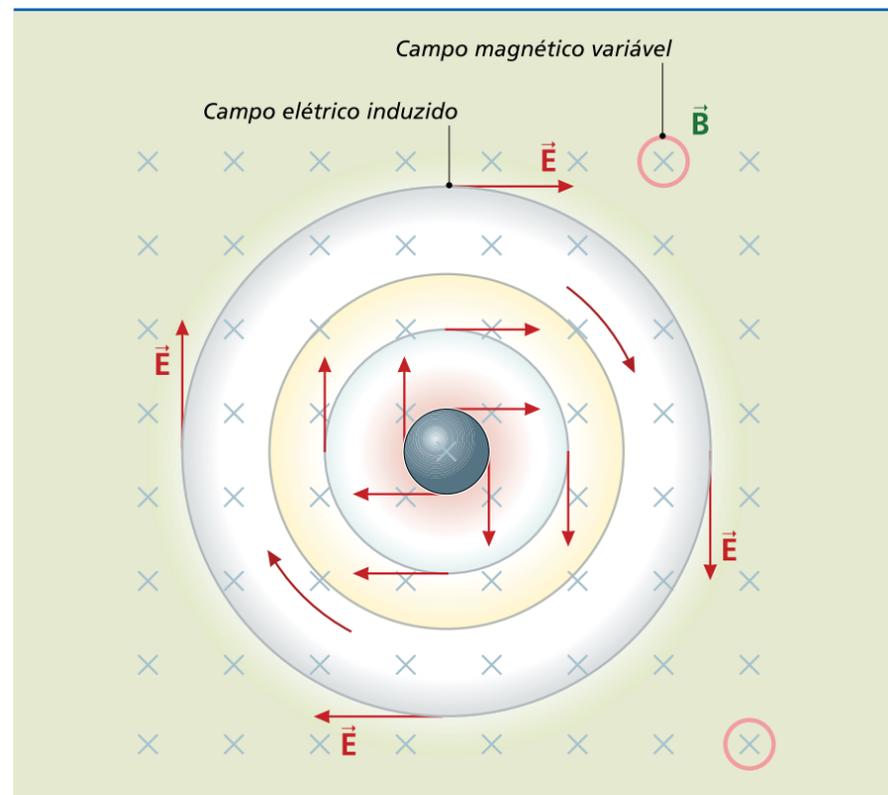
1.7 Geração de campo elétrico pela variação do fluxo magnético

Os tratados científicos relatados por alguns cientistas e pesquisadores (Coulomb, Ørsted, Ampère, Faraday e outros) citados no decorrer deste capítulo estabeleceram os princípios do magnetismo e da eletricidade. O físico escocês James Maxwell revolucionou esses princípios ao generalizá-los em uma teoria, ao afirmar:

- Um campo magnético que varia com o tempo tem os efeitos equivalentes de um campo elétrico (figura 1.130).

Figura 1.130

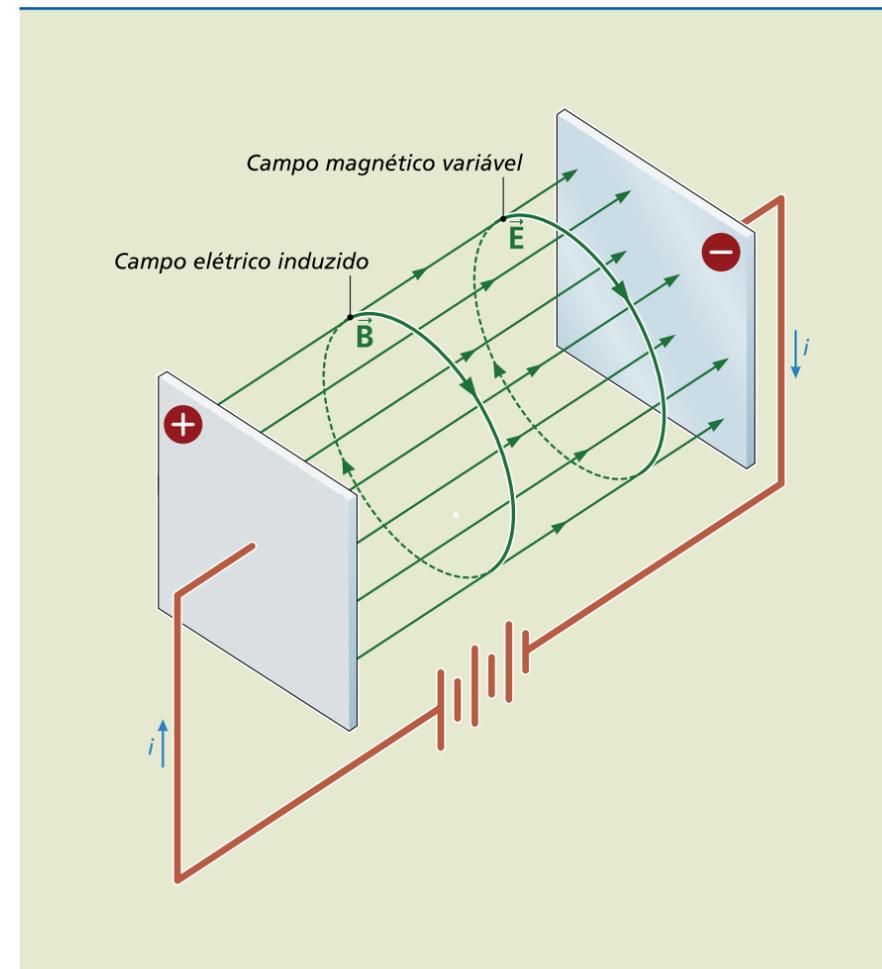
Geração de campo elétrico pela variação do campo magnético.



- Um campo elétrico que varia com o tempo tem os efeitos equivalentes de um campo magnético (figura 1.131).

Figura 1.131

Geração de campo magnético pela variação do campo elétrico.



Em outras palavras, Maxwell propôs que, além da corrente elétrica, um campo elétrico variável poderia gerar um campo magnético. Com isso, formulou matematicamente a existência de uma perturbação oriunda de dois efeitos: um campo elétrico variável que produz um campo magnético, também variável, que, por sua vez, produz um campo elétrico, igualmente variável. Isso significa que essa perturbação se propaga pelo espaço porque um campo induz o outro. Tal perturbação é chamada de onda eletromagnética.

1.7.1 Onda eletromagnética

Maxwell considerou que as ondas eletromagnéticas eram transversais, mesmo comportamento que seu contemporâneo Augustin Fresnel, cientista francês, atribuía à luz.

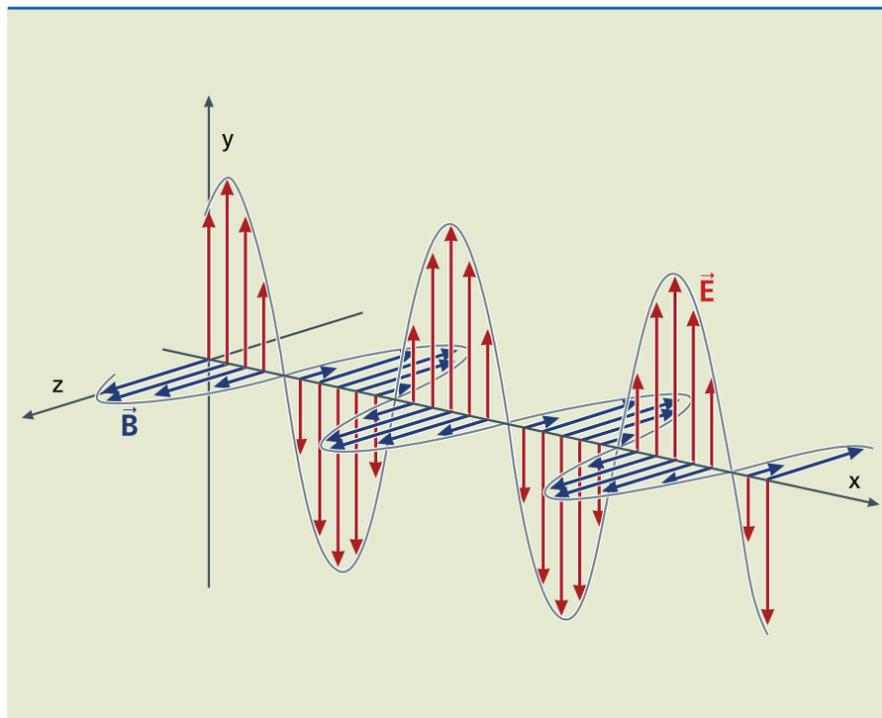
Em suas observações, Maxwell considerou que, se em um ponto A qualquer do espaço surgir uma perturbação elétrica variável, esse campo elétrico (\vec{E}) induzirá um campo magnético (\vec{B}) variável e de direção perpendicular ao campo



elétrico, distante do ponto A. O campo magnético variável induzirá um campo elétrico variável, também de direção perpendicular e distante do campo magnético. Portanto, os vetores que representam esses campos formam um ângulo de 90° . O movimento da onda está em um vetor cuja direção é perpendicular tanto a \vec{E} como a \vec{B} , formando uma figura geométrica conhecida como triedro direto (figura 1.132), que posteriormente ficou conhecido como vetor de Poynting.

Figura 1.132

Onda eletromagnética.



Em sua teoria ondulatória, Maxwell estabeleceu que a velocidade com que as ondas eletromagnéticas se propagam é:

$$c = \sqrt{\frac{1}{\epsilon_0 \cdot \mu_0}} \quad (1.39)$$

em que:

- ϵ_0 é a constante dielétrica do vácuo;
- μ_0 é a permeabilidade magnética do vácuo.

Conhecendo os valores dessas constantes, podemos aplicá-los na fórmula anterior e determinar a velocidade da luz.

$$c = \sqrt{\frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}}} \rightarrow c = \sqrt{9 \cdot 10^{16}} \rightarrow c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \quad (1.40)$$

Portanto, a velocidade de propagação de uma onda eletromagnética no vácuo é idêntica à velocidade da luz no vácuo. Essa constatação fez com que Maxwell suspeitasse que a luz fosse uma onda eletromagnética e realizasse vários experimentos com o objetivo de comprovar a existência desse tipo de onda.

Após a morte prematura de Maxwell, o alemão Heinrich Hertz montou, em 1887, um experimento utilizando circuitos oscilantes com receptores ressonadores que operavam na mesma frequência dos osciladores (figura 1.133).

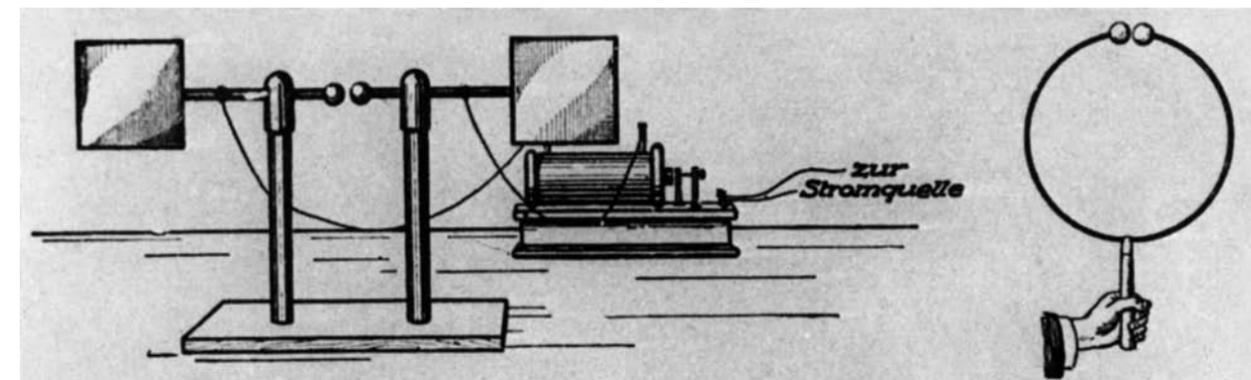


Figura 1.133

Esquema do experimento.

Hertz, finalmente, comprovou as hipóteses de Maxwell e começou a preparar o caminho para o desenvolvimento da tecnologia das transmissões sem meios físicos, popularizada pelo telégrafo sem fio do italiano Guglielmo Marconi.

Mesmo considerando que a luz era uma onda eletromagnética, os pesquisadores da época também atribuíam a ela um comportamento de partícula. Essa dualidade onda-partícula ainda é defendida por muitos cientistas.

Em 1887, Heinrich Hertz observou um fenômeno que, mais tarde, foi chamado de efeito fotoelétrico: a expulsão de partículas negativas da superfície de um metal ao se incidir sobre ela uma radiação eletromagnética. Naquele tempo, por ausência de elementos teóricos, esse fenômeno foi pouco explorado, pois só poderia ser mais bem compreendido com a descoberta do elétron.

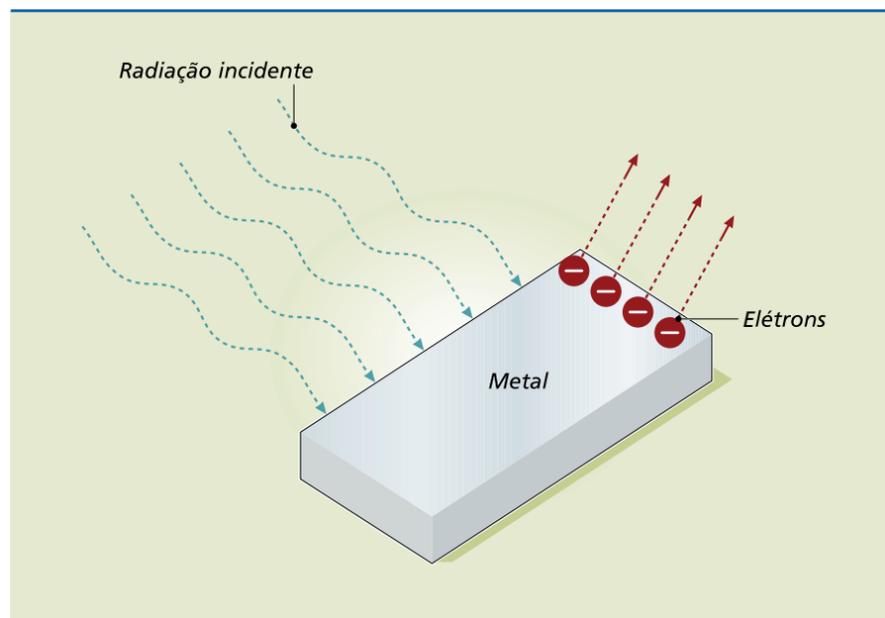
Quem conseguiu explicar o efeito fotoelétrico de maneira definitiva foi o alemão Albert Einstein, no século XX. Ele sugeriu que a luz era composta de partículas denominadas fótons, estendendo a teoria proposta pouco antes pelo também alemão Max Planck, com base na seguinte hipótese: “ao interagir com a matéria, a radiação eletromagnética (como a luz) comporta-se como partícula (denominada fóton), cuja energia, chamada quanta, é proporcional à frequência da radiação. Essa descoberta de que a energia é da radiação é transferida em pacotes (os quanta) de energia deu origem à Teoria Quântica, que explica a radiação eletromagnética e também o elétron como entidades que ora se comportam como ondas ora como partículas. Assim, a luz é uma



entidade que possui as características de partícula e de onda. Ou seja, as teorias corpuscular e ondulatória não estão erradas: elas se complementam.

Durante a interação com a matéria, a energia desse fóton é totalmente transferida para o elétron. Ou seja, o elétron só absorve quantidades discretas (bem definidas) de energia. Essa energia pode ser suficiente para arrancá-lo do átomo. Mas isso só acontece quando a energia da radiação tem um valor mínimo, ao qual se dá o nome de quanta. Radiação de baixa frequência, como a luz vermelha ou azul, não arranca elétrons dos átomos. Mas a luz ultravioleta, de maior frequência e, portanto, maior energia, é capaz de arrancá-los.

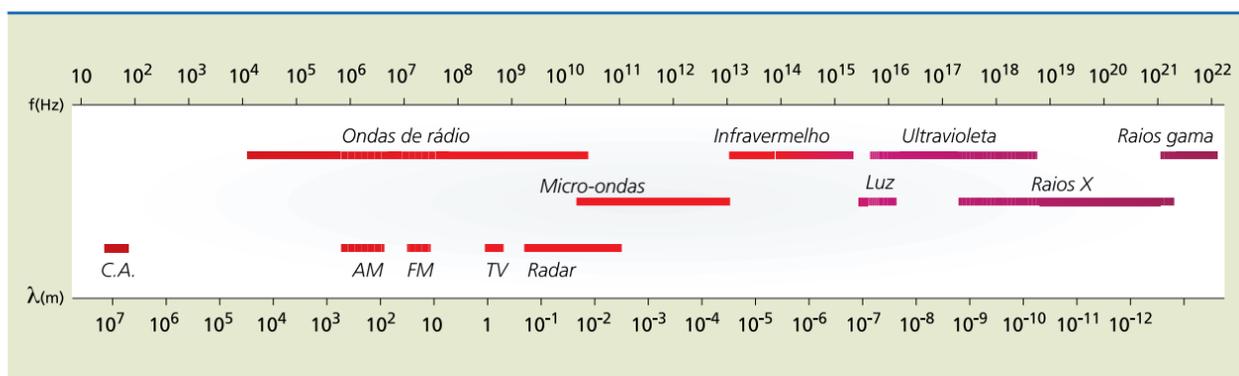
Figura 1.134
Efeito fotoelétrico.



1.7.2 Espectro eletromagnético

Na famosa experiência de Hertz, o cientista produziu ondas eletromagnéticas estacionárias, chamadas posteriormente de ondas hertzianas, determinando a velocidade e o comprimento de onda. Há grande variação de comprimentos e frequências das ondas eletromagnéticas, que podem ser reunidas em um conjunto denominado espectro eletromagnético (figura 1.135).

Figura 1.135
Espectro eletromagnético.

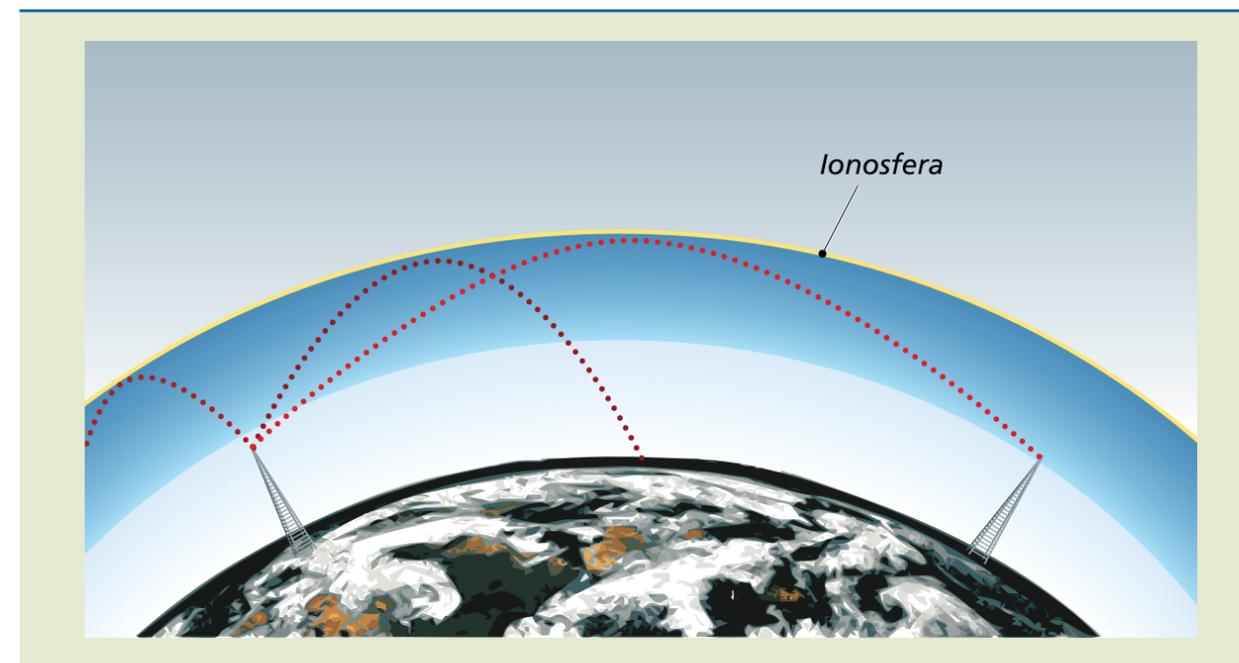


Ondas de rádio

Marconi realizou diversas experiências com seu telégrafo sem fio, instalando estações e antenas cada vez mais distantes, até mesmo em navios. Mas como essas ondas eram capazes de cruzar o oceano Atlântico?

Para explicar esse fenômeno, o norte-americano Arthur Edwin Kennelly e o inglês Oliver Heaviside sugeriram a existência de uma camada da atmosfera, a ionosfera, onde essas ondas seriam refletidas, o que permitiria captá-las a grandes distâncias da fonte emissora (figura 1.136).

Figura 1.136
Representação das ondas de rádio refletindo na ionosfera.



A atmosfera possui várias camadas. Em uma delas, denominada camada de Heaviside, a pressão do ar é tão baixa que sofre a ação da luz solar, causando interferência nas transmissões de ondas eletromagnéticas de certa frequência e comprimento de onda. As ondas eletromagnéticas que mais sofrem interferência são as ondas de rádio (AM e FM), conhecidas como ondas hertzianas. Como essas ondas têm grande comprimento, elas difratam facilmente de árvores e prédios e são refletidas por grandes cadeias montanhosas. As ondas de rádio com frequência em torno de 10^8 Hz e cerca de 1 m de comprimento são as utilizadas para TV (VHF e UHF). Entretanto, como elas não são refletidas pela ionosfera, são necessários satélites para transmissões a longas distâncias (figura 1.137).



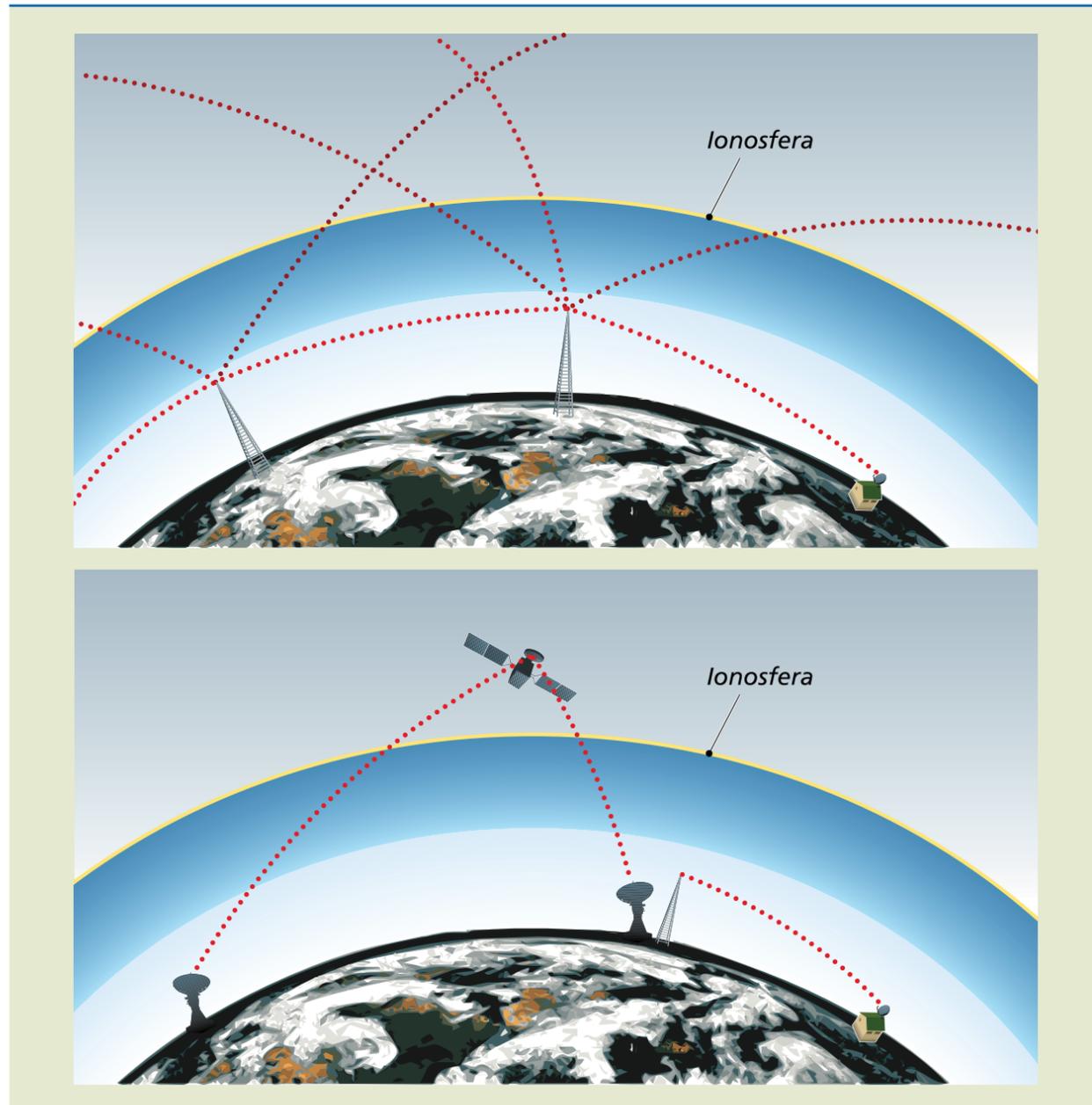


Figura 1.137
Ondas de TV.

Micro-ondas

São ondas eletromagnéticas cuja frequência está compreendida entre 10^9 e 10^{11} Hz, e comprimento entre 1 e 0,001 m. Podem ser utilizadas na transmissão de sinais de TV, em telefonia e em modelos antigos de radares.

Marconi estabeleceu os princípios de funcionamento de um radar, e o inglês Robert Alexander Watson Watt desenvolveu o primeiro radar de utilização prática, em 1935. Basicamente, é um instrumento que, ao emitir um pulso de micro-ondas, refletido por um anteparo (um avião, por exemplo), permite a localização desse anteparo por causa da diferença de tempo entre a emissão e a reflexão do pulso (figura 1.138).

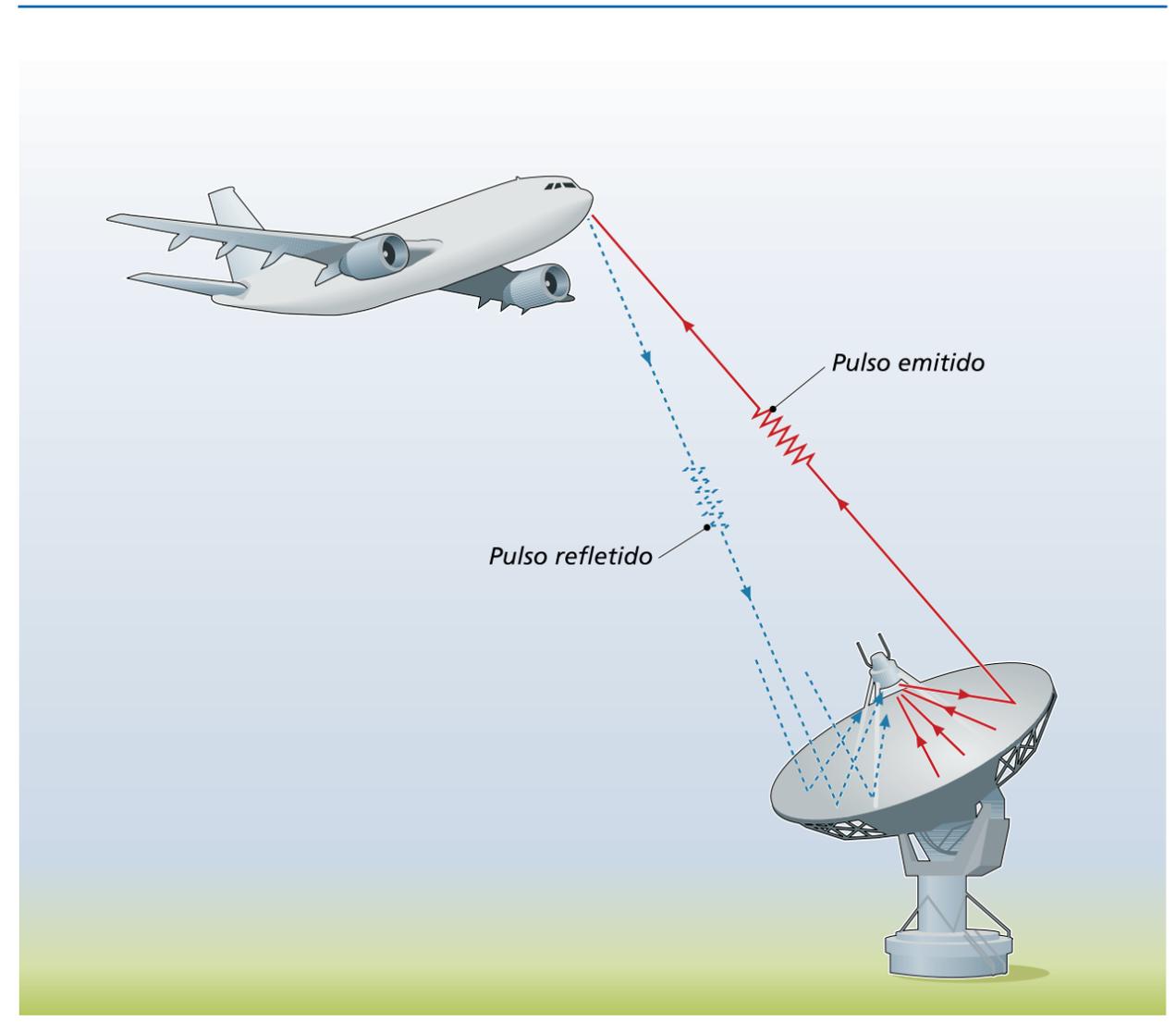


Figura 1.138
Radar que utiliza micro-ondas.

Radiação infravermelha

Como o calor do Sol chega à Terra? O Sol emite ondas com comprimento entre 10^{-4} e 10^{-7} m e frequência superior à das micro-ondas. Essas ondas interagem com os corpos, produzindo aquecimento. São chamadas infravermelhas pelo fato de estarem próximas, no espectro eletromagnético, da cor vermelha da luz visível. Dependendo do tipo de aplicação e do ambiente industrial, os sensores de presença ópticos podem utilizar o infravermelho para detecção de objetos.

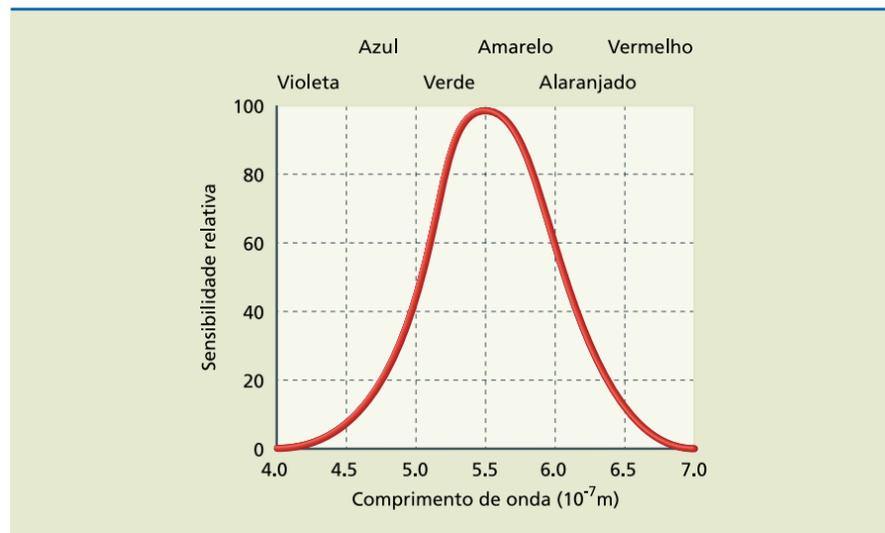
Luz visível

Luz é toda onda eletromagnética que sensibiliza a retina do ser humano (pode ser enxergada). Esse tipo de onda possui pequena faixa de comprimento, entre $6,9 \cdot 10^{-7}$ e $4,3 \cdot 10^{-7}$ m. A luz visível com o maior comprimento de onda é o vermelho e, conforme o comprimento aumenta, a cor da luz se altera na sequência: alaranjado, amarelo, verde, azul e violeta (figura 1.139).



Figura 1.139

Espectro eletromagnético da luz visível.



Radiação ultravioleta

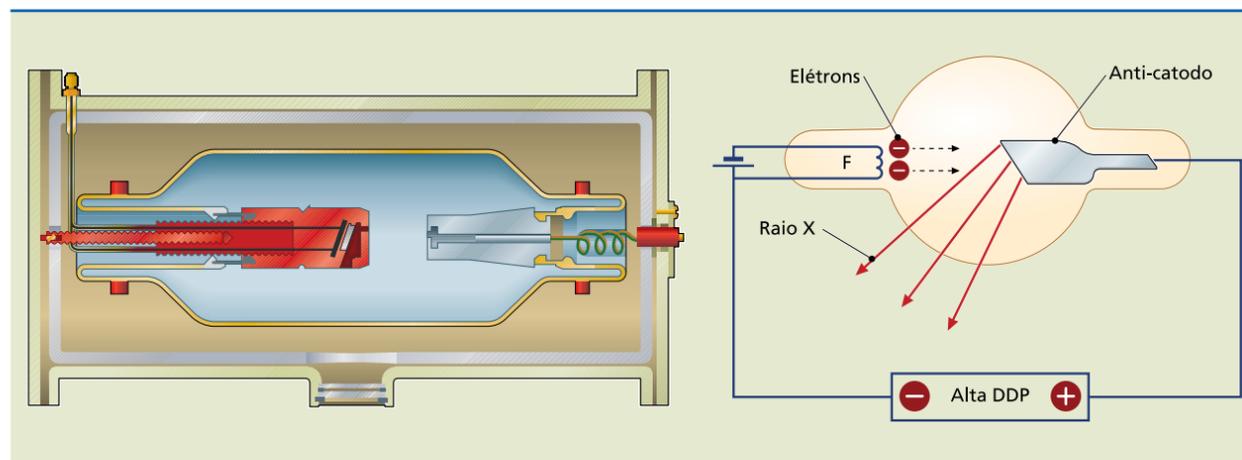
São ondas cujo comprimento é menor que o da luz violeta visível. O Sol e lâmpadas de vapor de mercúrio (lâmpadas de poste) emitem essa radiação, que é absorvida pela Terra para a produção da camada de ozônio.

Raios X

Em 1895, o alemão Wilhelm Conrad Röntgen descobriu uma radiação proveniente do choque de um feixe de elétrons em movimento rápido em um anteparo metálico. Como ele desconhecia a natureza desses raios, batizou-os de raios X (figura 1.140).

Figura 1.140

Raios X.



Essa onda eletromagnética, cuja frequência está entre 10^{17} e 10^{21} Hz, atravessa matéria sólida, líquida ou gasosa, ionizando seus átomos. Além disso, a penetração dos raios X depende da densidade do material. Materiais de alta densidade, como os ossos, absorvem essa radiação, porém ela atravessa músculos e pele.

Dessa maneira, utilizando esse tipo de raio, foi possível construir as máquinas de radiografia (figura 1.141).

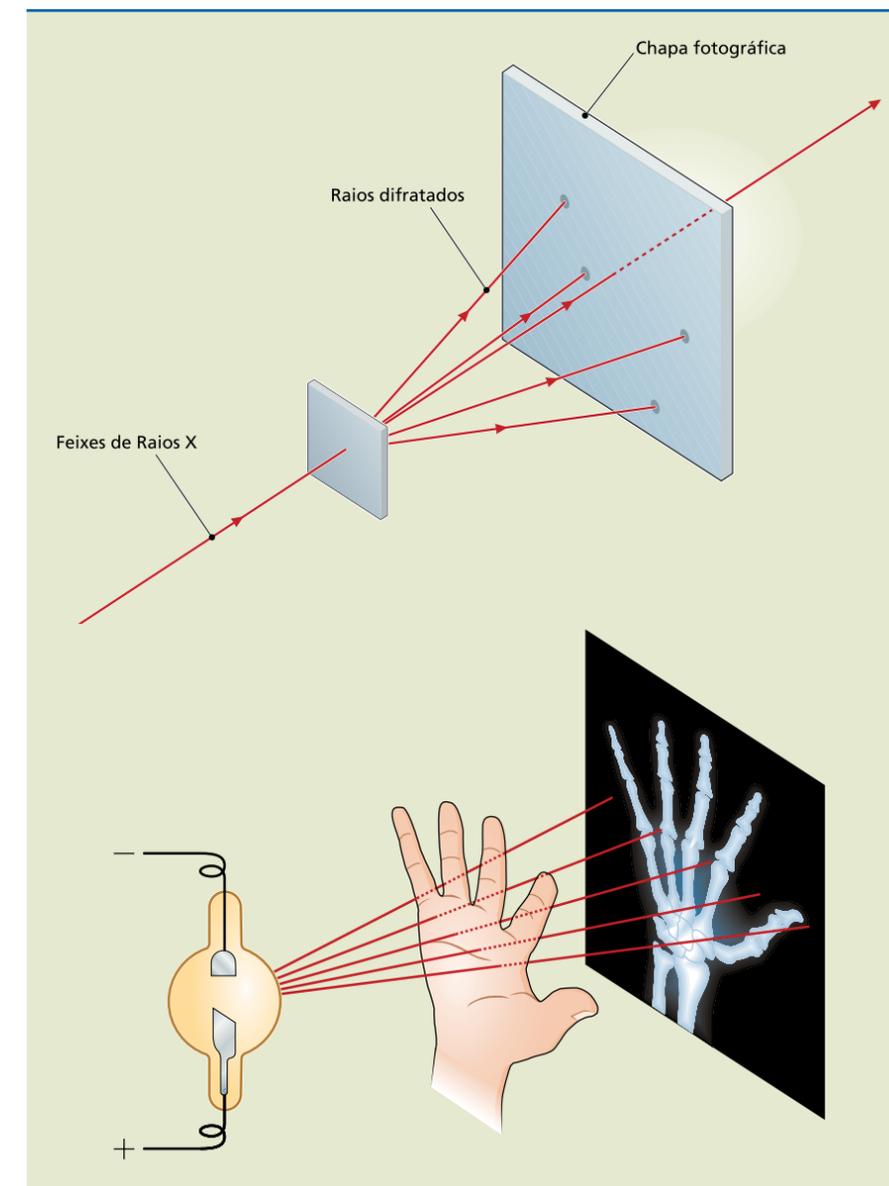
**Figura 1.141**

Imagem produzida por raios X.

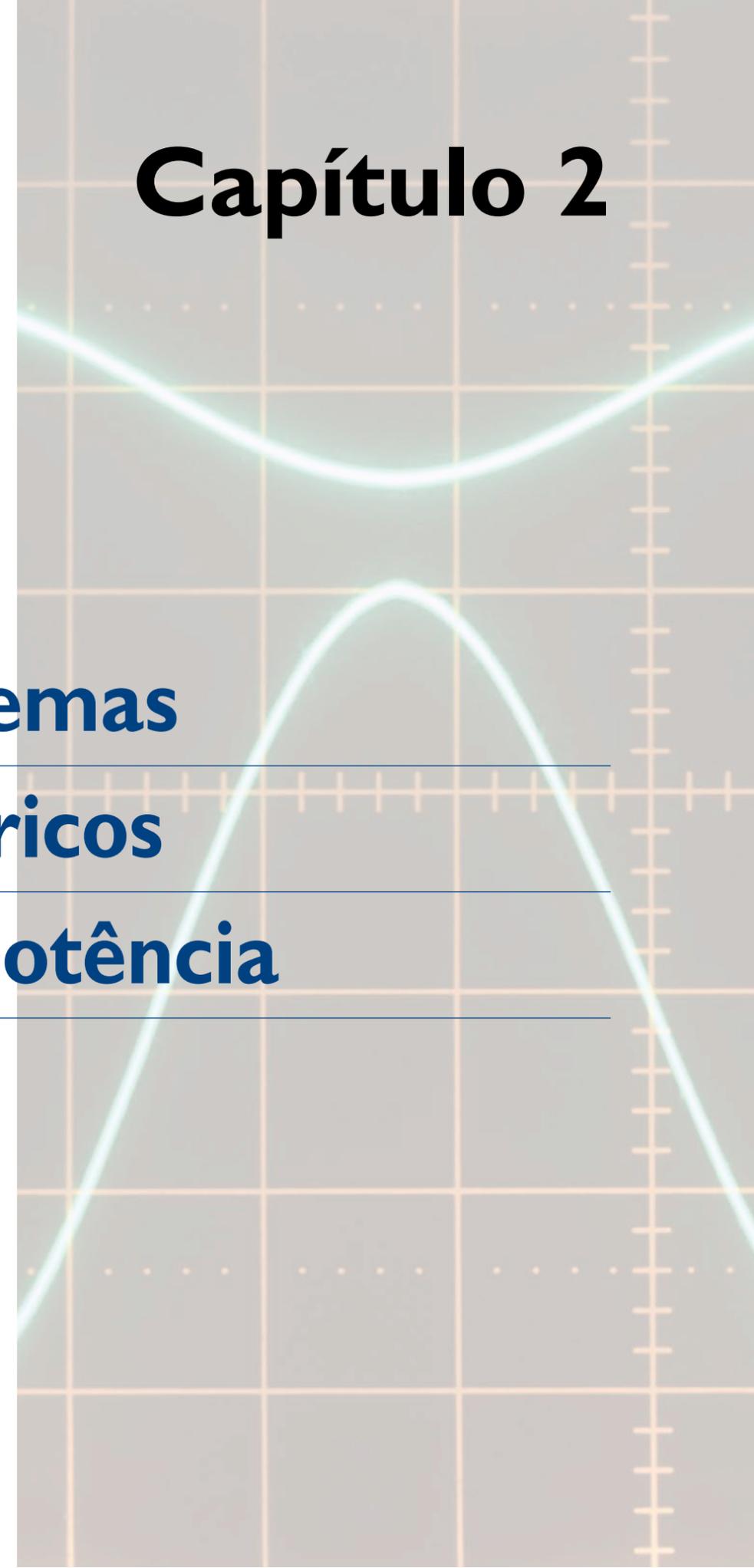
Raios gama

Finalmente, no espectro eletromagnético, os raios gama são as ondas conhecidas de maior frequência. Essas ondas são emitidas pelos núcleos atômicos de elementos radioativos quando se desintegram, como em uma explosão nuclear. Assim como os raios X, são altamente prejudiciais à vida.



Capítulo 2

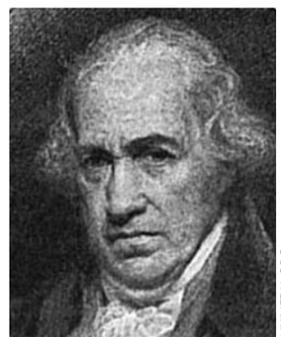
Sistemas elétricos de potência



O desenvolvimento dos sistemas elétricos de potência (SEPs) iniciou-se com Thomas Alva Edison em 1882, ao idealizar e projetar o circuito de iluminação pública em corrente contínua para a cidade de Nova York, Estados Unidos. Além dele, outros personagens históricos possibilitaram, por meio de seus estudos e experimentos, avanços fundamentais nas diferentes etapas de geração, transmissão, distribuição e consumo de energia elétrica.

Figura 2.1

James Watt (1736-1819).



James Watt inventou a máquina a vapor. Comparando a potência dessa máquina com a dos cavalos utilizados para retirar água das minas de carvão, constatou que um bom cavalo podia elevar um peso de 75 quilogramas-força a 1 metro de altura em 1 segundo. Assim surgiu a expressão *horsepower* (hp), que é uma antiga unidade de medida inglesa de potência. No Sistema Internacional, a unidade de medida de potência elétrica é o watt (W), em sua homenagem. Saiba que $1 \text{ hp} = 745,69 \text{ W}$.

Figura 2.2

Alessandro Volta (1745-1827).



Alessandro Volta desenvolveu a pilha constituída de discos alternados de zinco e cobre, com pedaços de papelão embebido em salmoura entre os metais, produzindo corrente elétrica. A pilha voltaica trouxe contribuições importantes para a eletroquímica, o eletromagnetismo e outras aplicações da eletricidade. Em sua homenagem foi criada a unidade de medida de força eletromotriz volt (V).



Figura 2.3

André-Marie Ampère (1775-1836).

André-Marie Ampère descobriu a atração e a repulsão existente entre dois fios paralelos percorridos por uma corrente elétrica, sugerindo propriedades magnéticas da corrente elétrica. Suas fundamentações teóricas, publicadas na época, foram utilizadas como base para a eletricidade e o magnetismo, dando sustentação aos princípios do eletromagnetismo. Em sua homenagem foi criada a unidade de medida de corrente elétrica ampere (A).

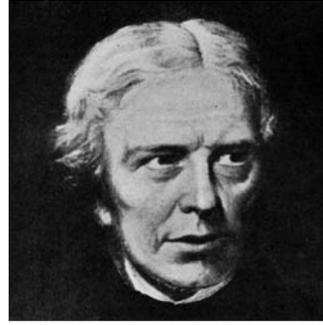
Figura 2.4

Georg Simon Ohm (1789-1854).



Ohm estudou os fundamentos das correntes elétricas em movimento e a resistência elétrica dos condutores. Apresentou em 1827 a lei sobre a resistência elétrica dos condutores, mais tarde denominada lei de Ohm. Em sua homenagem foi criada a unidade de medida de resistência elétrica ohm (Ω).



Figura 2.5Michael Faraday
(1791-1867).

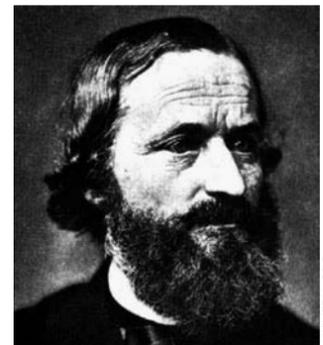
Faraday estudou os efeitos da indução eletromagnética e comprovou ser possível obter corrente elétrica por meio dos efeitos magnéticos. Analisando os resultados de muitos experimentos, elaborou a lei da indução eletromagnética, por isso conhecida como lei de Faraday. Em sua homenagem foi criada a unidade de medida de capacitância elétrica farad (F).

Figura 2.6

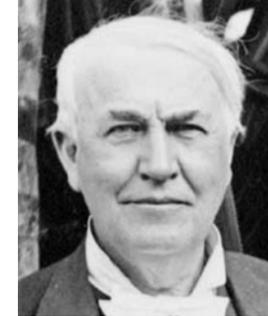
Joseph Henry (1797-1878).



Joseph Henry desenvolveu pesquisas na área do eletromagnetismo e elaborou estudos sobre a autoindução eletromagnética, a qual posteriormente serviu de base para a criação de transformadores. Também colaborou na invenção do telégrafo, do motor elétrico e do telefone. Em sua homenagem foi criada a unidade de medida de indutância henry (H).

Figura 2.7Gustav Robert Kirchhoff
(1824-1887).

Ao estudar os fundamentos da corrente elétrica, tensão e resistência nos condutores, elaborou, em 1847, as leis das malhas e dos nós, que permitem calcular o valor da corrente em circuitos elétricos, conhecidas como leis de Kirchhoff para correntes e tensões.

Figura 2.8Thomas Alva Edison
(1847-1931).

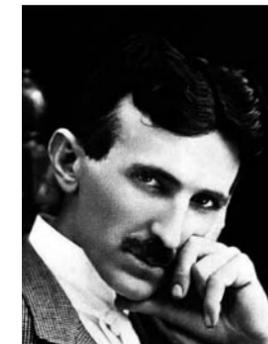
Thomas Edison inventou a lâmpada elétrica (incandescente) em 1879. Em 1882, desenvolveu o primeiro sistema de distribuição de energia elétrica do mundo, que foi utilizado para distribuir energia elétrica a uma parte da cidade de Nova York, Estados Unidos.

Figura 2.9William Stanley
(1858-1968).

Em 1886, Stanley construiu e colocou em operação o primeiro sistema em corrente alternada: o transformador e outros equipamentos elétricos auxiliares de transformação de corrente alternada.

Figura 2.10

Nikola Tesla (1856-1943).



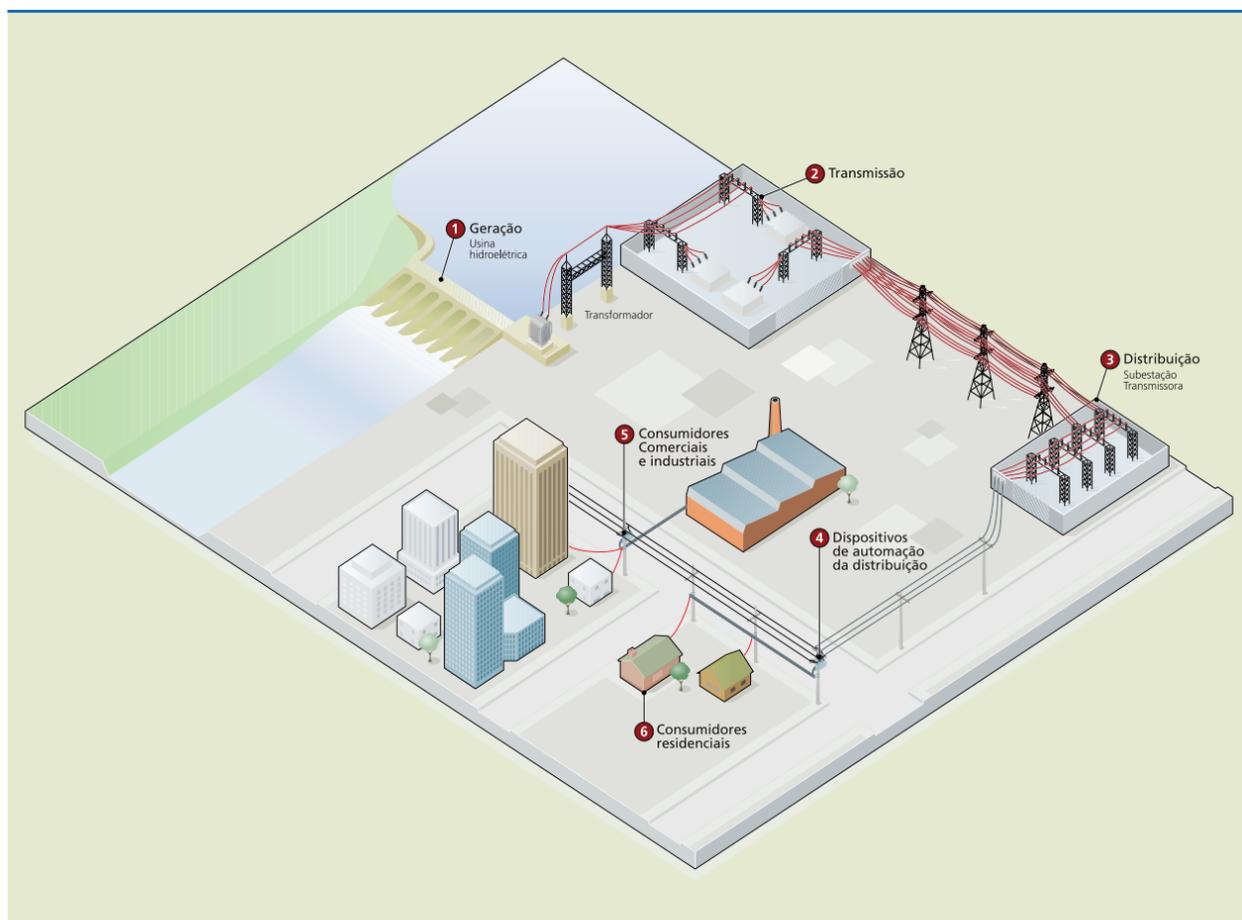
Tesla foi o inventor do campo magnético rotativo e do sistema completo de produção e distribuição de energia elétrica (motores, geradores), baseado no uso de corrente alternada. Em sua homenagem foi criada a unidade de medida de densidade de fluxo magnético tesla (T).

2.1 Segmentos do sistema elétrico de potência

Os SEPs podem ser divididos em quatro etapas distintas: geração, transmissão, distribuição e consumo ou utilização. Neste capítulo estudaremos os sistemas elétricos de potência utilizados na geração, transmissão e distribuição de energia (figura 2.11):

Figura 2.11

Segmentos de um sistema elétrico de potência.



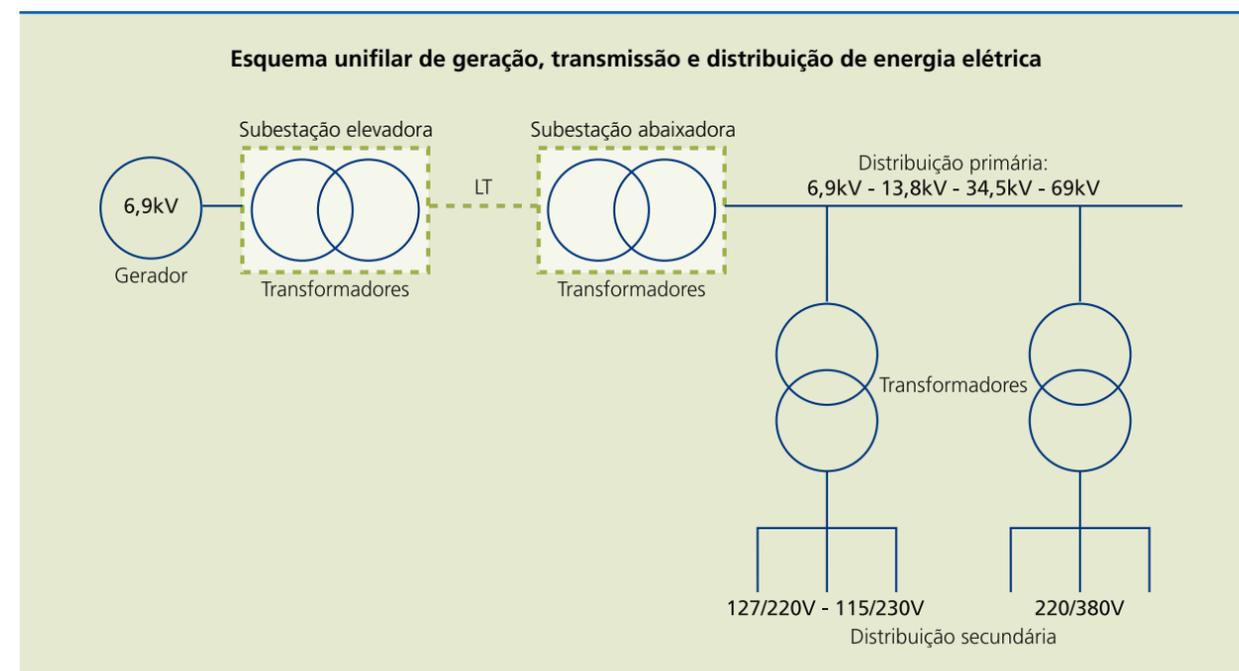
No Brasil, a maior parte das usinas geradoras de energia elétrica está distante dos centros consumidores, motivo pelo qual é necessário utilizar linhas de transmissão. A energia gerada nas usinas segue em alta tensão nas linhas de transmissão e, antes de ser distribuída, é rebaixada para os valores usados pelos consumidores residenciais, comerciais e industriais (figura 2.12).

A energia elétrica é produzida por meio da energia mecânica que movimenta os eixos das turbinas dos grandes geradores. A energia mecânica pode ser obtida por energia hidráulica, que aproveita a energia potencial da água armazenada

para movimentar as turbinas, ou por energia térmica, em que a água é aquecida e o vapor, a alta pressão, movimenta as turbinas.

Figura 2.12

Esquema unifilar simplificado de um SEP.



2.1.1 Geração de energia elétrica

No Brasil, aproximadamente 92% da geração de energia elétrica é realizada por usinas hidroelétricas. O território brasileiro tem a maior bacia hidrográfica do mundo, rios com enormes volumes de água e inúmeras quedas-d'água, que podem ser aproveitadas para a construção dessas usinas. Um exemplo de usina hidroelétrica de grande porte é a de Itaipu, situada na divisa do Paraná com o Paraguai.

Na usina hidroelétrica, a água fica armazenada em reservatório, lago ou represa, formados por paredes espessas chamadas barragens. A água armazenada segue por condutos forçados que desembocam nas hélices das turbinas. O diâmetro e o comprimento do conduto forçado variam de acordo com a potência da turbina que está acoplada ao gerador (figura 2.13). Por causa do desnível entre a barragem e as hélices dos geradores, a água deslocada através do conduto forçado adquire energia cinética suficiente para girar as hélices do gerador, que a converte em energia elétrica pelo princípio da indução eletromagnética.

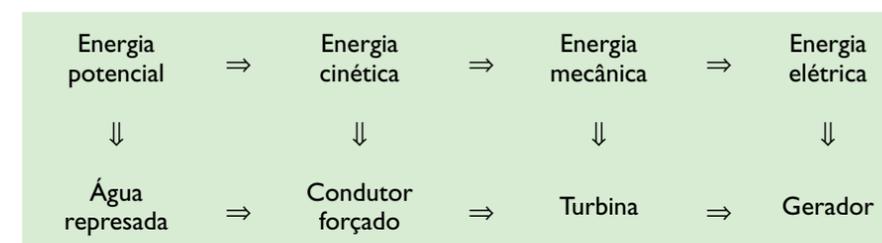
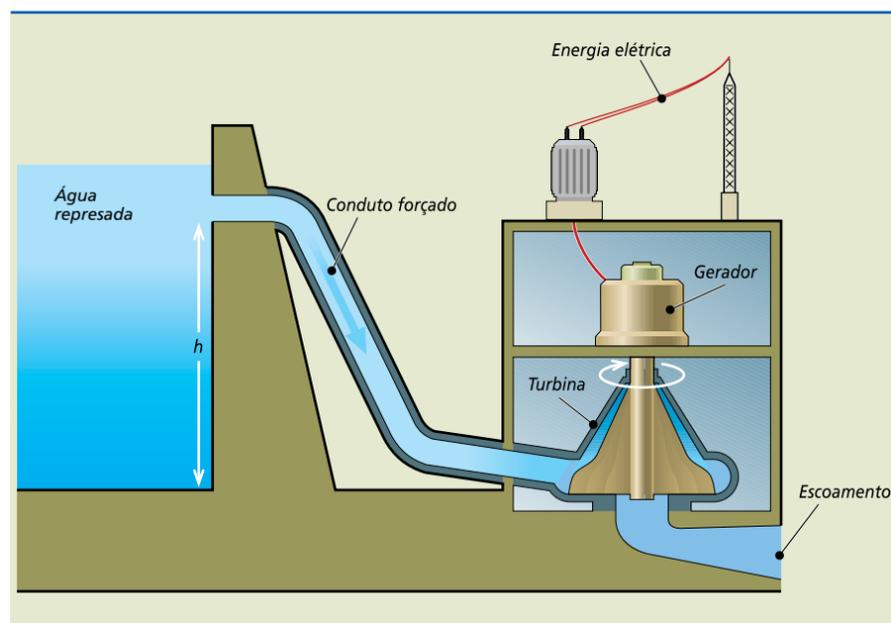


Figura 2.13

Conversão hidroelétrica.



2.1.2 Subestações

As subestações são um conjunto de equipamentos formados por transformadores, reatores, bancos capacitores, disjuntores, chaves seccionadoras, para-raios e os transformadores de potencial e de corrente além das estruturas e dos barramentos utilizados, destinado a transformar a energia a ser transmitida.

No Brasil, utilizam-se dois tipos de subestação:

- **Subestação elevadora** – Geralmente está localizada perto das unidades geradoras de eletricidade e tem como objetivo elevar o nível da tensão e diminuir a intensidade da corrente. Por exemplo, em uma usina, a tensão é 18 kV, valor que, antes de seguir para a linha de transmissão, é elevado na subestação para 750 kV.
- **Subestação abaixadora** – É responsável por reduzir o nível da tensão e aumentar a intensidade da corrente elétrica. As subestações abaixadoras estão situadas em diferentes pontos estratégicos durante a transmissão da usina até o consumidor final. É nesse tipo de subestação que, por exemplo, a tensão de 750 kV diminui a níveis em torno de 13,8 kV.

Na saída dos geradores trifásicos de corrente alternada das usinas, a tensão é de aproximadamente 18 kV, com valores elevados de corrente (em quiloampere – kA) e potência (em megawatt – MW). No entanto, antes da transmissão, por questões econômicas, o valor da tensão é elevado e, conseqüentemente, a intensidade da corrente diminui. Com essa variação de tensão e corrente, os cabos utilizados na transmissão podem ter seu diâmetro reduzido. Essa transmissão exige o emprego de subestações que elevem a tensão e subestações que a abaixem até que possa ser novamente reduzida por transformadores de ruas para valores utilizados em cada um dos setores da sociedade. Nas subestações há mais de um transformador, além de outros equipamentos de controle, proteção e regulação.

No caso das subestações abaixadoras, a energia elétrica proveniente da ligação em estrela do transformador, denominado sistema trifásico, apresenta tensão nominal de 13,8 kV.

2.1.3 Rede de transmissão de energia elétrica

A transmissão de energia elétrica é feita por condutores (cabos) elétricos. Os condutores possuem diferentes diâmetros e, quanto maior a área de sua seção transversal (bitola), menor é a resistência à passagem da corrente elétrica. Para escolher o diâmetro dos condutores, é preciso conhecer a intensidade da corrente à qual ele será submetido. Uma das maneiras de calcular a corrente elétrica em um condutor é utilizando a relação direta $P = V \cdot I$. Nessa relação, para determinado valor de potência, quanto maior a tensão, menor a corrente elétrica, o que permite utilizar condutores de menor diâmetro e, conseqüentemente, de menor peso. Em tais condições, as torres de transmissão (figura 2.14) podem ser fabricadas com menor investimento financeiro. Além disso, para que o sistema de transmissão seja economicamente viável, a subestação elevadora deve ser construída o mais próximo possível da unidade geradora.

**Figura 2.14**

Modelo da estrutura da linha de transmissão. A linha de transmissão é composta de torres de transmissão e cabos elétricos.

Apenas como curiosidade, entre as torres de transmissão existem esferas alaranjadas penduradas nos cabos. Essas esferas são sinalizadores diurnos para orientar aviões e helicópteros da existência de linhas de alta tensão (figura 2.15).

**Figura 2.15**

Sinalizador de linha de transmissão.

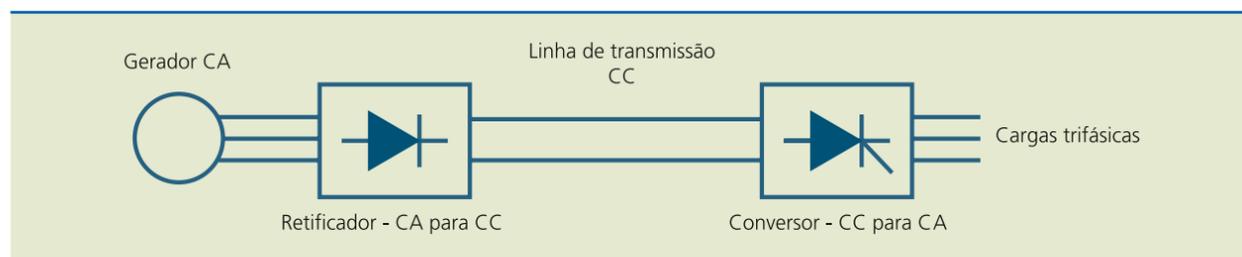


As tensões típicas em corrente alternada, nas linhas de transmissão, são de 69 kV a 750 kV. As tensões de 69 kV a 500 kV são normalmente transmitidas em corrente alternada. Para valores superiores a 500 kV, é preciso realizar um estudo para saber se é economicamente viável transmitir em tensão alternada ou contínua. Por exemplo, na hidroelétrica de Itaipu, a linha de 750 kV é em tensão alternada e a de 600 kV, contínua.

Quando a transmissão é feita em corrente contínua, uma subestação retificadora transforma a tensão alternada em contínua. Essa tensão se estabelece em todos os pontos da linha de transmissão até chegar aos centros de consumo, onde uma estação inversora a converte em tensão alternada, antes de distribuir aos consumidores (figura 2.16). Um importante aspecto da transmissão em tensão contínua é a diminuição das perdas na linha de transmissão.

Figura 2.16

Conversão de CC para CA.



2.1.4 Rede de distribuição de energia elétrica

A etapa de distribuição de energia elétrica inicia-se na subestação de rebaixamento de tensão. Primeiro, a tensão da linha de transmissão é reduzida a valores-padrão das redes de distribuição primária. A seguir, as tensões são distribuídas aos transformadores trifásicos, que podem atender consumidores monofásicos, bifásicos ou trifásicos (figura 2.17).

Figura 2.17

Detalhe da distribuição elétrica. A tensão na rede de distribuição primária é 13,8 kV e, ao passar pelo transformador, reduz para 127 V e 220 V.

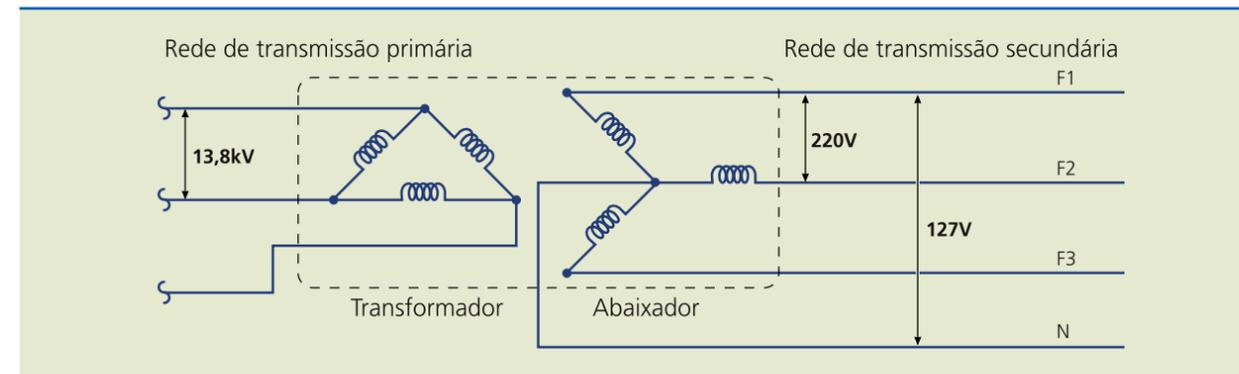
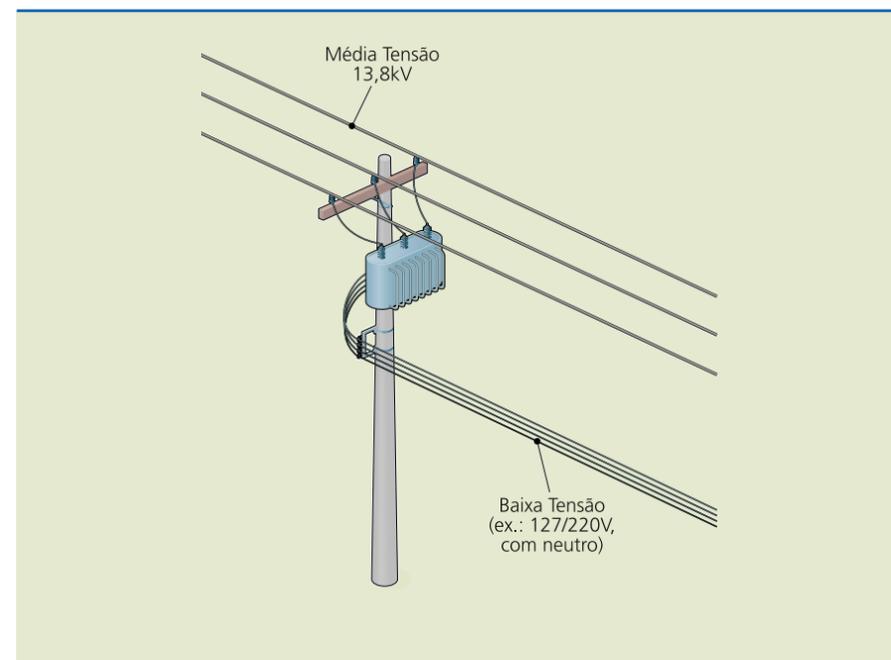


Figura 2.18

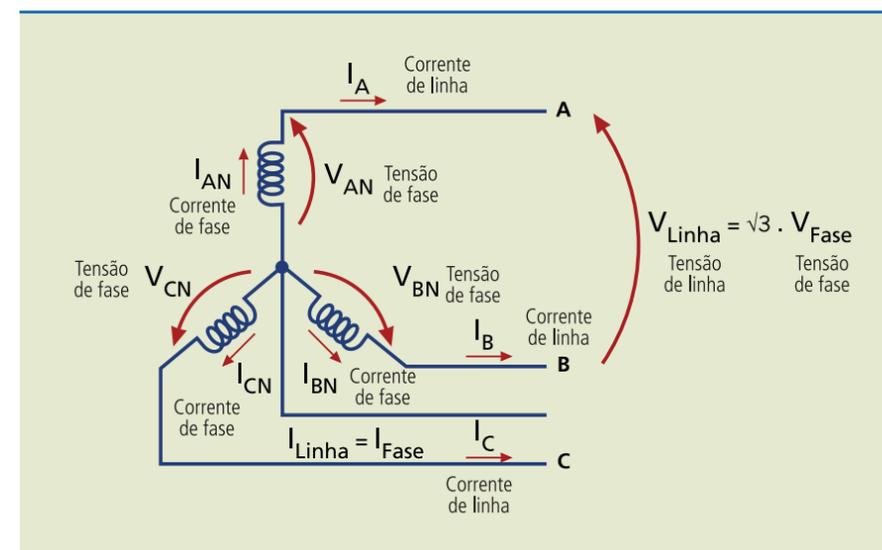
Exemplo de processo de redução de tensão no sistema elétrico utilizando transformador abaixador trifásico.

Todo o processo de elevação ou redução de tensão no sistema elétrico é feito por transformadores trifásicos, cujo exemplo de configuração de primário e secundário é apresentado na figura 2.18.

As figuras 2.19 e 2.20 apresentam as configurações dos enrolamentos do secundário dos transformadores de distribuição com suas respectivas relações de tensão e corrente.

Figura 2.19

Relações de tensão e corrente: (a) configuração em estrela (y) com neutro no secundário do transformador e (b) tabela de valores de tensão de fase e tensão de linha no fornecimento de energia elétrica.

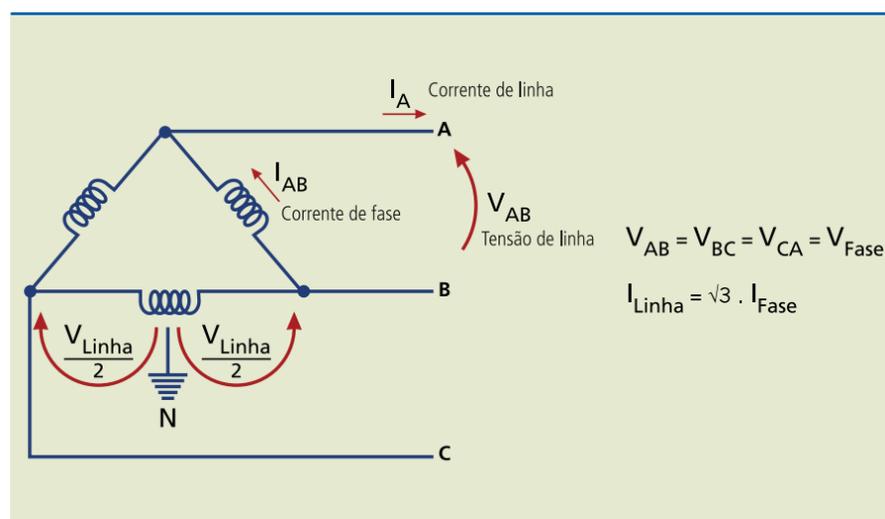


Tensão de fase (V)	Tensão de linha (V)
120	208
127	220
220	380
2 200	3 800
3 800	6 600
7 970	13 200



Tensão de fase (V)	Tensão de linha (V)
13 200	23 000
19 900	34 500
50 800	88 000
79 600	138 000

Figura 2.20
Relações de tensão e corrente: (a) configuração em triângulo (Δ) com neutro no secundário do transformador e (b) tabela de valores de tensão de fase de linha no fornecimento de energia elétrica.



Tensão V_{Linha} neutro (V)	Tensão de linha (V)
110	220
115	230

2.1.5 Classificação das tensões elétricas

De acordo com as normas técnicas definidas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), as tensões elétricas em corrente alternada são assim classificadas:

- Baixa tensão: até 1 000 V em corrente alternada e frequência máxima de 400 Hz e até 1 500 V em corrente contínua (norma NBR 5410:2004).
- Média tensão: acima de 1 000 V a 36 200 V (norma NBR 14039:2005).
- Alta tensão: acima de 36 200 V até 242 000 V.
- Extra-alta tensão: acima de 242 000 V.

2.1.6 Distribuição de energia elétrica em baixa tensão

A norma NBR- 5410/2004, da ABNT, considera que as instalações elétricas de baixa tensão devem estar sob tensão nominal igual ou inferior a 1 000 V (corrente alternada / frequência máxima: 400 Hz) ou a 1 500 V (corrente contínua).

2.2 Eletricidade

Para entender como se estabelece a corrente elétrica em um circuito e outros fenômenos elétricos, é preciso saber conceitos básicos da estrutura da matéria. Toda matéria é formada por moléculas, que, por sua vez, são constituídas por átomos. O átomo apresenta uma região central, o núcleo atômico, composto por dois tipos de partículas: os prótons, partículas carregadas positivamente, e os nêutrons, que têm a mesma massa dos prótons, porém são eletricamente neutros. Ao redor do núcleo estão os elétrons, partículas que apresentam carga de mesmo valor que a dos prótons, mas negativo. A figura 2.11 ilustra esse modelo atômico.

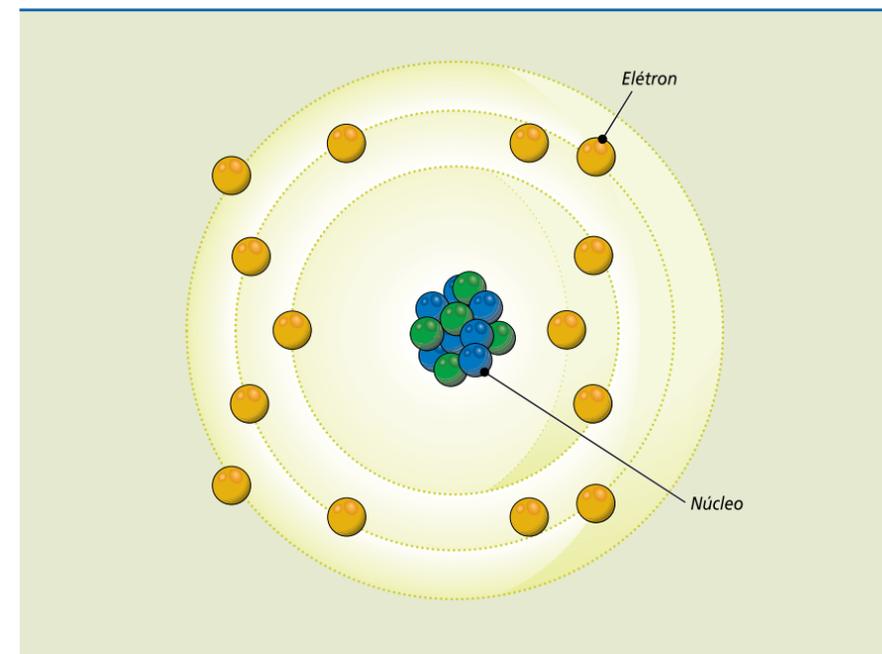


Figura 2.21
Átomo.

2.2.1 Carga elétrica

O átomo é um sistema eletricamente neutro, porque o número de prótons é igual ao de elétrons. No entanto, ele passa a ficar eletrizado quando perde ou ganha elétrons. Os prótons e os elétrons apresentam uma importante propriedade física, denominada carga elétrica, que determina algumas das interações eletromagnéticas. A energia elétrica está diretamente relacionada com a carga elétrica e na maioria das vezes as partículas móveis portadoras de carga elétrica são os elétrons livres, presentes nos metais.

A quantidade de carga do elétron, que em valor absoluto é igual à do próton, é chamada carga elementar (e), por ser a menor quantidade de carga encontrada na natureza. Seu valor é:

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \quad (2.1)$$

A unidade de medida utilizada para carga elétrica no SI (Sistema Internacional) é o coulomb (C), em homenagem ao físico francês Charles Augustin de Coulomb.



Os corpos podem se eletrizar por diferentes processos e, assim, ficar com excesso ou falta de elétrons. Para determinar a quantidade de carga elétrica de um corpo, pode-se utilizar a expressão:

$$Q = n \cdot e \quad (2.2)$$

em que:

- Q é a quantidade de carga elétrica do corpo;
- n , o número de elétrons em falta ou em excesso;
- e , a carga elementar ($1,6 \cdot 10^{-19}$ C).

2.2.2 Grandezas elétricas fundamentais

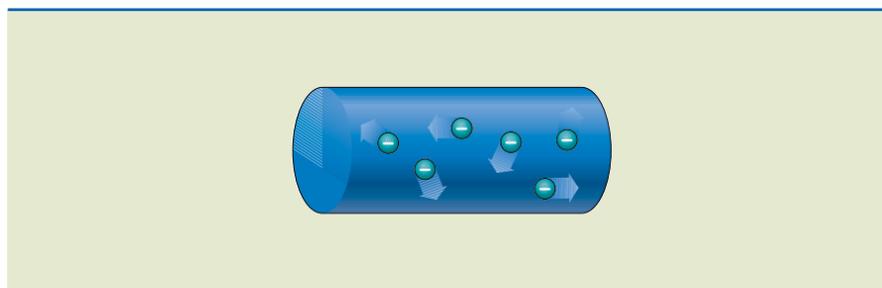
Corrente elétrica

Uma das grandezas elétricas fundamentais é a corrente elétrica. Para que ela se estabeleça, é necessário que os elétrons livres se movimentem de maneira ordenada em um condutor metálico.

Em alguns materiais, não é possível observar o estabelecimento de corrente elétrica, pois não apresentam elétrons livres em sua rede cristalina; esses materiais são conhecidos como isolantes. Já os metais possuem uma rede cristalina que permite que seus elétrons fiquem livres, por isso são chamados de condutores (figura 2.22).

Figura 2.22

Movimento desordenado de elétrons dentro de um condutor:



Não basta, porém, o movimento dos elétrons livres; isso pode ocorrer com o aumento da temperatura. Para que haja corrente elétrica, os elétrons devem movimentar-se em ordem, todos no mesmo sentido, e isso só acontece se eles estiverem sob a ação de um campo elétrico.

A fonte de energia elétrica (força eletromotriz) é a responsável por criar o campo elétrico que exerce em cada elétron livre uma força capaz de orientá-lo no sentido ordenado. Por exemplo, quando um condutor é conectado entre os polos (negativo e positivo) da fonte, os elétrons presentes no polo negativo movem-se para completar a falta de elétrons no polo positivo. Dessa maneira, corrente elétrica é o movimento ordenado de portadores de carga elétrica quando se aplica uma diferença de potencial nas extremidades de um material condutor (figura 2.23). A unidade de medida da corrente elétrica é o ampere (A).

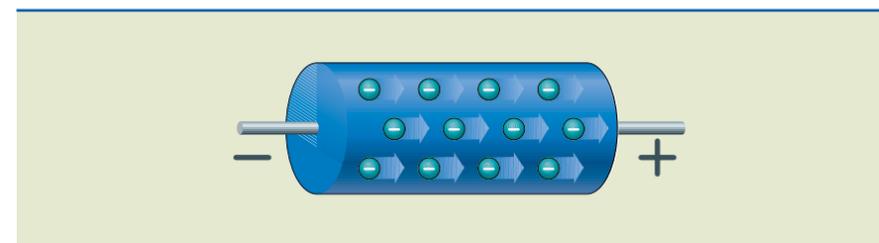


Figura 2.23

Movimento ordenado de elétrons dentro do condutor, quando o condutor está sob a influência de uma fonte de energia elétrica.

Tensão elétrica

Para que os elétrons livres existentes no interior do condutor elétrico movimentem-se de maneira ordenada, é preciso aplicar uma diferença de potencial elétrico em seus terminais, que recebe o nome de tensão elétrica (figura 2.24), cuja unidade de medida é o volt (V).

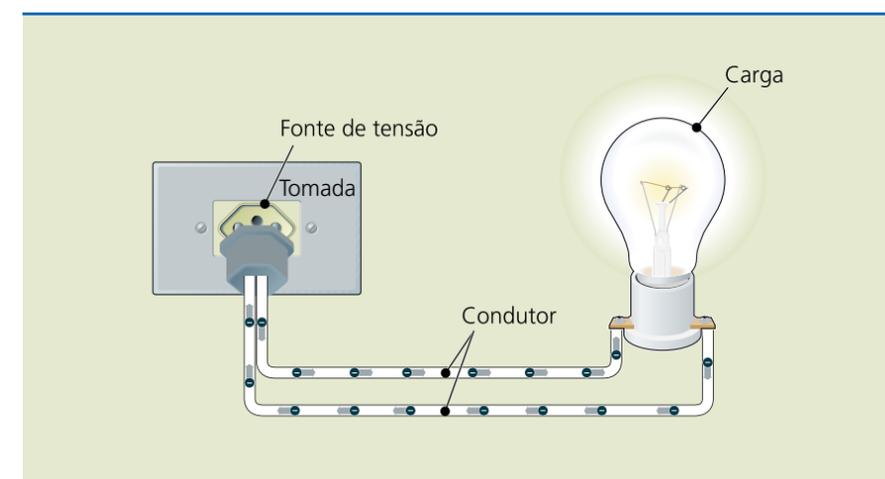


Figura 2.24

Circuito fechado ou percurso fechado. Nesse caso, a fonte de tensão é a tomada.

Resistência elétrica

Entende-se por resistência elétrica a oposição oferecida pelo material à circulação dos elétrons. Sua unidade de medida é o ohm (Ω).

Potência elétrica

Define-se potência elétrica como o resultado do produto da ação da tensão elétrica aplicada ao circuito pela intensidade da corrente elétrica que por ele circula. A potência é um parâmetro que determina a rapidez com que a energia é consumida.

O que acontece com a potência elétrica quando o circuito é submetido ao fornecimento de tensão em regime de corrente contínua? E no caso de corrente alternada?

Convém fazermos antes uma análise. Vamos examinar a lei básica da eletricidade para então explicar os dois regimes de fornecimento de tensão no circuito, regime CC e AC.



2.2.3 Lei básica da eletricidade. Lei de Ohm

A lei de Ohm estabelece uma relação entre as grandezas elétricas, que pode ser determinada por:

$$V = R \cdot I \quad (2.3)$$

em que:

- V é a tensão, em volt (V);
- R , a resistência, em ohm (Ω);
- I , a corrente elétrica, em ampere (A).

O valor da resistência R não depende da tensão elétrica aplicada nem da corrente que circula no resistor, e sim:

- do material com que o resistor foi fabricado, pois a resistência específica (resistividade elétrica – ρ) varia de material para material; a unidade de medida pelo SI é o $\Omega \cdot m$ ou

$$\frac{\Omega \cdot mm^2}{m};$$

- da área A da seção transversal do condutor: quanto maior a área, menor a resistência oferecida; a unidade de medida é o milímetro quadrado (mm^2);
- do comprimento L : quanto maior, maior a resistência. A unidade de medida é o metro (m).
- A resistência elétrica também depende da temperatura.

Com base nesses parâmetros, é possível calcular o valor da resistência pela equação:

$$R = \frac{\rho \cdot L}{A} \quad (2.4)$$

Variação da resistência com a influência da temperatura

Um material condutor a determinada temperatura apresenta certo valor de resistência elétrica. Com a variação da temperatura, esse valor sofre alteração, fato que é parametrizado pelo coeficiente de temperatura α do material. Para determinar o valor da resistência elétrica a determinada temperatura, utiliza-se a equação:

$$R_T = R_0 [1 + \alpha(t_2 - t_1)] \quad (2.5)$$

em que:

- R_T é a resistência final à temperatura final t_2 (Ω);
- R_0 , a resistência inicial à temperatura inicial t_1 (Ω);
- α é o coeficiente de temperatura do material ($^{\circ}C^{-1}$);
- t_2 e t_1 são, respectivamente, as temperaturas final e inicial ($^{\circ}C$).

2.2.4 Regimes de fornecimento de tensão

Regime DC ou CC

No regime DC ou CC (*direct current* ou corrente contínua), o valor da tensão fornecida pela fonte não varia ao longo do tempo (figura 2.25).

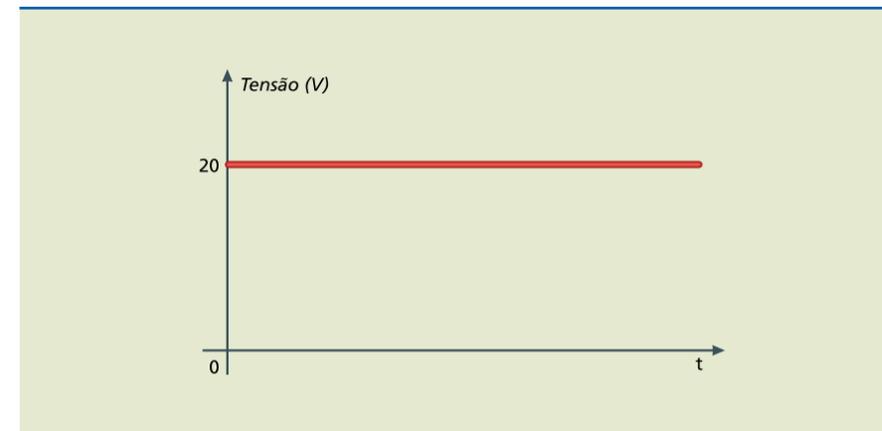


Figura 2.25
Gráfico da tensão em regime DC.

São exemplos de fontes geradoras de corrente contínua: pilhas, baterias e fontes de alimentação fabricadas com componentes eletroeletrônicos. Em um circuito submetido a um regime de fornecimento de tensão DC, a potência elétrica, medida em watt (W), é dada por:

$$P = V \cdot I \quad (2.6)$$

Pode-se também definir essa potência como potência útil. No regime DC, a corrente elétrica é orientada em um único sentido.

Regime AC ou CA

No regime AC ou CA (*alternating current* ou corrente alternada), a tensão altera a polaridade em períodos definidos, de modo que a corrente circule ora em um sentido, ora em outro, de acordo com a polaridade da tensão fornecida pela fonte. Geralmente, a tensão alternada é de natureza senoidal, cujo gráfico é exibido na figura 2.26. Essa tensão obedece à função matemática:

$$v(t) = V_{m\acute{a}x} \cdot \text{sen}\omega t$$

ou

$$v(t) = V_{m\acute{a}x} \cdot \text{sen}(2\pi ft) \quad (2.7)$$

em que:

- $v(t)$ é a tensão instantânea;
- ω , a velocidade angular, medida em radiano/segundo.
- f , a frequência da rede elétrica em hertz (Hz).
- t , o tempo



Para determinar a velocidade angular, é necessário, portanto, conhecer o produto $2\pi f$. Como na rede elétrica brasileira a frequência é 60 Hz, pode-se determinar a tensão elétrica por:

$$v(t) = V_{\text{máx}} \cdot \text{sen}(2 \cdot \pi \cdot 60) \cdot t$$

Logo:

$$v(t) = V_{\text{máx}} \cdot \text{sen}(377) \cdot t$$

Figura 2.26
Gráfico da tensão em regime AC no domínio angular. Um ciclo angular tem 2π rad (ou 360°), com valores máximos e mínimos a cada $\theta = (2n+1) \pi/2$ (ou seja, a cada múltiplo ímpar $\pi/2$).

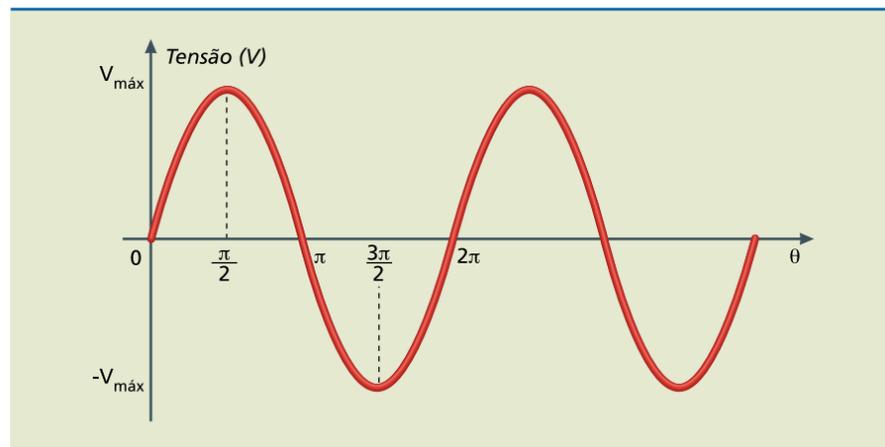
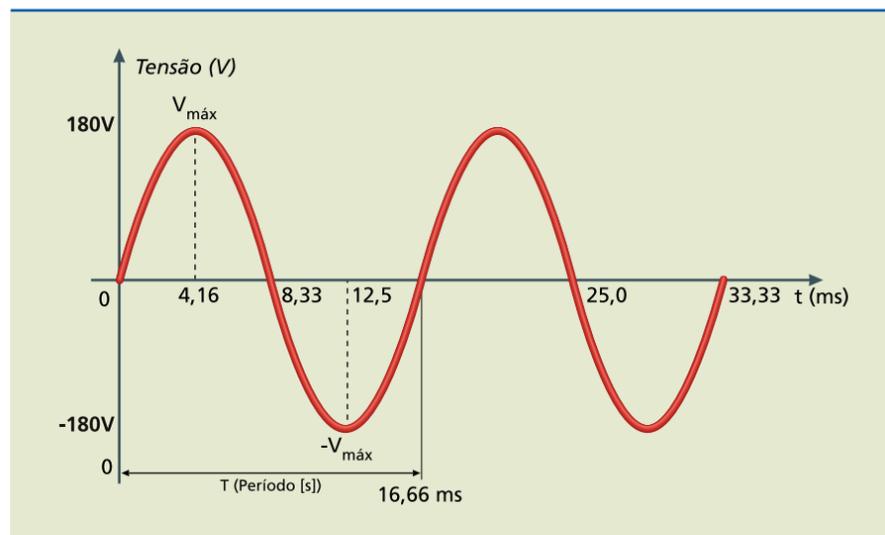


Figura 2.27
Gráfico da tensão em regime AC no domínio do tempo, representando uma forma de onda senoidal de uma rede elétrica.



Na figura 2.27, a tensão elétrica apresenta um ciclo que se inicia no zero, atinge o máximo valor de amplitude em 180 V, volta a decrescer, passa pelo zero e continua decrescendo até atingir o máximo valor negativo, invertendo novamente, ou seja, retornando ao sentido ascendente, passando outra vez pelo zero e finalizando o ciclo. Observe que o ciclo é composto por dois semiciclos, o positivo e o negativo. A partir desse ponto, dá-se início a um novo ciclo, repetindo a mesma sucessão indefinidamente.

Como a corrente elétrica no regime AC muda de sentido a cada semiciclo, conclui-se que seu sentido muda 120 vezes em um segundo.

Observe que na figura 2.27 podemos também tirar algumas características elétricas da forma de onda senoidal, que mostraremos no tópico seguinte.

2.2.5 Características da tensão AC

Período

Consiste no tempo necessário para a realização de um ciclo completo. É representado pelo símbolo T e sua unidade de medida é o segundo (S).

Frequência

É o número de ciclos que ocorre dentro do período. A relação entre o período e a frequência é dada pela equação:

$$f = \frac{1}{T} \quad (2.9)$$

Note que a relação entre frequência e período é inversamente proporcional: quanto maior o período, menor a frequência, e vice-versa.

Valor máximo ou valor de pico

Equivale à máxima amplitude da senoide que representa a tensão. Retomando o gráfico da figura 2.27, observa-se o valor máximo ($V_{\text{máx}}$) ou valor de pico (V_p) quando o sinal senoidal atinge 180 V tanto no semiciclos positivo como no semiciclos negativo.

Valor de pico a pico

Equivale a duas vezes a máxima amplitude da função senoidal que representa a tensão. No exemplo da figura 2.27, esse valor é 360 V.

$$V_{pp} = 2 \cdot V_{\text{máx}} \quad \text{ou} \quad V_{pp} = 2 \cdot V_p \Rightarrow V_{pp} = 2 \cdot 180 = 360 \text{ V}$$

Cabe observar que, nos circuitos de corrente alternada, a responsável pela dissipação da potência elétrica não é a tensão máxima, e sim a tensão eficaz, também conhecida, no caso da forma de onda senoidal, como tensão RMS (*root mean square* – valor médio quadrático), explicada a seguir.

Valor eficaz

Vamos considerar que se aplica em um resistor uma tensão alternada senoidal no valor de $1/\sqrt{2}$ ou 70,71% da amplitude máxima ($V_{\text{máx}}$). Esse valor produzirá no resistor uma dissipação de potência equivalente a um valor de tensão contínua.



Assim, se não houvesse fornecimento de energia elétrica em tensão alternada senoidal, seria possível obter a mesma tensão usando uma fonte de alimentação DC que tivesse na saída uma tensão de $\cong 127$ V. Esse valor pode ser determinado por:

$$V_{\text{RMS}} = \frac{V_{\text{MAX}}}{\sqrt{2}}$$

A expressão é válida apenas para a forma de onda senoidal.

Na forma de onda da figura 2.17, o valor da tensão eficaz será:

$$V_{\text{RMS}} = \frac{180}{\sqrt{2}} \cong 127 \text{ V}$$

Essa é a tensão de nossa rede elétrica.

2.2.6 Potências elétricas no regime AC monofásico

O sistema AC monofásico é um tipo de sistema de fornecimento de energia elétrica composto de uma fase, que é o fio energizado, e um fio de referência, chamado de neutro.

Potências elétricas

Potência aparente (S)

É a potência total fornecida por um gerador. Ela corresponde à soma vetorial da potência ativa (P) com a potência reativa (Q), ou, matematicamente, $S^2 = P^2 + Q^2$. Para determinar o valor da potência, cuja unidade é o volt-ampere (VA), utiliza-se a expressão:

$$S = V \cdot I$$

Potência ativa (P)

É a parte da potência aparente que realiza trabalho, ou seja, a parcela que é transformada em alguma forma de energia útil. Determina-se o valor da potência ativa, cuja unidade é o watt (W), por:

$$P = V \cdot I \cdot \cos\varphi \text{ ou } P = S \cdot \cos\varphi$$

O fator de potência ($\cos\varphi$) é um parâmetro que sinaliza como está o aproveitamento da energia elétrica pelo consumidor. Seu valor pode variar de 0 a 1. Quanto mais próximo de 1, melhor está o aproveitamento. Esse parâmetro depende do tipo de carga que predomina na rede: resistiva ou indutiva. Para carga resistiva, o ângulo φ é igual a 0° ; como $\cos 0^\circ = 1$, a equação da potência ativa passa a ser $P = V \cdot I$.

O significado do ângulo φ é apresentado na análise dos triângulos de potências, feita a seguir.

Potência reativa (Q)

Trata-se da parcela da potência aparente que “não” realiza trabalho. É a responsável por gerar e manter os efeitos do campo eletromagnético (indução) necessários para o funcionamento de reatores, motores elétricos e transformadores, possibilitando o uso da energia que efetivamente realiza trabalho. A potência reativa, cuja unidade é o volt-ampere reativo (VAR), é determinada por:

$$Q = V \cdot I \cdot \sin\varphi \text{ ou } Q = S \cdot \sin\varphi$$

As equações da potência ativa e da potência reativa foram deduzidas com base na análise trigonométrica dos triângulos de potências, ilustrados na figura 2.28.

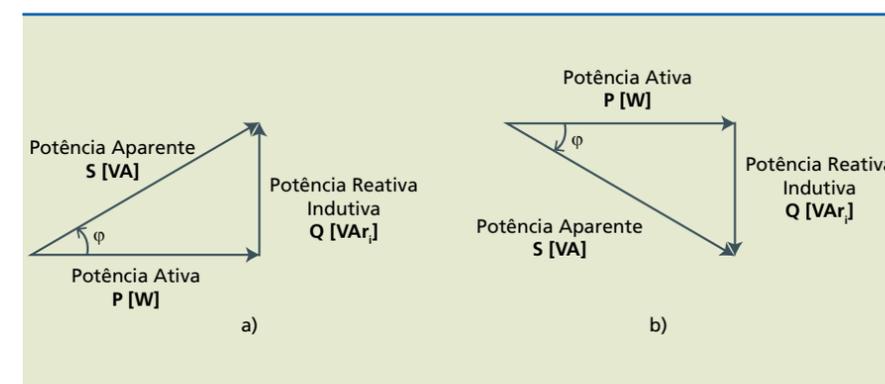


Figura 2.28

Triângulos de potências:
(a) fornecedor de energia reativa e
(b) receptor de energia reativa.

O ângulo φ representa a defasagem entre os valores das potências ativa (que produz trabalho útil) e aparente (total).

Analisando o triângulo de potências da figura 2.18a, pode-se inferir que, se o ângulo φ for igual a 0° , o valor da potência ativa será igual ao da potência aparente, ou seja, toda a energia fornecida (S) será igual à consumida (P), não havendo perdas, o que ocorre normalmente em circuitos elétricos com carga puramente resistiva. Em um circuito elétrico com carga reativa, como um liquidificador cujo motor utiliza enrolamento, será produzida potência reativa, isto é, parte da potência total (corrente elétrica) será consumida na geração e manutenção do campo eletromagnético.

2.2.7 Sistema AC trifásico

O sistema AC trifásico é um sistema de fornecimento de energia elétrica composto de três fases, podendo conter um fio de referência (neutro).

As formas de onda das tensões de um sistema desse tipo são apresentadas na figura 2.29. Note a defasagem de 120° entre o início das formas de onda nas fases A, B e C.



Figura 2.29
Fornecimento de tensão AC trifásico.

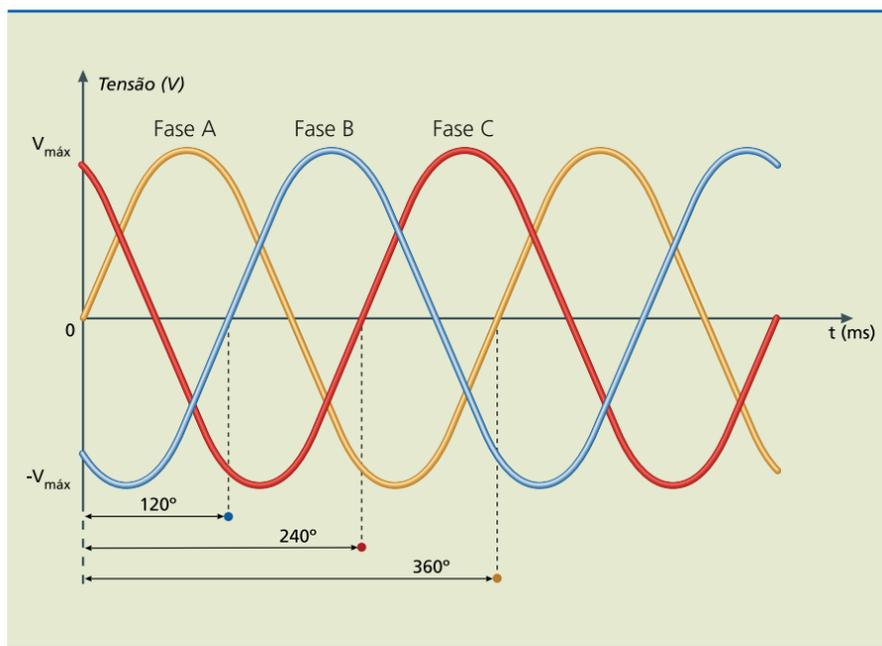
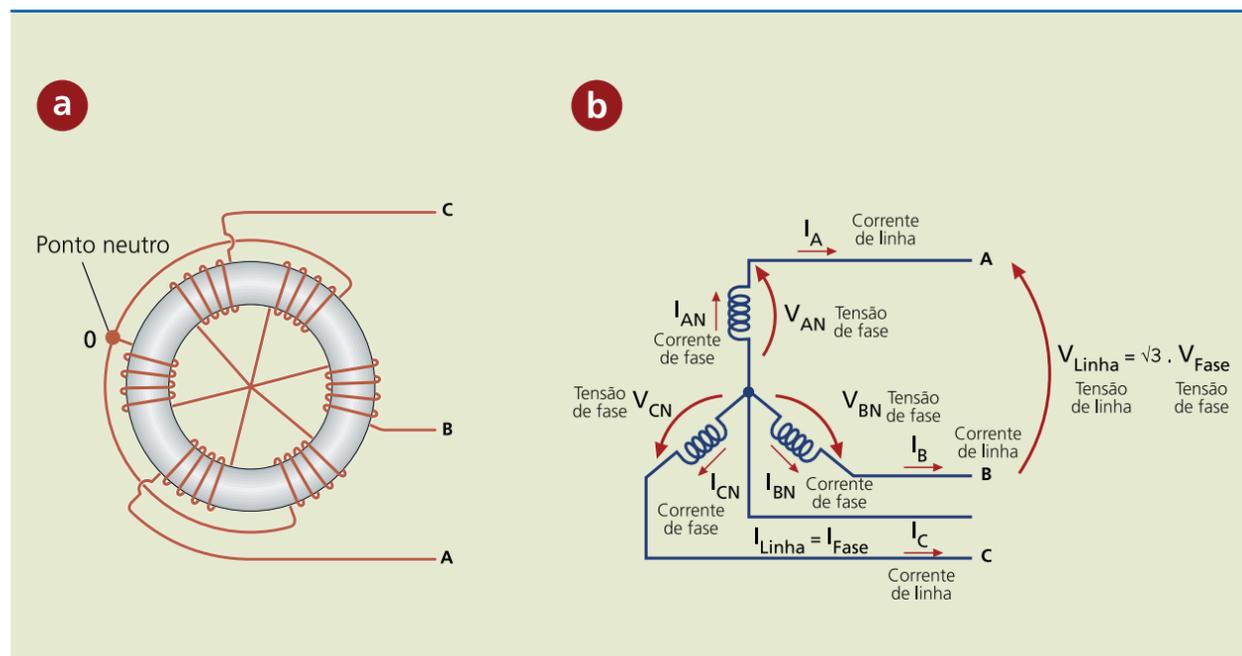


Figura 2.30
Gerador trifásico na configuração estrela:
(a) disposição física das bobinas e
(b) esquema elétrico, com indicação das tensões e correntes de linha e de fase.

A figura 2.30 mostra exemplo de configuração do gerador que fornece tensão alternada trifásica.



Potências elétricas

As definições de potências apresentadas no sistema monofásico são válidas para as potências no sistema trifásico.

Potência aparente (S)

A potência aparente ou potência total, cuja unidade é o volt-ampere (VA), pode ser determinada pela expressão:

$$S = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L \quad (2.10)$$

em que:

- V_L é a tensão de linha;
- I_L a corrente de linha

Potência ativa (P)

A potência ativa ou potência útil, cuja unidade é o watt (W), pode ser determinada pela expressão:

$$P = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos\phi$$

Potência reativa(Q)

A potência reativa, cuja unidade é o volt-ampere reativo (VAR), pode ser determinada pela expressão:

$$Q = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \sin\phi$$

2.3 Introdução ao projeto de instalação elétrica

Um projeto de instalação elétrica é composto por três importantes etapas: planejamento, elaboração e execução. É fundamental que em todas elas o profissional tenha capacidade de criar, elaborar soluções e manter o discernimento e a ética profissional.

2.3.1 Ética profissional

Independentemente da carreira que você vai seguir, é imprescindível que cultive uma atitude ética. No caso do profissional especializado em instalações elétricas, ele deve ter em mente que, em razão de suas atribuições no trabalho a ser realizado, é preciso seguir um conjunto de deveres profissionais relacionados à área de projetos, dentre os quais destacam-se:

- Apresentar sempre a melhor alternativa de solução.
- Propor inovações e apresentar tecnologias modernas.
- Acompanhar e verificar a funcionalidade das soluções.
- Manter sigilo quando necessário.
- Contribuir para o bem-estar ou melhoria da vida humana.
- Alertar sobre os riscos e responsabilidades relativos às prescrições técnicas e às consequências presumíveis de sua inobservância.



2.3.2 Responsabilidade técnica profissional

Para o desempenho profissional de suas atividades, o projetista deve obter qualificação específica por meio de formação em sistemas oficiais de ensino (escolas técnicas com registro no MEC) e registro no respectivo conselho profissional. No caso de cursos técnicos dessa especialidade, o registro é feito no Conselho Regional de Engenharia, Arquitetura e Agronomia (CREA), que confere ao profissional a habilitação necessária, especificando as áreas e os limites de suas atribuições.

Cada projeto deve ter seu registro no CREA, por meio de documento próprio intitulado Anotação de Responsabilidade Técnica (ART). Nessa ocasião, o conselho verificará se o profissional está habilitado para aquela especialidade, fazendo a respectiva anotação, que passará a constar do acervo técnico do profissional. A ART descreve o objeto do projeto que, na forma da legislação em vigor, estará sob a responsabilidade do técnico.

2.3.3 Competência profissional

Os profissionais habilitados para exercer atividades de elaboração e execução de projetos de instalação de energia elétrica são os engenheiros eletricitas e os técnicos industriais de nível médio, conforme atribuições específicas definidas para cada categoria profissional.

2.3.4 Partes componentes de um projeto

O projeto consiste basicamente em desenhos e documentos. De maneira geral, para instalações de edifícios de uso coletivo, é dividido em projeto elétrico e projeto telefônico.

Etapas básicas do projeto elétrico

- ART
- Carta de solicitação de aprovação à concessionária
- Memorial descritivo
- Memorial de cálculo:
 - Cálculos das previsões de cargas
 - Determinação da provável demanda
 - Dimensionamento dos condutores
 - Dimensionamento dos eletrodutos
 - Dimensionamento das proteções
- Plantas:
 - Planta de situação
 - Planta dos pavimentos
- Esquemas verticais (prumadas):
 - Elétrica
 - Antena coletiva

- Porteiro eletrônico
- Instalações complementares (alarme, segurança, iluminação de emergência etc.)
- Quadros
- Quadros de distribuição de cargas
- Diagramas multifilares e/ou unifilares da instalação
- Detalhes:
 - Entrada de serviço
 - Caixa seccionadora
 - Centros de medição
 - Para-raios
 - Caixas de passagem
 - Aterramentos
 - Outros (conforme a necessidade)
- Convenções
 - Especificações
 - Lista de materiais

Etapas básicas do projeto telefônico

- ART
- Carta de solicitação de aprovação à concessionária
- Memorial descritivo
- Plantas:
 - Planta de situação
 - Plantas dos pavimentos
- Esquemas verticais (prumadas):
 - Tubulação
 - Redes internas
- Tabela de distribuição secundária
- Detalhes:
 - Caixa subterrânea de entrada
 - Distribuidor geral
 - Caixas de distribuição e aterramentos
 - Outros (conforme a necessidade)
- Convenções
 - Especificações
 - Lista de materiais



2.3.5 Recomendações e normas técnicas

Os símbolos gráficos utilizados nos projetos de instalação elétrica são padronizados pela ABNT por meio das normas listadas a seguir. A indicação XXXX após os dois-pontos refere-se ao ano de revisão da norma.

- NBR 5444:XXXX – Símbolos gráficos para instalações prediais.
- NBR 5446:XXXX – Símbolos gráficos de relacionamento usados na confecção de esquemas.
- NBR 5453:XXXX – Sinais e símbolos para eletricidade.

Tabela 2.1

Exemplos de normas utilizadas em instalações elétricas.

Um projeto de instalação elétrica deve observar as normas técnicas apresentadas na tabela 2.1.

Norma	Título	Última emissão
NR 10	Segurança em instalações e serviços em eletricidade	Dezembro de 2004
NBR 5410	Instalações elétricas de baixa tensão	2004
NBR 14039	Instalações elétricas de média tensão 1kV-36,2 kV	Maior de 2005
NBR 5418	Instalações elétricas em atmosferas explosivas	Março de 1995
NBR 5419	Proteção contra descargas elétricas atmosféricas	Julho de 2005
NBR 8222	Execução de sistemas de prevenção contra explosão e incêndio por evitar sobrepensões decorrentes de arcos elétricos internos em transformadores e reatores de potência	Julho de 2005
NBR 8874	Execução de sistemas fixos automáticos de proteção contra incêndio, com água nebulizada para transformadores e reatores de potência	Julho de 2005
NBR 12232	Execução de sistemas fixos automáticos de proteção contra incêndio com gás carbônico (CO ₂) em transformadores de potência	Julho de 2005
NBR 13231	Proteção contra incêndio em subestações elétricas de geração, transmissão e distribuição	Julho de 2005
IEC 61850	Redes de comunicação e sistemas em subestações	Julho de 2005
NBR 6979	Conjunto de manobras e controle em invólucro metálico para tensões acima de 1 kV até 36,2 kV	1998
NBR IEC 60439-1	Conjunto de manobra e controle de baixa tensão – parte 1: conjuntos com ensaio de tipo totalmente testado (TTA) e conjuntos com ensaio de tipo (PTTA)	30 de junho de 2003
NBR 5356	Transformador de potência – especificação	Setembro de 2005
NBR 5380	Transformador de potência – testes	Setembro de 2005
IEC 479-1 IEC 479-2	Efeitos da corrente nos seres humanos e no gado	1994

2.3.6 Concessionária local

O projetista deve levar em conta, além das normas da ABNT gerais e específicas para seu projeto, as normas técnicas da concessionária de energia do local onde o projeto será executado.

Por exemplo: no Estado de São Paulo, no âmbito da Cesp, da CPFL e da AES, existe a NTU 01 (fornecimento de energia elétrica em tensão secundária a edificações individuais); no Paraná, no âmbito da Copel, as normas NTC 9-01100 (fornecimento em tensão secundária de distribuição) e NTC 9-01110 (atendimento a edifícios de uso coletivo); em Minas Gerais, no âmbito da Cemig, as normas ND 5.1 (fornecimento em tensão secundária) e ND 5.2 (fornecimento em tensão secundária a edificações coletivas).

Além das normas técnicas da ABNT e da concessionária, o projeto tem de obedecer às normas e regulamentações do corpo de bombeiros local relacionadas ao atendimento à segurança e combate a incêndios.

No caso de projetos telefônicos, devem ser seguidas as normas técnicas:

- Norma 224-315-01/02, da Telebrás: tubulações telefônicas em edifícios.
- Normas da concessionária local referentes a tubulações e rede telefônica interna de edifícios.

2.3.7 Critérios para a elaboração do projeto de instalação elétrica

Na elaboração de um projeto de instalações elétricas prediais, o projetista deve considerar detalhes técnicos como confiabilidade e acessibilidade à manutenção e apresentar reserva de carga.

2.4 Etapas da elaboração de um projeto de instalação elétrica

A seguir são apresentadas as etapas a serem seguidas para que a execução do projeto seja bem-sucedida.

2.4.1 Informações preliminares

Essa é uma das etapas de maior importância para o êxito do projeto. Nela, o projetista procurará obter de diversas fontes todas as informações necessárias para a formação da concepção geral do projeto a ser desenvolvido, por meio:

- da planta de situação;
- do projeto arquitetônico;
- dos projetos complementares;
- das informações obtidas com o proprietário, arquiteto ou responsável.



2.4.2 Quantificação do sistema

Obtidas as informações preliminares e de posse das normas técnicas aplicáveis, o projetista estará em condições de fazer um levantamento da previsão de cargas do projeto, em termos tanto da quantidade de pontos de utilização como de sua potência nominal, levando em conta:

- Previsão de iluminação
- Previsão de pontos de tomadas
- Previsão de cargas especiais: elevadores, bombas de recalque d'água, bombas de drenagem, bombas de combate a incêndio etc.

2.4.3 Determinação do padrão de atendimento

Nessa etapa, o projetista consultará as normas técnicas da concessionária local para determinar a demanda de cada consumidor do edifício e sua respectiva categoria de atendimento conforme os padrões da concessionária. Além disso, definirá a provável demanda do edifício e o padrão de sua entrada de serviço.

2.4.4 Desenho das plantas

Essa etapa compreende basicamente:

- Elaborar o desenho dos pontos de utilização.
- Identificar a localização dos quadros de distribuição de luz (QLs ou QDs) e quadros de força (QFs).
- Determinar a divisão das cargas em circuitos terminais.
- Elaborar o desenho dos eletrodutos dos circuitos terminais.
- Elaborar o traçado da fiação dos circuitos terminais.
- Identificar a localização das caixas de passagem dos pavimentos e da prumada.
- Identificar a localização do quadro geral de baixa tensão, dos centros de medidores, da caixa seccionadora, do ramal alimentador e do ponto de entrega.
- Elaborar o desenho dos eletrodutos dos circuitos alimentadores.
- Elaborar o desenho do esquema vertical (prumada).
- Elaborar o traçado da fiação dos circuitos alimentadores.

2.4.5 Dimensionamentos

Nessa etapa, o projetista dimensionará todos os componentes do projeto, tendo como base os cálculos realizados, as normas técnicas aplicáveis em cada caso e as tabelas de fabricantes. Assim, realizará:

- Dimensionamento dos condutores
- Dimensionamento dos eletrodutos
- Dimensionamento dos dispositivos de proteção
- Dimensionamento dos quadros elétricos

2.4.6 Quadro de previsão de cargas e diagramas

Para representar a distribuição e o dimensionamento dos circuitos, é necessário elaborar:

- Quadro de previsão de cargas
- Diagramas unifilares (ou multifilares) dos QLs
- Diagramas de força e comando dos motores (QFs)
- Diagrama unifilar geral

2.4.7 Elaboração dos detalhes construtivos

O objetivo da elaboração dos detalhes construtivos é facilitar a interpretação do projeto, permitindo que ele seja executado adequadamente. Desse modo, quanto mais detalhado um projeto, mais fácil será sua execução.

2.4.8 Memorial descritivo

Trata-se de uma descrição sucinta do projeto, justificando, quando necessário, as soluções adotadas. O memorial descritivo é composto basicamente dos seguintes itens:

- Dados básicos de identificação do projeto
- Dados quantitativos do projeto
- Descrição geral do projeto
- Documentação do projeto

2.4.9 Memorial de cálculo

Nesse documento, será apresentado o resumo dos principais cálculos e dimensionamentos:

- Cálculos das previsões de cargas
- Determinação da provável demanda
- Dimensionamento dos condutores
- Dimensionamento dos eletrodutos
- Dimensionamento dos dispositivos de proteção

2.4.10 Elaboração das especificações técnicas

As especificações técnicas detalham os tipos de materiais utilizados e respectivos fabricantes, prevendo um fornecedor similar com a mesma qualificação técnica, quando não for possível utilizar o material do fornecedor principal. É comum em alguns projetos incluir nesse documento a relação de serviços a executar, os procedimentos de sua execução e as normas técnicas a serem seguidas.

2.4.11 Elaboração da lista de material

Listagem de todos os materiais que serão empregados na execução do projeto, com suas respectivas especificações e quantidades.



2.4.12 ART

Anotação de Responsabilidade Técnica do responsável técnico pelo projeto junto à jurisdição do CREA local.

2.4.13 Análise da concessionária

Documento que comprova a análise realizada pelo responsável técnico da concessionária local quanto à adequação do projeto às normas técnicas e padrões de fornecimento. Em geral, esta análise fica limitada ao cálculo da demanda, ao padrão de fornecimento, à entrada de serviço e à rede de alimentadores até a chegada nos quadros terminais (prumada). É importante observar que em hipótese alguma a análise e a posterior aprovação pela concessionária eximem o projetista de sua responsabilidade técnica.

2.4.14 Revisão do projeto

Possíveis adequações ou modificações para atender à padronização e normas técnicas da concessionária.

2.4.15 Termo técnico

Documento emitido pela concessionária que atesta que o projeto da instalação está de acordo com seus padrões e normas técnicas. É com ele que o proprietário do edifício poderá solicitar o pedido de ligação das instalações à concessionária de distribuição de energia.

Nota

O roteiro aqui descrito é em geral seguido por grande parte dos projetistas. Muitas vezes essa ordem pode ser alterada, conforme a complexidade do projeto ou a composição numérica e qualitativa da equipe que o elabora. Portanto, é possível incluir algumas etapas, suprimir outras e até fundir duas ou mais delas em uma só.

2.5 Glossário

Esse glossário apresenta o significado de alguns elementos de conexão da rede pública de baixa tensão com a unidade consumidora e outras definições pertinentes à instalação elétrica, de acordo com as normas técnicas brasileiras e das concessionárias de energia.

Caixa de passagem – Caixa destinada a possibilitar mudanças de direção e facilitar a enfição dos condutores.

Circuito de distribuição – Circuito que interliga o medidor ao quadro de distribuição, também conhecido como quadro de luz.

Circuito terminal – Circuito que alimenta diretamente os equipamentos de utilização e/ou tomadas de corrente a partir dos quadros de distribuição ou dos quadros terminais.

Concessionária de energia – Pessoa jurídica detentora de concessão federal para explorar a prestação de serviço público de energia elétrica.

Entrada de energia (padrão de entrada) – A especificação do padrão de entrada tem de estar de acordo com as normas da concessionária local. A instalação é de responsabilidade do consumidor, compreendendo ramal de entrada, poste particular ou pontalete, caixas, dispositivos de proteção, eletrodo de aterramento e ferragens. A instalação deve permitir a ligação de uma ou mais unidades consumidoras à rede da concessionária.

Entrada de serviço – Conjunto de condutores, equipamentos e acessórios compreendido entre o ponto de derivação da rede da concessionária e o de medição e proteção. No caso de prédio de múltiplas unidades, vai até o ponto de proteção geral.

Origem da instalação – Corresponde aos terminais de saída do dispositivo geral de comando e proteção, quando instalado após o medidor, ou aos terminais de saída do medidor, quando está ligado após o dispositivo geral de comando e proteção.

Ponto de entrega – Ponto de conexão do sistema elétrico da empresa distribuidora de eletricidade com a instalação elétrica do consumidor que delimita as responsabilidades da distribuidora, definidas pela autoridade reguladora.

Quadro terminal – Quadro elétrico que alimenta exclusivamente circuitos terminais.

Ramal de entrada – Conjunto de condutores e acessórios localizado entre o ponto de entrega e o de medição. No caso de prédio de múltiplas unidades, vai até a proteção geral.

Ramal de ligação – Conjunto de condutores e acessórios situado entre o ponto de derivação da rede da concessionária e o de entrega.

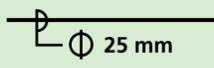
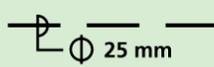
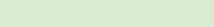
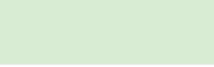
2.6 Simbologia para instalações elétricas

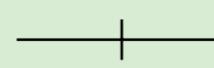
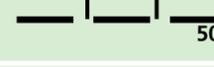
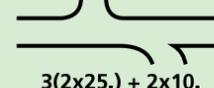
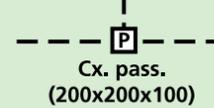
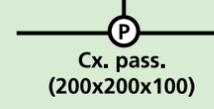
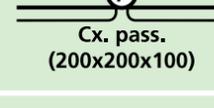
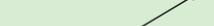
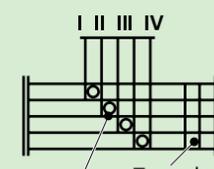
Para documentar um projeto de instalação elétrica, é preciso usar a simbologia estabelecida pela norma NBR 5444:1989 da ABNT. Além de facilitar a execução do projeto, os símbolos gráficos permitem identificar todos os componentes utilizados, assim como seu dimensionamento e sua localização física. As tabelas 2.2 a 2.8 apresentam esses símbolos.



Tabela 2.2

NBR 5444:1989 – Dutos e distribuição.

Símbolo	Significado	Observações
	Eletroduto embutido no teto ou parede.	Todas as dimensões em mm. Indicar a bitola se não for 15 mm.
	Eletroduto embutido no piso.	Todas as dimensões em mm. Indicar a bitola se não for 15 mm.
	Telefone no teto.	Todas as dimensões em mm. Indicar a bitola se não for 15 mm.
	Telefone no piso.	Todas as dimensões em mm. Indicar a bitola se não for 15 mm.
	Tubulação para campainha, som, anunciador ou outro sistema.	Indicar na legenda o sistema passante.
	Condutor de fase no interior do eletroduto.	Cada traço representa um condutor. Indicar bitola (seção), número do circuito e a bitola (seção) dos condutores, exceto se forem de 1,5 mm ² .
	Condutor de neutro no interior do eletroduto.	Cada traço representa um condutor. Indicar bitola (seção), número do circuito e a bitola (seção) dos condutores, exceto se forem de 1,5 mm ² .
	Condutor de retorno no interior do eletroduto.	Cada traço representa um condutor. Indicar bitola (seção), número do circuito e a bitola (seção) dos condutores, exceto se forem de 1,5 mm ² .
	Condutor terra no interior do eletroduto.	Cada traço representa um condutor. Indicar bitola (seção), número do circuito e a bitola (seção) dos condutores, exceto se forem de 1,5 mm ² .
	Condutor positivo no interior do eletroduto.	

Símbolo	Significado	Observações
	Condutor negativo no interior do eletroduto.	
	Cordoalha de terra.	Indicar a seção utilizada. 50. significa 50 mm ² .
	Leito de cabos com um circuito passante, composto de três fases, cada um por dois cabos de 25 mm ² mais dois cabos de neutro bitola 10 mm ² .	25. significa 25 mm ² . 10. significa 10 mm ² .
	Caixa de passagem no piso.	Dimensões em mm.
	Caixa de passagem no teto.	Dimensões em mm.
	Caixa de passagem na parede.	Indicar altura e se necessário fazer detalhe. Dimensões em mm.
	Eletroduto que sobe.	
	Eletroduto que desce.	
	Eletroduto que passa subindo.	
	Eletroduto que passa descendo.	
	Sistema de calha no piso.	No desenho, aparecem quatro sistemas, que habitualmente são: I. Luz e força II. Telefone (Telebrás) III. Telefone (P(a), Bx, Ks, ramais) IV. Especiais (comunicações)



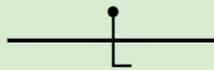
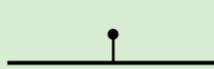
Símbolo	Significado	Observações
	Condutor seção 1 mm ² fase para campainha.	Se a bitola for maior, indicá-la.
	Condutor seção 1 mm ² neutro para campainha.	Se a bitola for maior, indicá-la.
	Condutor seção 1 mm ² retorno para campainha.	Se a bitola for maior, indicá-la.

Tabela 2.3

NBR 5444:1989 – Quadros de distribuição.

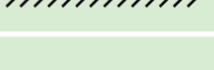
Símbolo	Significado	Observações
	Quadro parcial de luz e força aparente.	Indicar as cargas de luz em watts e de forças em W ou kW.
	Quadro parcial de luz e força embutido.	Indicar as cargas de luz em watts e de forças em W ou kW.
	Quadro geral de luz e força aparente.	Indicar as cargas de luz em watts e de forças em W ou kW.
	Quadro geral de luz e força embutido.	Indicar as cargas de luz em watts e de forças em W ou kW.
	Caixa de telefones.	
	Caixa para medidor ou quadro de medição embutido.	

Tabela 2.4

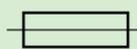
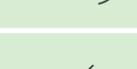
NBR 5444:1989 – Interruptores (símbolos para plantas).

Símbolo	Significado	Observações
	Interruptor simples de uma seção (uma tecla).	A letra minúscula indica o ponto comandado.
	Interruptor simples de duas seções (duas teclas).	As letras minúsculas indicam os pontos comandados.

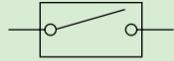
Símbolo	Significado	Observações
	Interruptor simples de três seções (três teclas).	As letras minúsculas indicam os pontos comandados.
	Interruptor paralelo de uma seção (uma tecla) ou <i>three-way</i> .	A letra minúscula indica o ponto comandado.
	Interruptor intermediário ou <i>four-way</i> .	A letra minúscula indica o ponto comandado.
	Interruptor simples bipolar.	A letra minúscula indica o ponto comandado.
	Botão de minuteria.	
	Botão de campainha na parede (ou comando a distância).	
	Botão de campainha no piso (ou comando a distância).	

Tabela 2.5

NBR 5444:1989 – Interruptores (símbolos para diagramas).

Símbolo	Significado	Observações
	Fusível.	Indicar a tensão, correntes nominais.
	Chave seccionadora com fusíveis, abertura sem carga.	Indicar a tensão, correntes nominais. Ex.: chave tripolar.
	Chave seccionadora com fusíveis, abertura em carga.	Indicar a tensão, correntes nominais. Ex.: chave bipolar.
	Chave seccionadora, abertura sem carga.	Indicar a tensão, correntes nominais. Ex.: chave monopolar.
	Chave seccionadora, abertura em carga.	Indicar a tensão, correntes nominais.



Símbolo	Significado	Observações
	Disjuntor a óleo.	Indicar a tensão, a corrente, a potência, a capacidade nominal de interrupção e a polaridade.
	Disjuntor a seco.	Indicar a tensão, a corrente, a potência, a capacidade nominal de interrupção e a polaridade com traços.
	Chave reversora.	

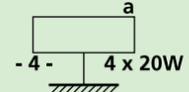
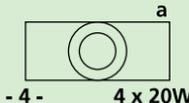
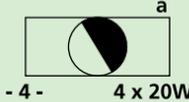
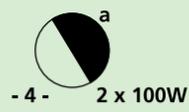
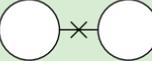
Símbolo	Significado	Observações
	Ponto de luz fluorescente na parede.	Indicar a altura da luminária. A letra minúscula indica o ponto de comando, e o número entre os dois traços, o circuito.
	Ponto de luz fluorescente no teto (embutido).	A letra minúscula indica o ponto de comando, e o número entre os dois traços, o circuito.
	Ponto de luz fluorescente no teto em circuito vigia (emergência).	A letra minúscula indica o ponto de comando, e o número entre os dois traços, o circuito.
	Ponto de luz incandescente no teto em circuito vigia (emergência).	A letra minúscula indica o ponto de comando, e o número entre os dois traços, o circuito.
	Sinalização de tráfego (rampas, entradas etc.).	
	Sinalização.	
	Refletor.	Indicar a potência, a tensão e o tipo de lâmpada.
	Poste com duas luminárias para iluminação externa.	Indicar as potências e os tipos de lâmpada.
	Lâmpada obstáculo.	
	Minuteria.	Diâmetro igual ao do interruptor.
	Luz de emergência na parede (independente).	
	Exaustor	

Tabela 2.6

NBR 5444:1989 – Luminárias, refletores e lâmpadas.

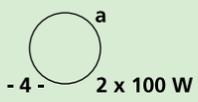
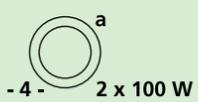
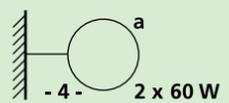
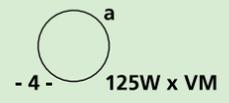
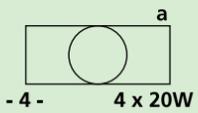
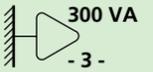
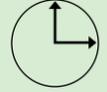
Símbolo	Significado	Observações
	Ponto de luz incandescente no teto.	A letra minúscula indica o ponto de comando, e o número entre os dois traços, o circuito.
	Ponto de luz incandescente no teto (embutido).	A letra minúscula indica o ponto de comando, e o número entre os dois traços, o circuito.
	Ponto de luz incandescente na parede (arandela).	Indicar a altura da arandela. A letra minúscula indica o ponto de comando, e o número entre os dois traços, o circuito.
	Ponto de luz a vapor de mercúrio no teto.	Indicar o número de lâmpadas e a potência em watts. A letra minúscula indica o ponto de comando, e o número entre os dois traços, o circuito.
	Ponto de luz fluorescente no teto.	Indicar o número de lâmpadas e, na legenda, o tipo de partida do reator. A letra minúscula indica o ponto de comando, e o número entre os dois traços, o circuito.



Tabela 2.7
NBR 5444:1989 – Tomadas.

Símbolo	Significado	Observações
	Tomada de luz na parede, baixa (300 mm do piso acabado).	Especificar a potência ao lado em VA (exceto se for 100 VA), como também o número do circuito correspondente e a altura da tomada, se for diferente da normalizada; se a tomada for de força, indicar o número de W ou kW.
	Tomada de luz na parede, a meia altura (1 300 mm do piso acabado).	Especificar a potência ao lado em VA (exceto se for 100 VA), como também o número do circuito correspondente e a altura da tomada, se for diferente da normalizada; se a tomada for de força, indicar o número de W ou kW.
	Tomada de luz na parede, alta (2 000 mm do piso acabado).	Especificar a potência ao lado em VA (exceto se for 100 VA), como também o número do circuito correspondente e a altura da tomada, se for diferente da normalizada; se a tomada for de força, indicar o número de W ou kW.
	Tomada de luz no piso.	Especificar a potência ao lado em VA (exceto se for 100 VA), como também o número do circuito correspondente e a altura da tomada, se for diferente da normalizada; se a tomada for de força, indicar o número de W ou kW.
	Tomada para rádio e televisão.	
	Relógio elétrico no teto.	

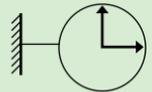
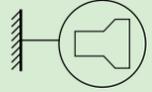
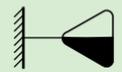
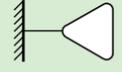
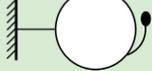
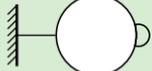
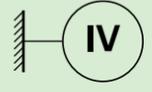
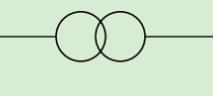
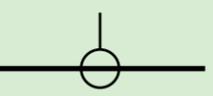
Símbolo	Significado	Observações
	Relógio elétrico na parede.	
	Saída de som no teto.	
	Saída de som na parede.	Indicar a altura "h".
	Saída para telefone externo na parede (rede Telebrás).	Indicar a tensão, a corrente, a potência, a capacidade nominal de interrupção e a polaridade.
	Saída para telefone externo na parede a uma altura "h".	Especificar "h".
	Saída para telefone interno na parede.	
	Saída para telefone externo no piso.	
	Saída para telefone interno no piso.	
	Cigarra.	
	Campainha.	
	Quadro anunciador.	Dentro do círculo, indicar o número de chamadas em algarismo romano.



Tabela 2.8

NBR 5444:1989 – Motores e transformadores.

Símbolo	Significado	Observações
	Gerador.	Indicar as características nominais.
	Motor.	Indicar as características nominais.
	Transformador de potência.	Indicar as relações de tensões e valores nominais.
	Transformador de corrente (um núcleo).	Indicar a relação de espiras, classe de exatidão e nível de isolamento. A barra de primário deve ter um traço mais grosso.
	Transformador de potencial.	Indicar a relação de espiras, classe de exatidão e nível de isolamento. A barra de primário deve ter um traço mais grosso.
	Retificador.	

2.7 Caminhos da eletricidade nas instalações elétricas

A energia elétrica que abastece o setor residencial é fornecida por transformadores abaixadores localizados nos postes da rede secundária de distribuição. Pelo ramal de distribuição aérea ou subterrânea, chega ao poste de entrada, onde se encontra a caixa do medidor de energia. Então, segue por fios para o quadro de distribuição, instalado na parte interna da residência, e finalmente para os circuitos terminais para alimentar as cargas, ou seja, lâmpadas, chuveiros, torneiras elétricas e aparelhos eletroeletrônicos ligados às tomadas.

Na caixa do medidor de energia e no quadro de distribuição são instalados disjuntores termomagnéticos, que servem para proteger os condutores dos circuitos internos da casa e os eletrodomésticos. Os condutores são cabos e fios de cobre que permitem interconexões dos circuitos. O disjuntor denominado diferencial residual serve para a proteção contra choque elétrico e sua instalação é obrigatória.

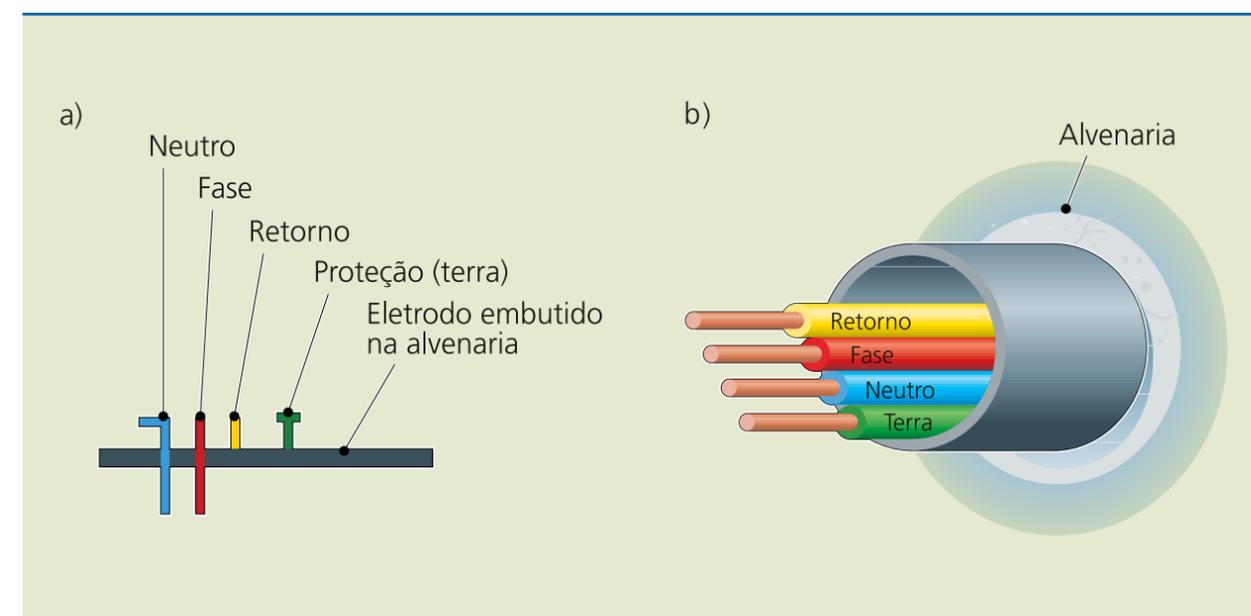
2.8 Condutores: cores padronizadas

Os condutores utilizados em instalação elétrica são: fase, neutro, retorno e de proteção (terra). Além da simbologia estabelecida pela norma NBR 5444:1989, eles têm cores padronizadas, previstas pela norma NBR 5410:2004 e pelo código internacional de cores: azul-claro para o neutro e verde ou verde-amarelo para o terra.

A figura 2.31 mostra a simbologia e a representação física, em corte, de um eletroduto embutido em alvenaria, pelo qual passam os condutores elétricos.

Figura 2.31

Condutores elétricos de um eletroduto embutido em alvenaria: (a) simbologia (NBR 5444:1989) e (b) representação gráfica, em corte.



2.9 Diagramas esquemáticos de instalação elétrica

Os diagramas esquemáticos podem ser desenhados ou representados de diversas maneiras em uma instalação elétrica predial. Os três mais importantes são:

- **Esquema unifilar** – É a simplificação da representação do circuito elétrico da instalação. Com uma única linha, indica-se o número de condutores e sua trajetória na instalação elétrica. É o esquema mais utilizado em projetos de instalações elétricas prediais.
- **Esquema multifilar** – Apresenta detalhes da instalação do circuito elétrico completo. Cada linha representa um fio utilizado nas ligações dos componentes elétricos.
- **Esquema funcional** – Representa graficamente todos os detalhes de montagem do sistema elétrico, além das funções de cada componente elétrico.



2.9.1 Circuito elétrico com interruptor e lâmpada incandescente

Interruptor simples (10 A/250 V)

É utilizado para ligar e desligar lâmpada(s) em um único ponto de comando (figura 2.32).

Figura 2.32
Interruptor simples.

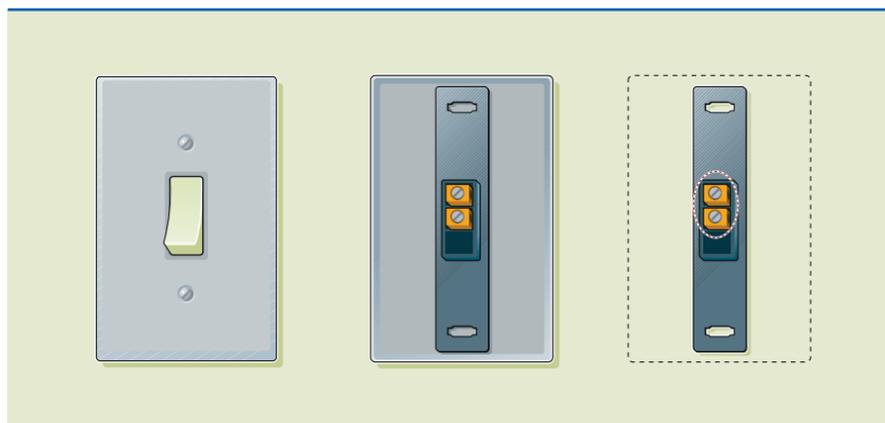
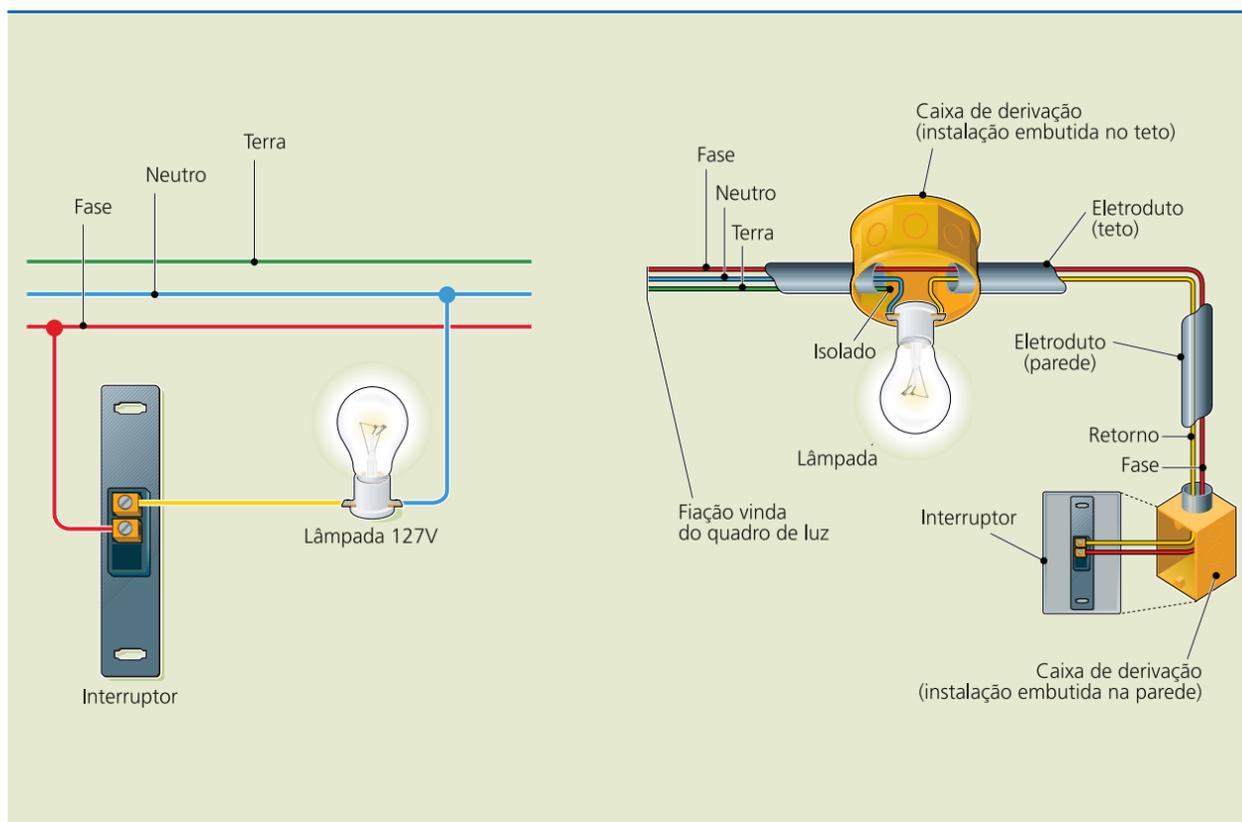


Figura 2.33
Esquema funcional do interruptor simples.



As figuras 2.33, 2.34 e 2.35 apresentam, respectivamente, os esquemas funcional, multifilar e unifilar para o circuito com interruptor simples e lâmpada incandescente.

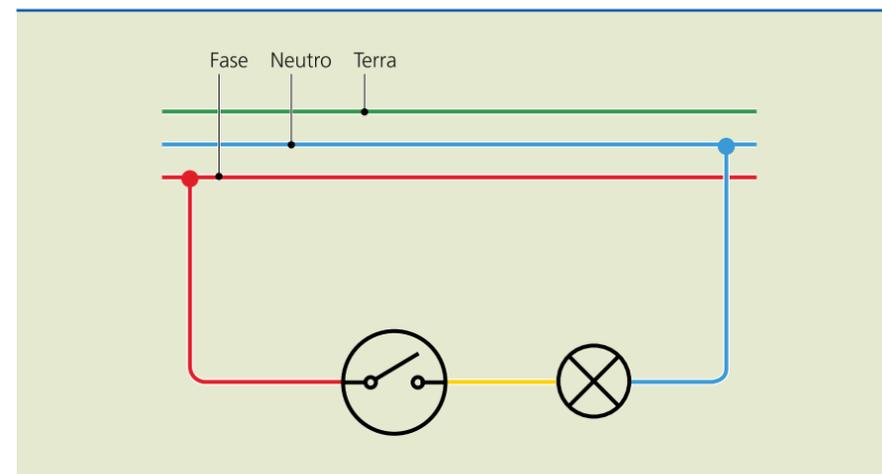


Figura 2.34
Esquema multifilar do interruptor simples.

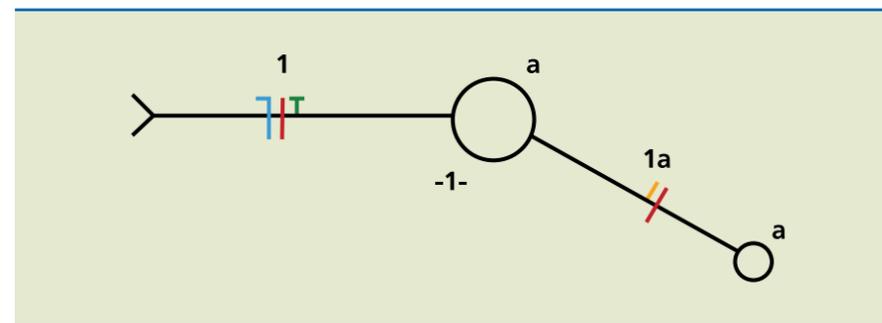


Figura 2.35
Esquema unifilar do interruptor simples.

Interruptor paralelo (10 A/250 V)

É recomendado quando se deseja ligar e desligar a(s) lâmpada(s) em dois pontos de comando distantes (figura 2.36).

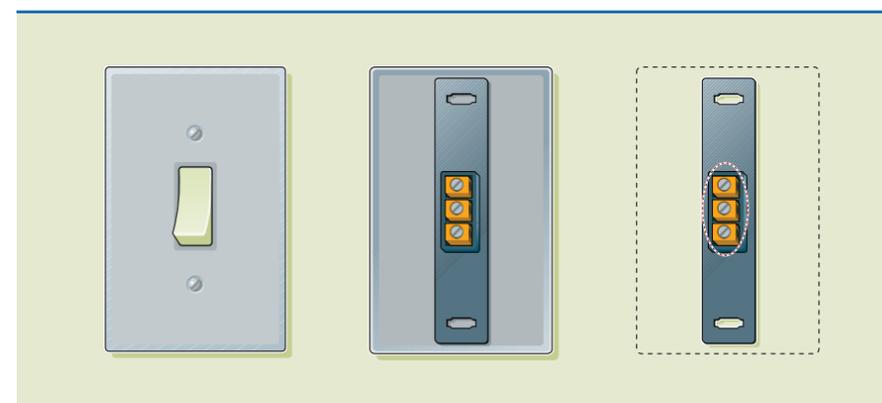


Figura 2.36
Interruptor paralelo.

As figuras 2.37, 2.38 e 2.39 apresentam, respectivamente, os esquemas funcional, multifilar e unifilar para o circuito com interruptor paralelo e lâmpada incandescente.



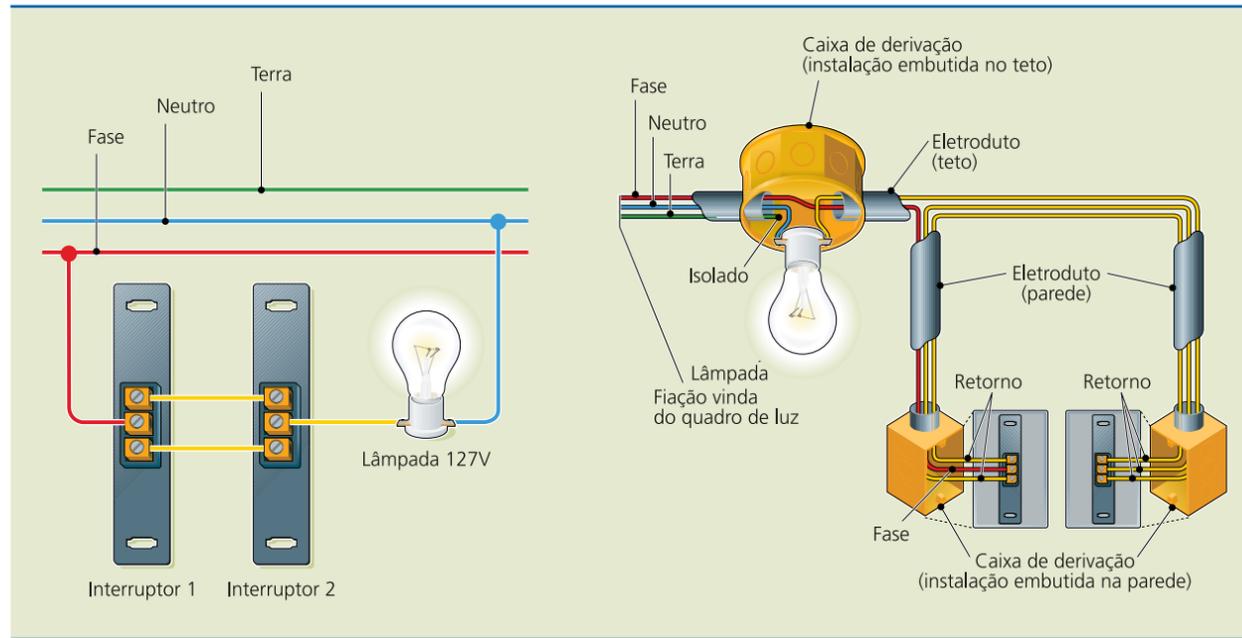


Figura 2.37

Esquema funcional do interruptor paralelo.

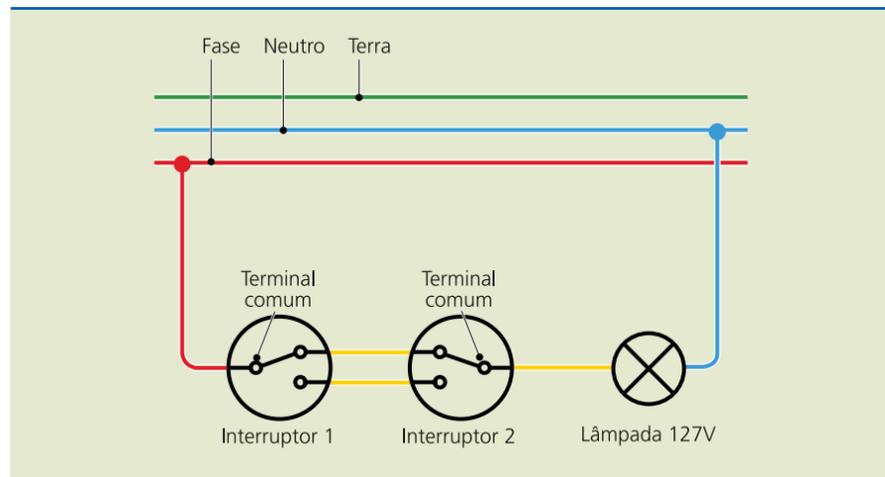


Figura 2.38

Esquema multifilar do interruptor paralelo.

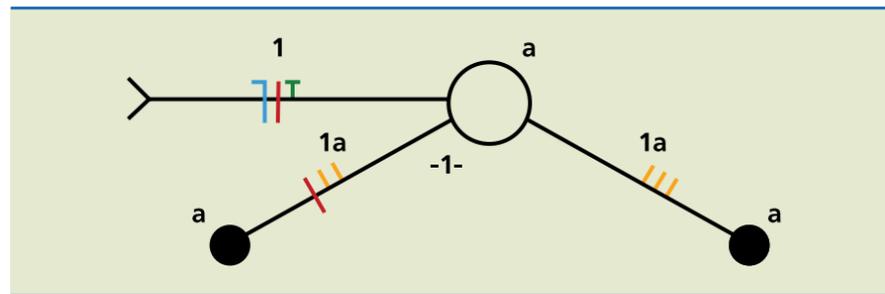


Figura 2.39

Esquema unifilar do interruptor paralelo.

Interruptor intermediário (10 A/250 V)

É utilizado para ligar e desligar sequencialmente lâmpadas em corredores e escadarias, quando há mais de dois pontos de comando. Instala-se sempre entre dois interruptores paralelos (figura 2.40).

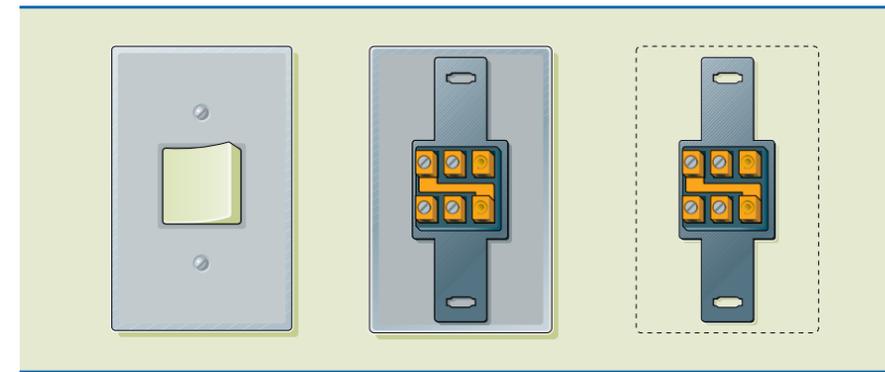


Figura 2.40
Interruptor intermediário.

O interruptor intermediário possui dois tipos de conexão elétrica interna: de A com D e de B com C (figura 2.41a) e de A com C e de B com D (figura 2.41b). As conexões entre os pontos A, B, C e D podem variar de acordo com o fabricante.

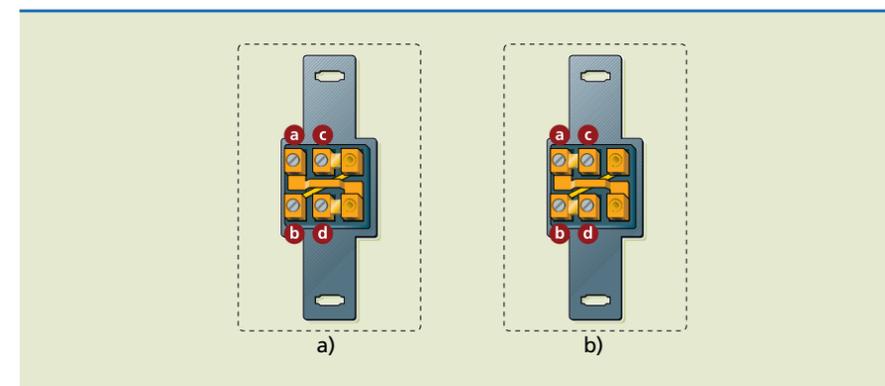


Figura 2.41
Configurações internas do interruptor intermediário.

As figuras 2.42, 2.43 e 2.44 apresentam os esquemas funcional, multifilar e unifilar para o circuito com interruptor intermediário e lâmpada incandescente.

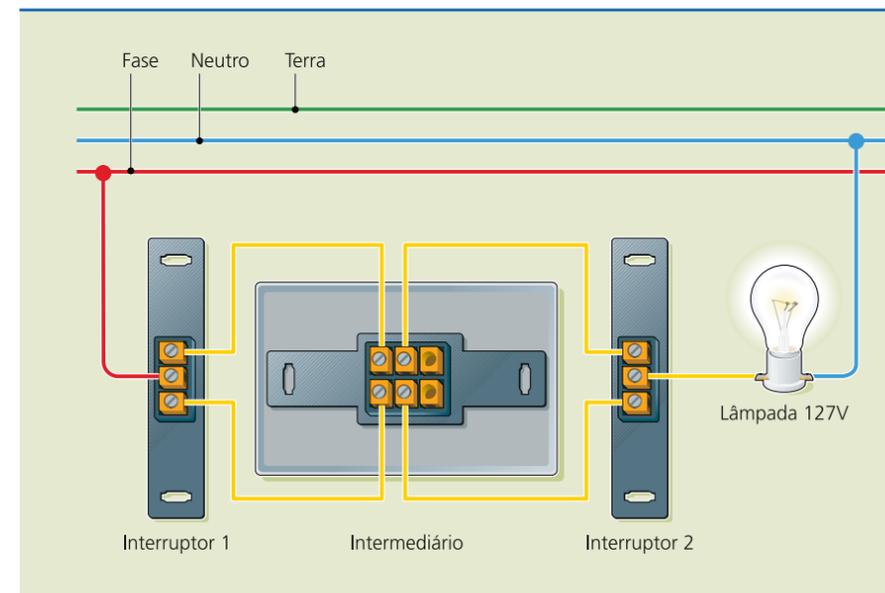


Figura 2.42
Esquema funcional do interruptor intermediário.



Figura 2.43

Esquema funcional do interruptor intermediário.

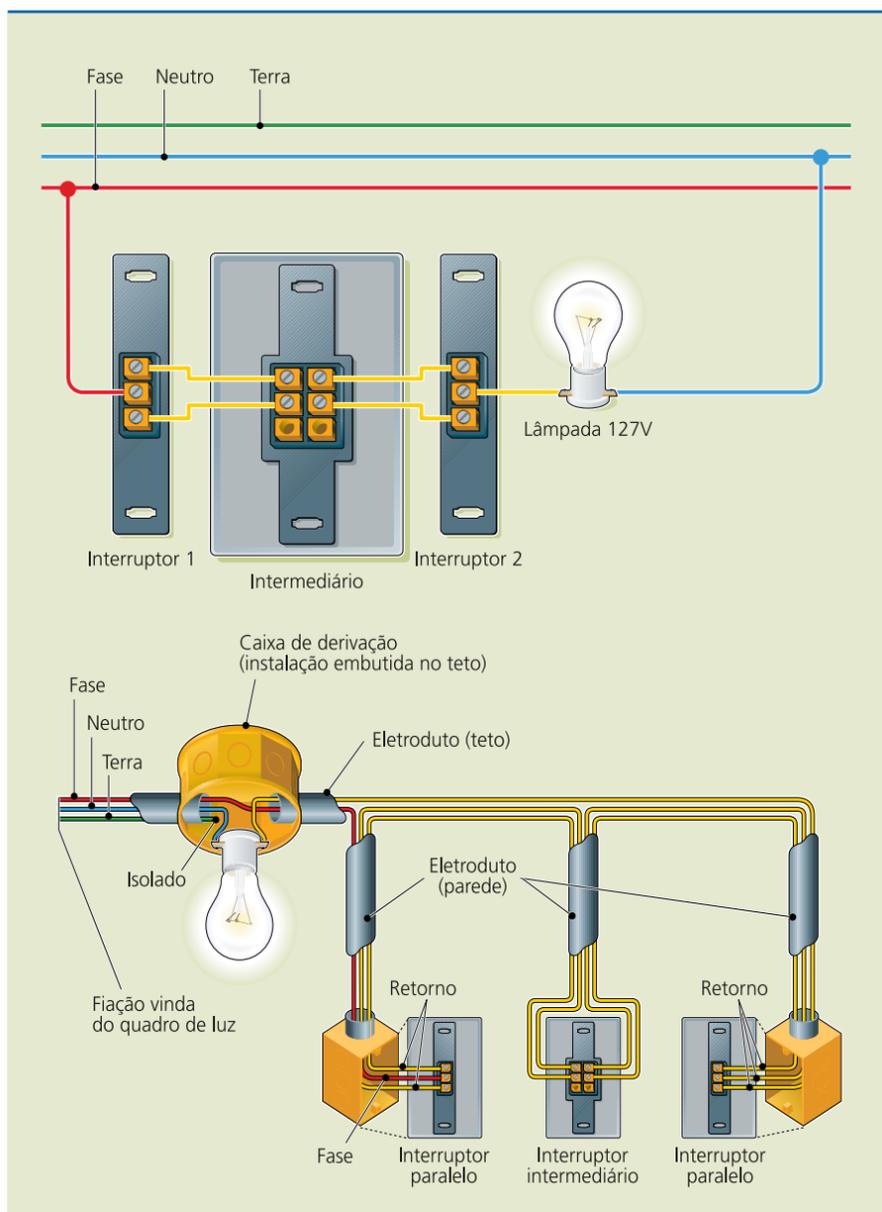


Figura 2.44

Esquema multifilar do interruptor intermediário.

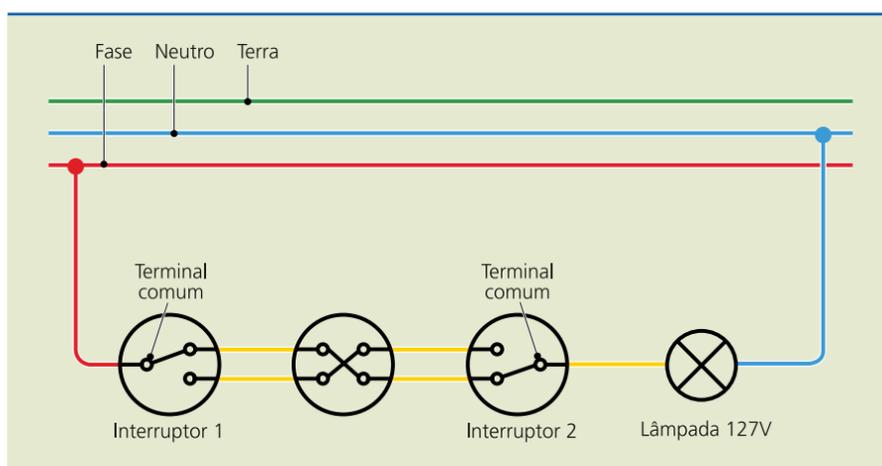
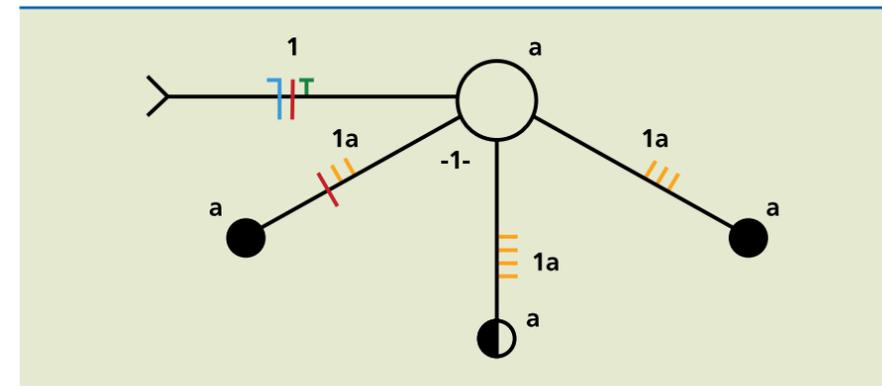


Figura 2.45

Esquema unifilar do interruptor intermediário.



Interruptor bipolar simples (10 A/250 V)

É usado em sistemas bifásicos (duas fases), podendo ser instalado para ligar e desligar lâmpada(s) em um único ponto de comando.

As figuras 2.46, 2.47 e 2.48 apresentam, respectivamente, os esquemas funcional, multifilar e unifilar (figura 2.49) para o circuito com interruptor bipolar simples e lâmpada incandescente.

Figura 2.46

Esquema funcional do interruptor bipolar simples.

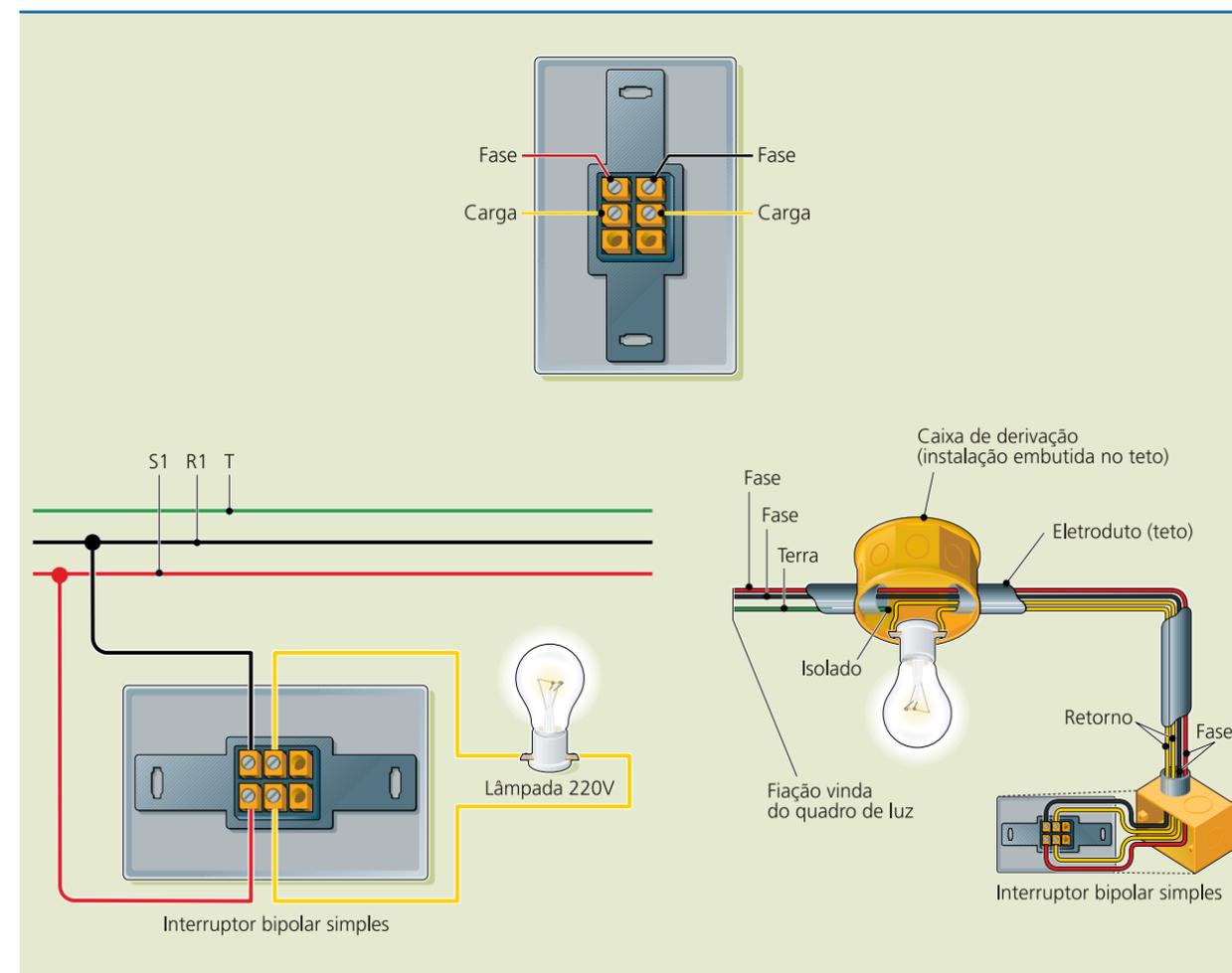


Figura 2.47

Esquema multifilar do interruptor bipolar simples.

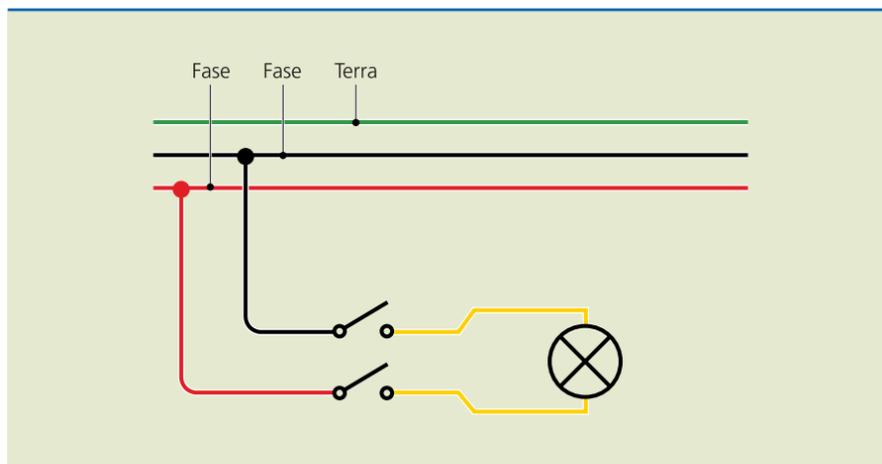
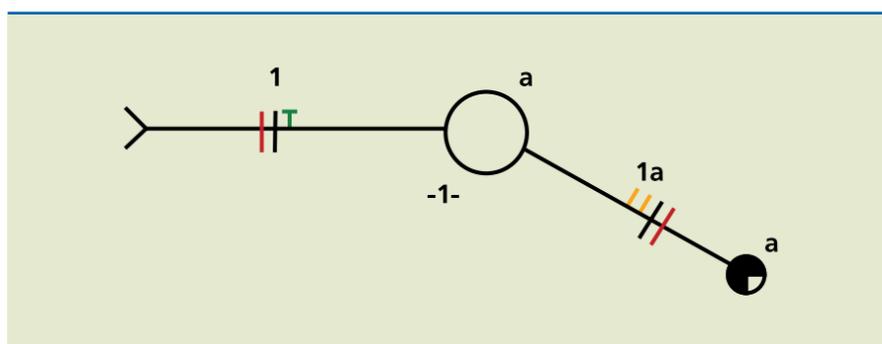


Figura 2.48

Esquema unifilar do interruptor bipolar simples.



Interruptor bipolar paralelo (10 A/250 V)

É utilizado em sistemas bifásicos (duas fases). Instala-se esse interruptor para ligar e desligar lâmpada(s) em dois pontos de comandos dentro do mesmo ambiente, como escadarias ou corredores.

As figuras 2.49 e 2.50 apresentam, respectivamente, os esquemas funcional e unifilar para o circuito com interruptor bipolar paralelo e lâmpada incandescente.

Figura 2.49

Esquema funcional do interruptor bipolar paralelo.

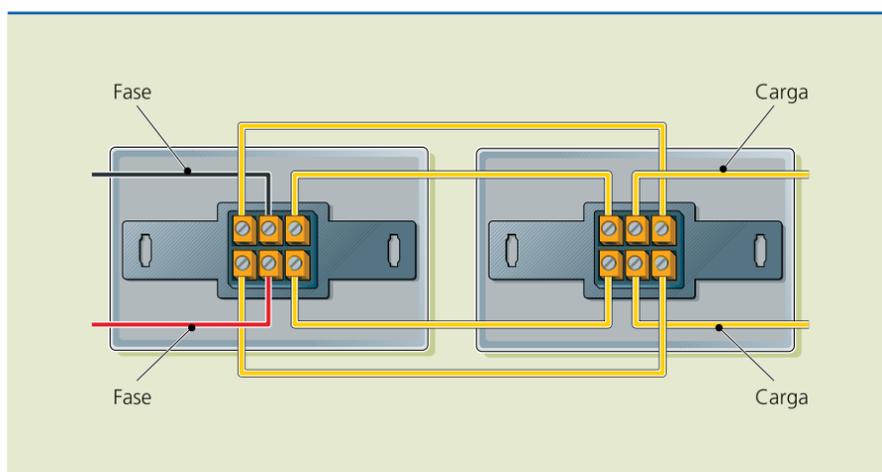
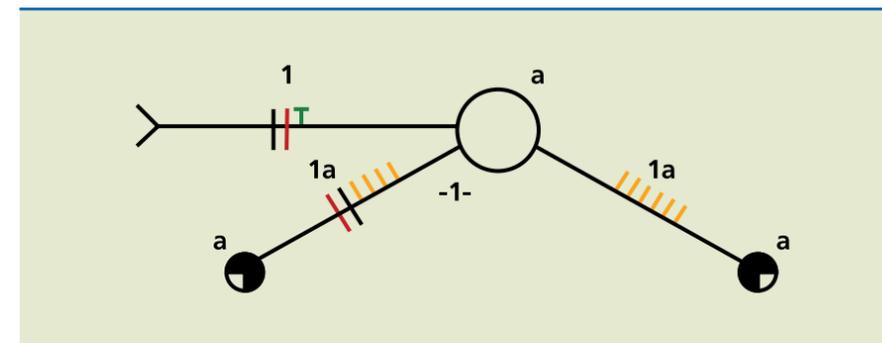


Figura 2.50

Esquema unifilar do interruptor bipolar paralelo.



Reator convencional

As figuras 2.51 e 2.52 mostram os esquemas multifilar e unifilar para o circuito com reator convencional (com *starter*) para lâmpada fluorescente.

Figura 2.51

Esquema multifilar do reator convencional (com *starter*).

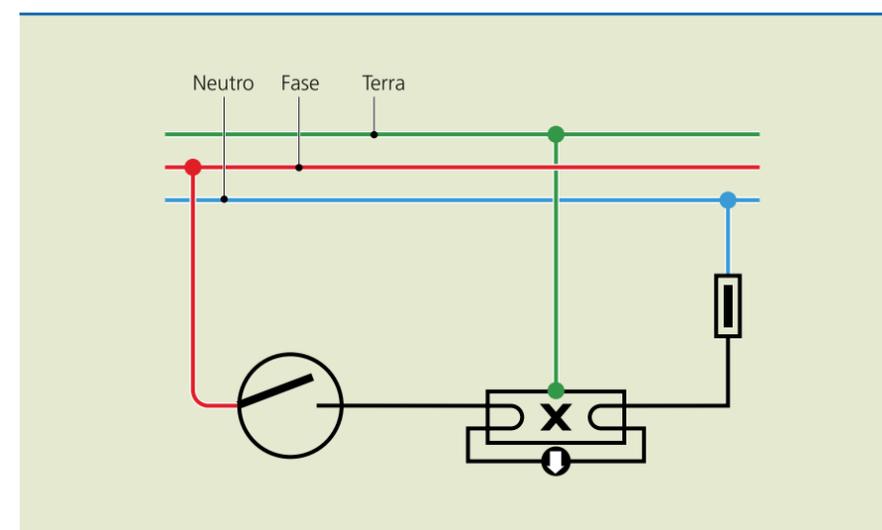
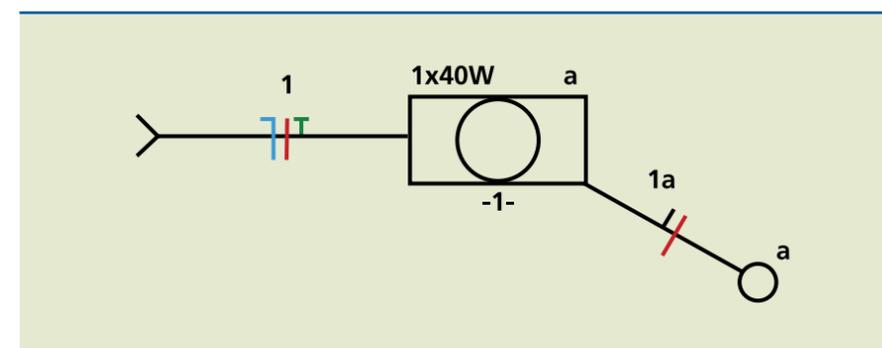


Figura 2.52

Esquema unifilar do reator convencional (com *starter*).



Reator duplo de partida rápida

As figuras 2.53 e 2.54 ilustram os esquemas multifilar e unifilar para o circuito com reator duplo de partida rápida para lâmpada fluorescente.



Figura 2.53

Esquema multifilar do reator duplo de partida rápida.

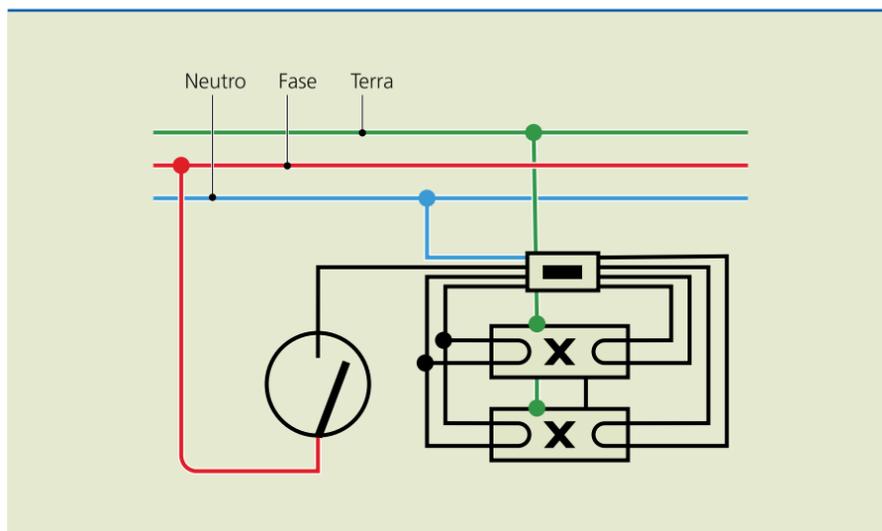
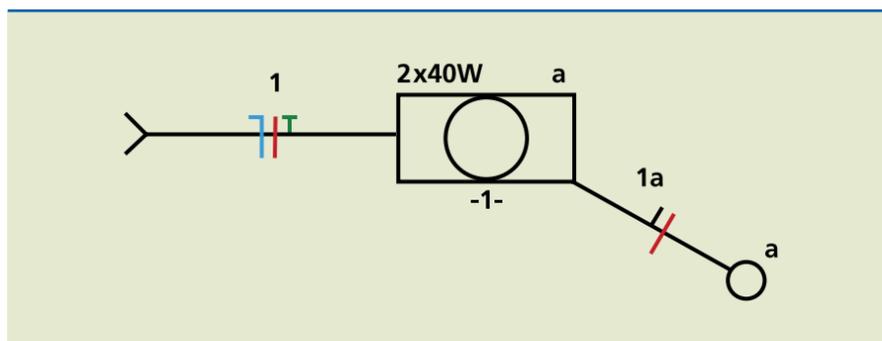


Figura 2.54

Esquema unifilar do reator duplo de partida rápida.

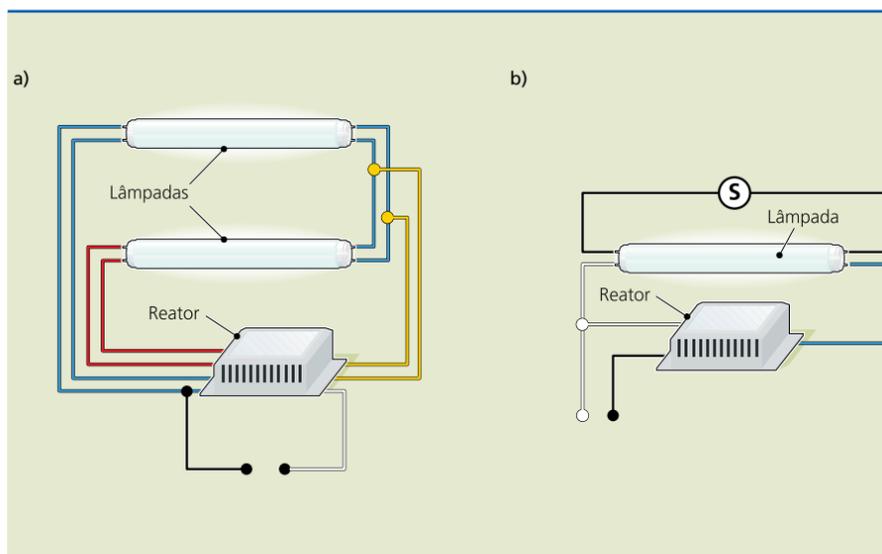


Ligação dos dois tipos de reatores

A figura 2.55 apresenta o esquema multifilar para o reator duplo de partida rápida e para o reator convencional.

Figura 2.55

Exemplos de ligações:
(a) reator duplo de partida rápida e
(b) reator convencional.



2.9.2 Dimmer

É um dispositivo eletrônico de controle de intensidade luminosa de lâmpadas incandescentes acionado por potenciômetro (figura 2.56).

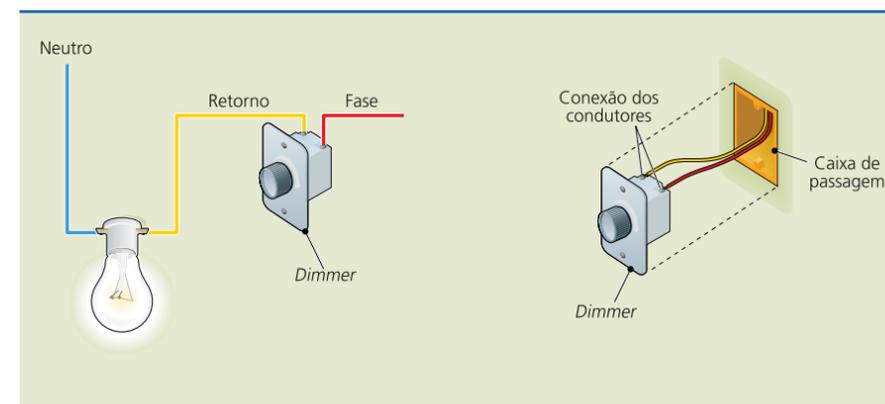


Figura 2.56

Dimmer:
(a) representação funcional e
(b) exemplo de ligação.

2.9.3 Minuteria

Consiste em um dispositivo elétrico que controla o tempo que a(s) lâmpada(s) fica(m) acesa(s). O ajuste do tempo é feito com uma chave seletora (figura 2.57). É muito utilizado em corredores de condomínios residenciais.

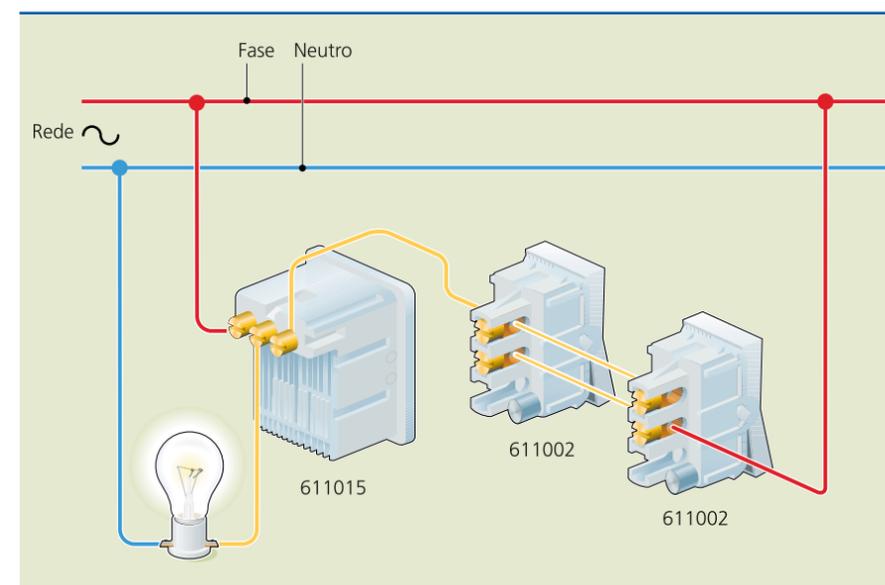


Figura 2.57
Ligação multifilar da minuteria.

2.9.4 Tomadas

Existem diferentes tipos de tomadas disponíveis no mercado. As figuras 2.58, 2.59 e 2.60 apresentam, respectivamente, os esquemas funcional, multifilar e unifilar para alguns modelos simples.



Figura 2.58

Esquema funcional da tomada.

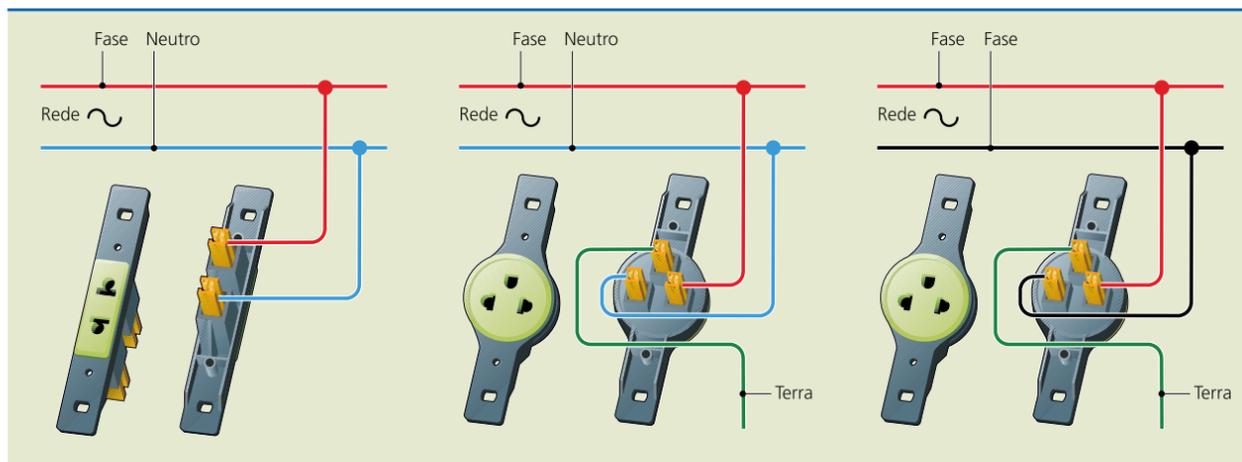


Figura 2.59

Esquema multifilar do ponto de tomada.

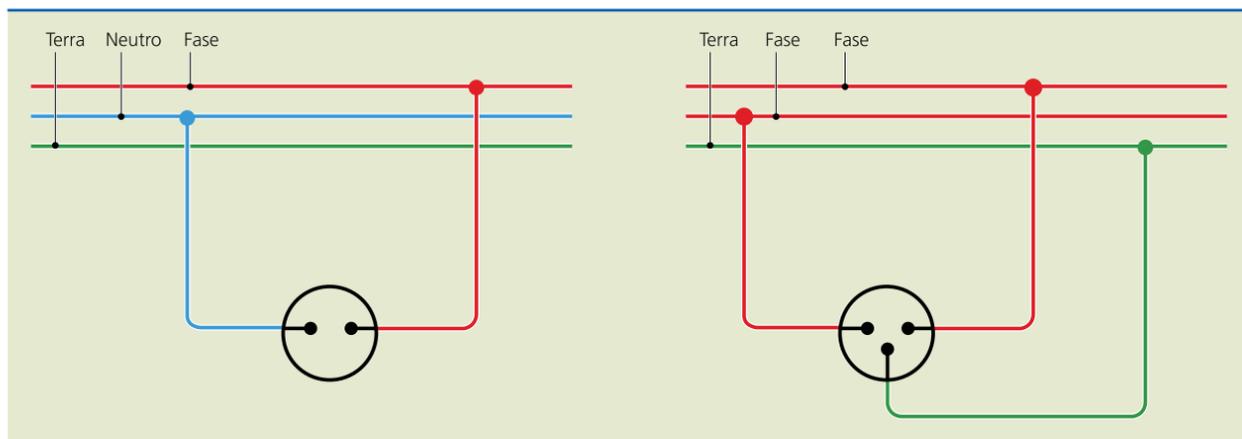
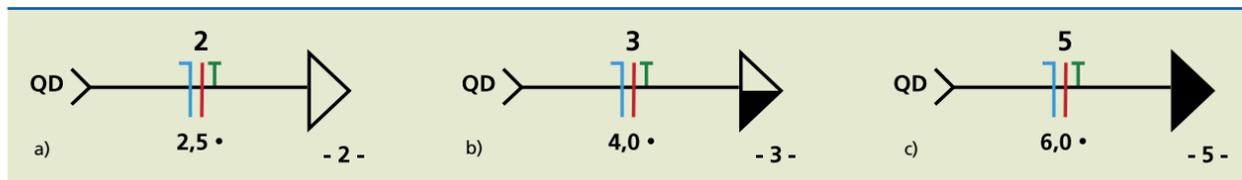


Figura 2.60

Esquema unifilar do ponto de tomada: (a) tomada baixa, (b) tomada a meia altura e (c) tomada alta.



- As tomadas podem ser instaladas em três alturas, de acordo com a finalidade; portanto, ao elaborar o esquema unifilar, o projetista deve indicar essa informação no desenho. Na figura 2.60, as marcações 2,5, 4,0 e 6,0 indicam as seções nominais dos condutores (bitolas) desses circuitos, ou seja, 2,5 mm², 4,0 mm² e 6,0 mm², respectivamente, e os números 2, 3 e 5, a que circuito terminal pertencem os pontos de tomadas e os condutores.

Tomada 2P+T

É a tomada universal de 10-15 A/250 V, com três pinos, da qual há vários tipos. Para evitar problemas com inversão de fase, é preciso observar as posições dos terminais (figura 2.61).

Os três pinos têm posições definidas, o que impede a conexão invertida de um cabo com a tomada.

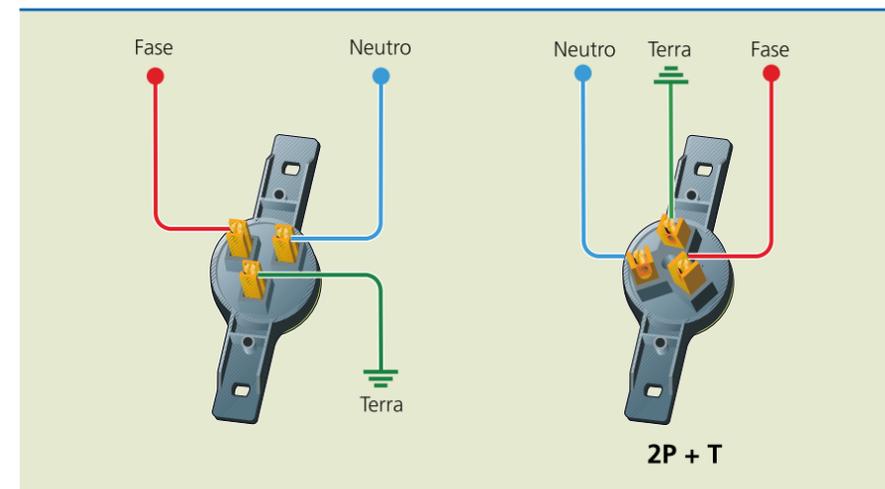


Figura 2.61

Detalhe da tomada 2P+T.

Tomada para computadores

Nesse tipo de tomada, não há possibilidade de inverter a posição do cabo, evitando a queima do computador (figura 2.62).

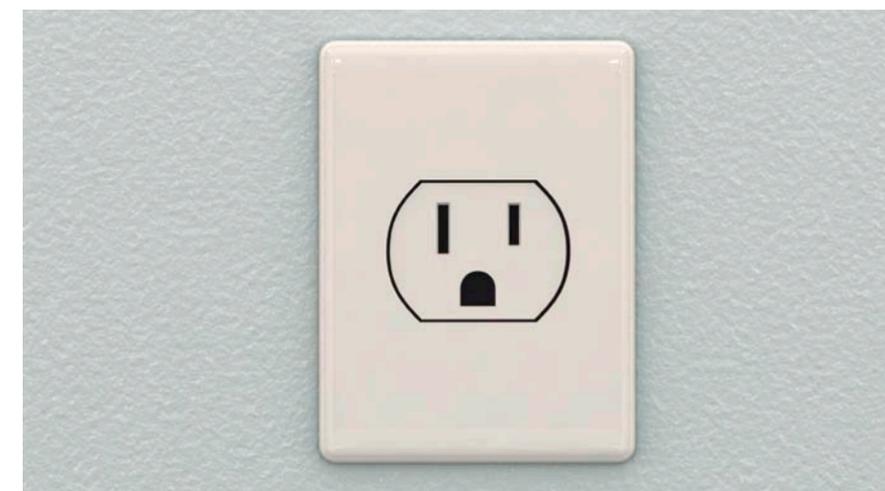


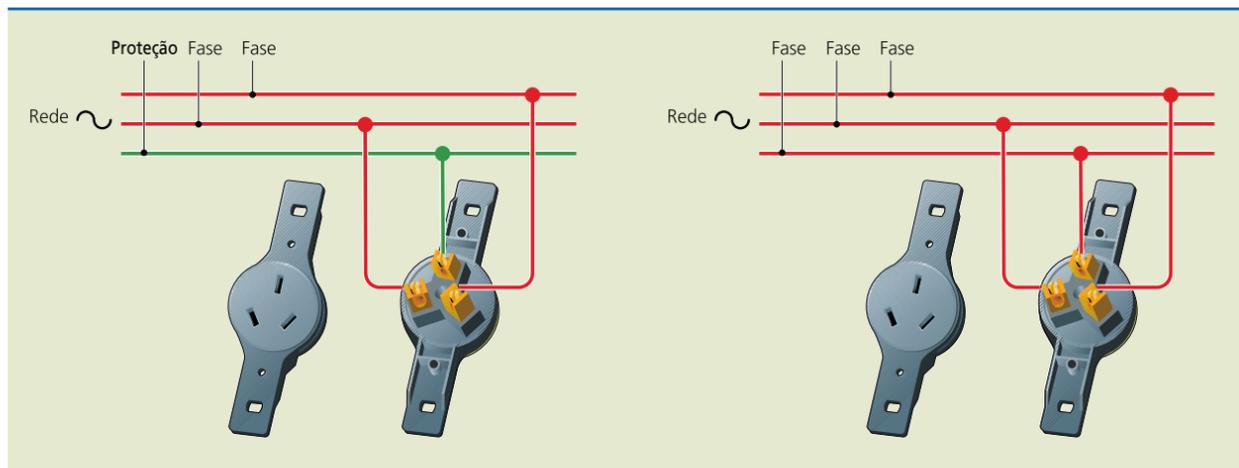
Figura 2.62

Detalhe da tomada para computador.

Tomada de três polos

Pode ser utilizada para fazer ligações trifásicas (3F) ou bifásicas e um terra (2F+T). A figura 2.63 apresenta o esquema funcional.



**Figura 2.63**

Esquema funcional da tomada de três polos.

Tomada-padrão no Brasil

O Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (Inmetro) estabeleceu, por meio da Portaria nº 85, de 3 de abril de 2006, a certificação compulsória do plugue e tomada-padrão em conformidade com a norma NBR 14136 da ABNT. Atualmente existe apenas um modelo de tomada fixa no Brasil (2P+T para 10 A e 20 A), além de plugues e tomadas móveis do tipo 2P e 2P+T, todos munidos de pinos e contatos redondos (figura 2.64).

Figura 2.64

Tomada-padrão no Brasil: pontos de tomadas em um único local (conforme NBR 14136).



FERNANDO FAVORITTO/CIAR, IMAGEM

Capítulo 3

Projetos de instalações elétricas residenciais



Os fabricantes de eletrodomésticos e eletroeletrônicos vêm desenvolvendo inúmeros modelos para diferentes finalidades. Alguns aparelhos apresentam baixo consumo; outros, em razão de sua potência elevada, requerem que a rede elétrica esteja corretamente dimensionada. Dessa maneira, é de suma importância que a elaboração de projetos de instalações elétricas possibilite o fornecimento de energia adequado e seguro para o consumidor.

De modo geral, um projeto de instalação elétrica seguro deve levar em conta:

- O cumprimento das normas técnicas específicas da ABNT e da concessionária local fornecedora de energia.
- A qualidade dos materiais e dispositivos empregados.
- O modo de utilização.
- A manutenção preventiva e corretiva.

Um projeto de instalação elétrica é composto por diferentes fases. Na fase preliminar, uma das etapas de maior importância refere-se ao dimensionamento dos materiais e à especificação dos dispositivos elétricos a serem utilizados. Além disso, o projeto deve possibilitar a otimização do sistema e garantir a existência de diagramas que representem fielmente a localização de todos os circuitos alimentadores, eletrodutos, dispositivos de proteção, pontos de iluminação e de tomadas, de modo a reduzir o tempo e o custo de manutenção corretiva ou preventiva.

Essa fase preliminar tem de ser realizada em conjunto com o dono da casa e com os demais profissionais envolvidos na obra. Nessa etapa, é importante entender as necessidades do proprietário em relação à instalação de equipamentos e sistemas elétricos e avaliar se estão de acordo com as normas que regulamentam as instalações elétricas. As plantas da edificação devem estar disponíveis para consulta do projetista e dos demais profissionais.

As etapas de um projeto de instalação elétrica residencial seguem a norma NBR 5410:2004 – Instalações elétricas de baixa tensão e a Norma Técnica Unificada 01 (NTU 01). Para entendermos as orientações de ambas as normas, vamos considerar a residência representada na planta baixa da figura 3.1.



Figura 3.1
Planta baixa residencial.

Depois de conhecer as necessidades do proprietário e confrontá-las com as especificações das normas técnicas, a etapa seguinte é calcular a área e o perímetro de cada dependência, incluindo qual aparelho será instalado em cada cômodo da residência; a tabela 3.1 prevê aparelhos no banheiro e na cozinha.

Cômodo	Dimensões (m)	Área (m ²)	Perímetro (m)	Aparelho elétrico
Sala	4,20 e 3,00	12,60	14,40	
Quarto	4,50 e 2,50	11,25	14,00	
Banheiro	2,50 e 1,30	3,25	7,60	Chuveiro 6 400 W
Cozinha	3,00 e 2,50	7,50	11,00	Torneira 4 400 W
Área de serviço	3,00 e 1,50	4,50	9,00	

Tabela 3.1
Dimensões, área e perímetro dos cômodos.

- Exemplo de cálculo de área e perímetro: (Sala)

$$\text{Área} = b \cdot h \text{ [m}^2\text{]}$$

$$\text{Área} = 4,20 \cdot 3,00 = 12,60 \text{ m}^2$$

$$\text{Perímetro} = b + b + h + h = 2b + 2h \text{ [m]}$$

$$\text{Perímetro} = 2 \cdot 4,20 + 2 \cdot 3,00 = 14,40 \text{ m}$$



A seguir, é feita a previsão de carga de iluminação, tomadas, chuveiro e demais aparelhos. Ressalte-se que as normas técnicas cabíveis têm de ser obedecidas para que não ocorra super ou subdimensionamento das instalações.

A conexão do aquecedor elétrico de água ao ponto de utilização deve ser direta, ou seja, sem o uso de tomada de corrente.

Para estabelecer a potência de pontos específicos, deve-se atribuir a potência nominal do aparelho que será instalado em cada cômodo. Retomando a tabela 3.1, no banheiro está previsto chuveiro elétrico de 6 400 W e na cozinha, **torneira elétrica** de 4 400 W.

Levando em conta as recomendações das normas, é possível determinar a potência necessária para cada cômodo e o número de pontos de iluminação, conforme os itens a seguir:

- Área inferior ou igual a 6 m²: mínimo de 100 VA e um ponto de luz.
- Área superior a 6 m²: 100 VA para os primeiros 6 m² e 60 VA para cada 4 m² restantes.
- Área inferior 4 m²: nenhuma potência.

Para potência de iluminação superior a 250 VA, recomenda-se mais de um ponto de luz.

Tabela 3.2

Potência e pontos de luz em cada cômodo.

Com base nessas informações e efetuando os cálculos, obtêm-se os dados da tabela 3.2.

Cômodo	Área (m ²)	Cálculo	Potência atribuída (VA)	Potência de iluminação (VA)	Nº pontos de luz
Sala	12,60	6,00 + 4,00 + 2,60	100 + 60 + 0	160	01
Quarto	11,25	6,00 + 4,00 + 1,25	100 + 60 + 0	160	01
Banheiro	3,25	< 6,00	100	100	01
Cozinha	7,50	6,00 + 1,50	100 + 0	100	01
Área de serviço	4,50	< 6,00	100	100	01

As tomadas de uso industrial devem ser conforme IEC 60309-1 (item 6.5.3.1 da NBR5410/2004).

O dimensionamento dos pontos de tomada também deve obedecer à norma NBR 5410:2004. Todas as tomadas de corrente fixas das instalações têm de ser do tipo com contato de aterramento (PE). As de uso **residencial** e análogo seguem as normas NBR NM 60884-1 (antiga NBR 6147) e NBR 14136. Um ponto de tomada pode conter uma ou mais tomadas de corrente.

A previsão do número de pontos de tomada é a seguinte (NBR 5410:2004, item 9.5.2.2.1):

a) Banheiros: independentemente da área, no mínimo um ponto de tomada próximo ao lavatório, com distância de pelo menos 60 cm do boxe.

b) Cozinhas, copas, copas-cozinha, áreas de serviço, lavanderias e dependências semelhantes: no mínimo um ponto de tomada para cada 3,5 m, ou fração, de perímetro; acima da bancada da pia, devem ser previstas pelo menos duas tomadas de corrente, no mesmo ponto ou em pontos separados.

c) Varandas: no mínimo um ponto de tomada. Admite-se que o ponto não seja instalado na própria varanda, mas próximo a seu acesso, quando, por razões construtivas, a varanda não comportar o ponto de tomada, for menor que 2 m² ou apresentar profundidade inferior a 0,80 m.

d) Salas e quartos: um ponto de tomada para cada 5 m, ou fração, de perímetro, devendo os pontos ser espaçados tão uniformemente quanto possível.

e) Demais cômodos e dependências de habitação:

- Área igual ou inferior a 2,25 m²: no mínimo um ponto de tomada, que pode ser posicionado externamente ao cômodo ou dependência a no máximo 0,80 m de sua porta de acesso.
- Área superior a 2,25 m² e igual ou inferior a 6,00 m²: no mínimo um ponto de tomada.
- Área superior a 6 m²: um ponto de tomada para cada 5 m, ou fração, de perímetro, devendo os pontos ser espaçados tão uniformemente quanto possível.

Para *halls* de serviço, salas de manutenção e salas de equipamentos, tais como casas de máquinas, salas de bombas, barriletes e locais análogos, deve ser previsto no mínimo um ponto de tomada de uso geral, com potência de no mínimo 1.000 VA (item 4.1.- “b”). Nos *halls*, corredores, subsolos, garagens, sótãos e varandas teremos pelo menos uma tomada, com potência de no mínimo 100 VA.

Quanto à potência das tomadas, a norma NBR 5410:2004, item 9.5.2.2.2, estabelece:

a) Banheiros, cozinhas, copas, copas-cozinha, áreas de serviço, lavanderias e dependências semelhantes: no mínimo 600 VA por ponto de tomada, até três, e 100 VA por ponto excedente. Caso o número total de tomadas seja superior a seis, admite-se para critério de distribuição de potências: 600 VA nos dois primeiros pontos e 100 VA nos excedentes.

b) Varandas, salas, quartos e demais cômodos e dependências: no mínimo 100 VA por ponto de tomada.

A tabela 3.3 apresenta o número de pontos de tomada e a potência dos cômodos da residência do exemplo. A fração de perímetro contabiliza mais um ponto de tomada.



Cômodo	Área (m ²)	Norma	Perímetro (m)	Potência atribuída (VA)	Nº de pontos de tomada	Potência (VA)	Potência total (VA)
Sala	12,60	> 6,00 m ²	14,40	±5 m = 2 + fração (0,88)	3	100	300
Quarto	11,25	> 6,00 m ²	14,00	±5 m = 2 + fração (0,80)	3	100	300
Banheiro	–	–	–	600	1	600	600
Cozinha	–	–	11,00	±3,5 = 3 + fração (0,14)	3	600	1 900
Área de serviço	–	–	9,00	±3,5 = 2 + fração (0,57)	3	600	1 800

Tabela 3.3

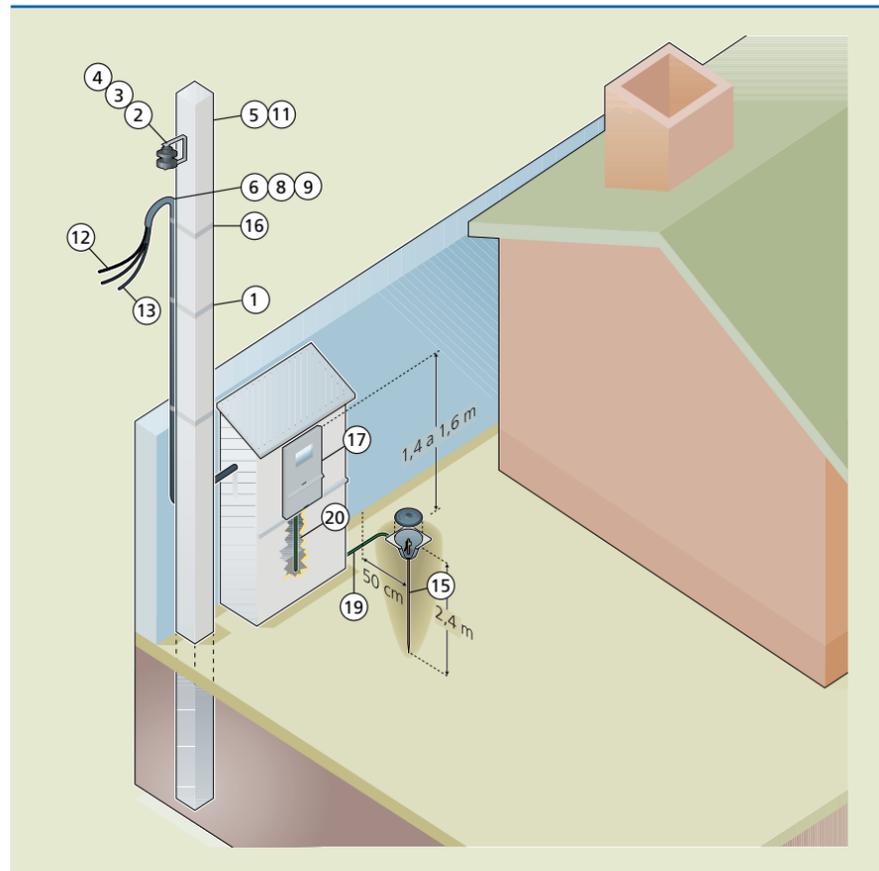
Pontos de tomada e potência de cada cômodo.

3.1 Padrão de entrada

Padrão de entrada é o conjunto de componentes que devem ser instalados conforme o tipo de fornecimento solicitado e a especificação das normas técnicas da concessionária local. A especificação dos componentes do exemplo da figura 3.2 está detalhada na tabela 3.4.

Figura 3.2

Exemplo de padrão de entrada bifásica no muro (carga instalada maior que 12 kW até 25 kW), especificando cada um dos componentes, bem como a montagem da caixa-padrão e o aterramento.



1. Poste de 7,5 m de altura
2. Armação secundária de um estribo
3. Haste para armação secundária 155 mm
4. Isolador roldana
5. Arruela redonda furo 14 mm
6. Eletroduto de PVC rígido rosqueável 4,0 m
8. Luva de emenda PVC
9. Curva de PVC 135 graus
11. Parafuso máquina 12 · 150 mm
12. Cabo de cobre isolado – 750 V preto
13. Cabo de cobre isolado – 750 V azul-claro
15. Haste terra 2,4 m, cobreada
16. Arame de aço 14 BWG
17. Caixa de medição tipo II
19. Fio de cobre nu
20. Eletroduto para aterramento

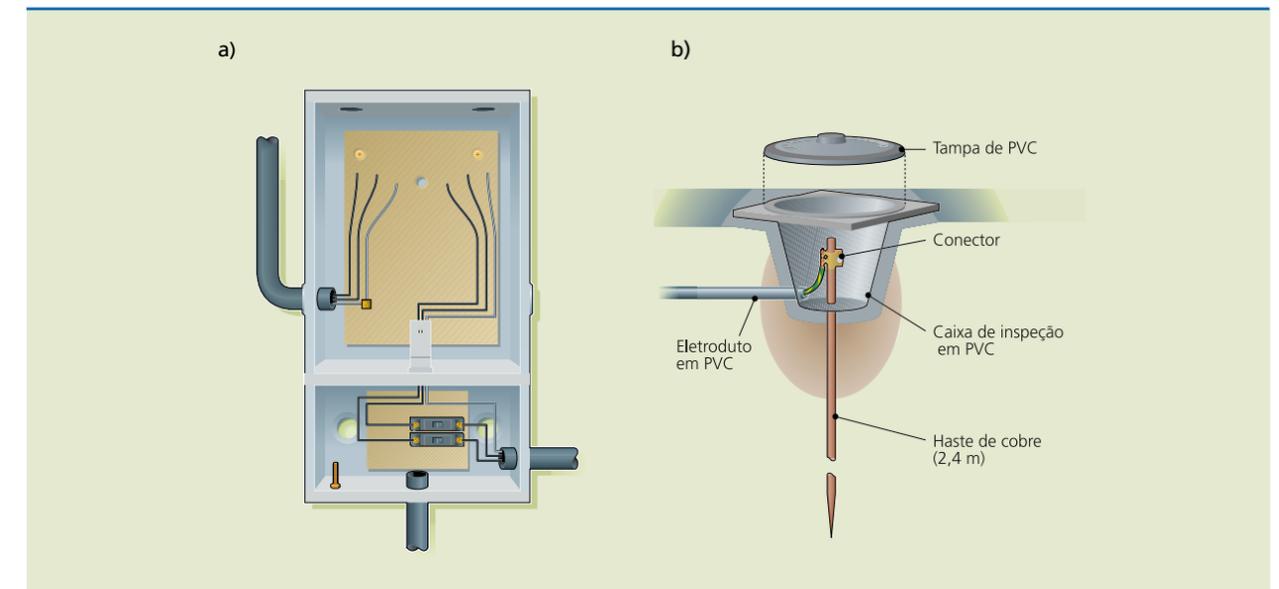
Tabela 3.4

Especificação dos componentes da figura 3.2.

Vamos continuar os cálculos de dimensionamento, agora partindo da caixa de medição tipo II. A figura 3.3 apresenta detalhes técnicos desse componente.

Figura 3.3

(a) Vista interna da caixa de medição e (b) montagem da caixa de inspeção de aterramento.



Para seleccionar o modelo correto da caixa de entrada, é preciso seguir certas orientações (tabela 3.5).

Tabela 3.5

Dimensionamento do ramal de entrada (tensão 127/220V).

FN = fase - neutro
FF = fase - fase

Símbolo de decanewton = 10 N

Categoria	Carga instalada - C (kW)	Limitação dos motores (cv)		Cabo (mm ²)	Caixa	Disjuntor (A)	Eletroduto (mm [pol])	Aterramento		Postes	
		FN	FF					Con- dutor (mm ²)	Ele- troduto (mm [pol])	Tubular de aço: diâmetro exterior · espessura (mm)	Concreto (daN)
B1	12 < C < 18	2	3	16	II	60	32 [1]	10	20 (1/2)	101,6 · 5,0	90
B2	18 < C < 25		5	25		70	40 [1 ¹⁴]				

3.1.1 Dimensionamento do padrão de entrada

Para realizar o dimensionamento, é necessário calcular a carga instalada e posteriormente determinar o tipo de fornecimento e a demanda de corrente e de potência.

A corrente de demanda da instalação é utilizada para o dimensionamento da entrada consumidora. As exigências mínimas para o fornecimento de energia elétrica constam na NTU 01 ou outra específica da região.

Tabela 3.6

Quadro de previsão de cargas para os cômodos de uma residência.

Voltando à residência do exemplo, para a qual já foi feita a previsão de pontos de iluminação e de tomada, é possível agora obter o quadro de previsão de cargas, conforme mostra a tabela 3.6.

Cômodo	Potência dos pontos de iluminação		Potência dos pontos de tomada			Potência de pontos específicos (W)
	Pontos	Potência (VA)	Quantidade	Potência (VA)	Potência total (VA)	
Sala	1	160	3	100	300	–
Quarto	1	160	3	100	300	–
Banheiro	1	100	1	600	600	Chuveiro elétrico 6 400
Cozinha	1	100	4	3 · 600 + 1 · 100	1 900	Torneira elétrica 4 400

Cômodo	Potência dos pontos de iluminação		Potência dos pontos de tomada			Potência de pontos específicos (W)
	Pontos	Potência (VA)	Quantidade	Potência (VA)	Potência total (VA)	
Área de serviço	1	100	3	3 · 600	1 800	–
Total	–	620	–	–	4 900	10 800

Nos projetos elétricos residenciais aplicam-se os valores de **fator de potência** conforme a tabela 3.7.

A potência ativa é uma parcela da potência aparente. Chamamos de fator de potência (FP) a relação:

$$FP = \frac{\text{potência ativa}}{\text{potência aparente}}$$

Tipo de circuitos	FP	
Iluminação incandescente	1,0	
Iluminação fluorescente	Com starter: 18 W a 65 W	0,5
	Partida rápida: 20 W a 110 W	0,5
	Partida instantânea: 20 W a 40 W	0,5
Pontos de tomada	0,8	

Tabela 3.7

Fator de potência (FP) para algumas lâmpadas incandescentes, fluorescentes e tomadas.

Após a previsão de cargas, é preciso determinar a potência aparente total de iluminação e a potência aparente total dos pontos de tomada. Para isso, aplica-se o fator de potência (FP) para correção:

$$P_{\text{ativa}} = P_{\text{aparente}} \cdot FP$$

A unidade de medida é o watt (W).

Aplicando o FP, obtêm-se os dados da tabela 3.8.

Tipo	Paparente (VA)	Fator de potência (cosφ)	P _{ativa} (W)
Iluminação	620	1,0	620
Pontos de tomada	4 900	0,8	3 920
Pontos específicos	–	–	10 800

Tabela 3.8

Determinação da potência ativa para alguns pontos de uso.



A potência ativa total é o somatório das potências ativas de iluminação, pontos de tomada e pontos específicos. Portanto:

$$P_{\text{ativa total}} = 620 + 3920 + 10800 = 15340 \text{ W}$$

Com base no valor obtido, deve-se consultar a concessionária para verificar o tipo de fornecimento e a tensão do padrão de entrada a considerar. No caso da AES, as modalidades de fornecimento, de acordo com os sistemas delta e estrela, são:

- Até 5 kW (delta) e até 12 kW (estrela) – Modalidade A – Fornecimento monofásico: feito a dois fios (uma fase e um neutro).
- Acima de 5 kW (delta) e até 20 kW (estrela) – Modalidade B – Fornecimento bifásico: feito a três fios (duas fases e um neutro).
- Acima de 20 kW (estrela – aéreo ou subterrâneo) e no delta somente quando houver equipamento trifásico, motores ou aparelhos – Modalidade C – Fornecimento trifásico: feito a quatro fios (três fases e um neutro).

Em nosso exemplo, como $P_{\text{ativa total}} = 15340 \text{ W}$, a modalidade de fornecimento é a B.

Com relação ao nível de tensão de distribuição secundária, observam-se os seguintes valores nominais, conforme configuração do secundário do transformador de distribuição da região:

- 127/220 V: para o secundário em estrela aterrado (valores de fase e de linha).
- 115/230 V: para o secundário em delta aberto ou delta fechado (delta com neutro), utilizado pela Eletropaulo (valor entre fase e neutro e entre fases).
- 220 V: para secundário em estrela isolado, utilizado pela Eletropaulo no suprimento de alguns municípios, como Santos e Cubatão.
- Na zona subterrânea de distribuição da AES, os níveis padronizados são de 120/208 V (valores de fase e de linha).

Os valores das tensões dependem do sistema de fornecimento da região. Esse dimensionamento é fornecido pela concessionária de energia elétrica, por isso o profissional deve ficar atento às condições exigidas pela concessionária local para satisfazer os critérios técnicos impostos por ela em relação às especificações dos componentes da instalação de entrada (cabos elétricos, eletrodutos, poste, disjuntor e caixa de medição). Em nosso exemplo, consideram-se as informações da CPFL (ver figura 3.2 e tabela 3.4).

Antes de realizar o dimensionamento dos condutores alimentadores e respectivos dispositivos de proteção, é preciso entender alguns conceitos:

- **Demanda** – É a potência elétrica, em kW, requisitada por determinada carga instalada.
- **Potência instalada** – É a soma das potências nominais de todos os aparelhos que compõem uma instalação ou sistema.

- **Potência de demanda, potência de alimentação ou provável demanda** – É a máxima demanda instalada aplicada a seu respectivo fator de demanda (tabelas 3.9 e 3.10).

Potências de iluminação e Σ PI (W)				FD	
1 000	<	PI	≤	2 000	0,75
2 000	<	PI	≤	3 000	0,66
3 000	<	PI	≤	4 000	0,59
4 000	<	PI	≤	5 000	0,52
5 000	<	PI	≤	6 000	0,45
6 000	<	PI	≤	7 000	0,40
7 000	<	PI	≤	8 000	0,35
8 000	<	PI	≤	9 000	0,31
9 000	<	PI	≤	10 000	0,27
10 000	<	PI			0,24

Tabela 3.9

Fator de demanda (FD) para Σ potência de iluminação e pontos de tomada.

Nº de circuitos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
FD	1,00	1,00	0,84	0,76	0,70	0,65	0,60	0,57	0,54	0,52	0,49	0,48

Tabela 3.10

Fator de demanda (FD) para potência dos pontos de utilização (específicos).

Apenas para o caso de residências individuais aplicam-se os valores da tabela 3.9, usados para determinação do fator de demanda de cargas de iluminação e pontos de tomada. Assim, a provável demanda é calculada por:

$$PD = (g \cdot P_1) + P_2 \quad (3.1)$$

em que:

- PD é a provável demanda, potência de alimentação ou potência de demanda.
- P_1 , o somatório das potências nominais atribuídas aos pontos de tomadas + iluminação (W).
- P_2 , o somatório das potências nominais atribuídas aos pontos de utilização (W).
- g, o fator de demanda conforme a tabela 3.9, entrando com P_1 na tabela.



Em nosso exemplo, temos:

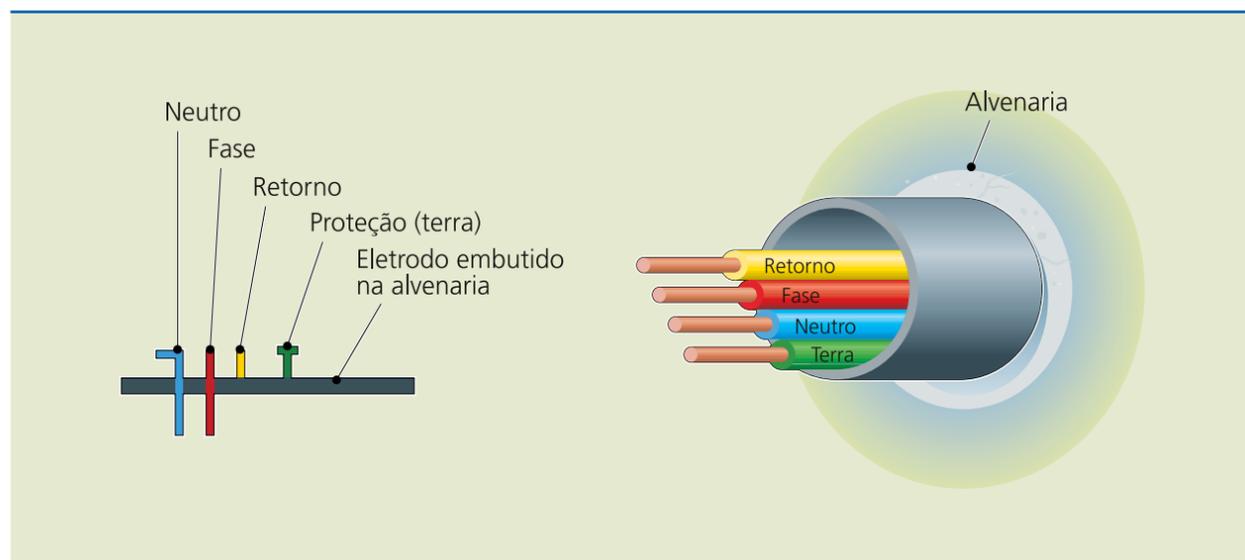
- $P_1 = 620 + 3920 = 4540 \text{ W}$; pela tabela 3.9, $g = 0,52$.
- $P_2 = 6400 + 4400 = 10800 \text{ W}$; pela tabela 3.10, $g = 1,00$ (corresponde a dois pontos: chuveiro e torneira elétricos).

Então:

$$PD = (0,52 \cdot 4540) + 10800 = 2360,80 + 10800 = 13160,80 \text{ W}$$

Portanto, a provável demanda é 13 160,80 W. Esse é o valor usado para dimensionar os condutores do circuito de distribuição (condutores que interligam o quadro de medição ao quadro de distribuição) aplicando o fator de utilização, que é estabelecido em 0,95 (figura 3.4).

Figura 3.4
Condutores elétricos em eletroduto fechado.



O dimensionamento dos condutores é uma etapa muito importante. Para isso, é necessário calcular a seção nominal capaz de permitir a passagem da corrente elétrica sem que ocorra aquecimento excessivo e que siga a tensão determinada nas normas específicas.

Segundo a norma NBR5410:2004, item 6.2.6.1.2, os condutores devem atender aos seguintes critérios:

- capacidade de condução de corrente dos condutores igual ou superior à corrente de projeto do circuito, incluindo as componentes harmônicas, afetadas dos fatores de correção aplicáveis (fator de correção de temperatura e fator de correção de agrupamento);
- proteção contra sobrecarga;
- proteção contra curto-circuito e solitação térmica;

d) proteção contra choques elétricos por seccionamento automático dos esquemas de aterramento TN e IT, quando pertinente;

e) limites de queda de tensão;

f) seções mínimas conforme mostra a tabela 3.11.

Tabela 3.11

Seção mínima dos condutores de cobre (Cu) e alumínio (Al) ditada por razões mecânicas (tabela 47 da norma NBR 5410:2004).

Tipo de linha		Utilização do circuito	Seção mínima do condutor (mm ² – material)
Instalações fixas em geral	Condutores e cabos isolados	Circuitos de iluminação	1,5 Cu 16 Al
		Circuitos de força ⁽¹⁾	2,5 Cu 16 Al
		Circuitos de sinalização e circuitos de controle	0,5 Cu ⁽²⁾
	Condutores nus	Circuitos de força	10 Cu 16 Al
		Circuitos de sinalização e circuitos de controle	4 Cu
Linhas flexíveis com cabos isolados		Para um equipamento específico	Como especificado na norma do equipamento
		Para qualquer outra aplicação	0,75 Cu ⁽³⁾
		Circuitos a extra baixa tensão para aplicações especiais	0,75 Cu

(1) Os circuitos de tomadas de corrente são considerados circuitos de força.

(2) Em circuitos de sinalização e controle destinados a equipamentos eletrônicos, é admitida uma seção mínima de 0,1 mm².

(3) Em cabos multipolares flexíveis com sete ou mais veias, é admitida uma seção mínima de 0,1 mm².

Os condutores utilizados em uma instalação residencial devem ser dimensionados levando em conta: a máxima capacidade de condução de corrente elétrica, o limite da queda de tensão admissível, a sobrecarga e o curto-circuito.

A norma NBR5410:2004, item 6.2.5, fornece uma série de recomendações para proteger os condutores e suas isolações submetidos aos efeitos térmicos produzidos pela circulação de corrente.

Em instalações elétricas residenciais, normalmente, a distância entre o quadro medidor e o quadro de distribuição, assim como do quadro de distribuição até a carga, é pequena. Isso significa que o critério de limite da queda de tensão não é determinante no dimensionamento desses condutores. No entanto, caso a distância seja grande, como em instalações prediais e industriais, é preciso



considerar os limites admissíveis de queda de tensão e dimensioná-los de acordo com a norma NBR 5410:2004.

A queda de tensão verificada em ponto de utilização da instalação não deve ser superior aos seguintes valores, dados em relação ao valor da tensão nominal da instalação (NBR 5410:2004, item 6.2.7):

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;

e) 4%, calculados nos circuitos terminais.

Como vimos, existem limitações quanto à temperatura de trabalho dos condutores. A tabela 3.12 apresenta essas limitações de acordo com o tipo de isolamento do condutor.

Tabela 3.12

Temperaturas características dos condutores (tabela 35 da norma NBR 5410:2004).

Fonte: ABNT

Tipo de isolamento	Temperatura máxima para serviço contínuo – condutor (°C)	Temperatura limite de sobrecarga – condutor (°C)	Temperatura limite de curto-circuito – condutor (°C)
Policloreto de vinila (PVC) até 300 mm ²	70	100	160
Policloreto de vinila (PVC) maior que 300 mm ²	70	100	140
Borracha etileno-propileno (EPR)	90	130	250
Polietileno reticulado (XLPE)	90	130	250

Outra questão importante é o método de instalação do condutor, pois isso influencia a troca térmica entre os condutores e o ambiente e, conseqüentemente, a capacidade de condução de corrente do condutor.

Os métodos de instalação do condutor, também denominados métodos de referência, são os seguintes (NBR 5410:2004, item 6.2.5.1.2):

- A1: condutores isolados em eletroduto de seção circular embutido em parede termicamente isolante.
- A2: cabo multipolar em eletroduto de seção circular embutido em parede termicamente isolante.
- B1: condutores isolados em eletroduto de seção circular sobre parede de madeira.
- B2: cabo multipolar em eletroduto de seção circular sobre parede de madeira.
- C: cabos unipolares ou cabo multipolar sobre parede de madeira.
- D: cabo multipolar em eletroduto enterrado no solo.
- E: cabo multipolar ao ar livre.
- F: cabos unipolares justapostos (na horizontal, na vertical ou em trifólio) ao ar livre.
- G: cabos unipolares espaçados ao ar livre.

Vale observar que:

1. Nos métodos A1 e A2, a parede é formada por uma face externa estanque, isolamento térmica e uma face interna em madeira ou material análogo com condutância térmica de no mínimo 10 W/m² · K. O eletroduto, metálico ou de plástico, é fixado junto à face interna (não necessariamente em contato físico com ela).

2. Nos métodos B1 e B2, o eletroduto, metálico ou de plástico, é montado sobre uma parede de madeira, sendo a distância entre o eletroduto e a superfície da parede inferior a 0,3 vez o diâmetro do eletroduto.

3. No método C, a distância entre o cabo multipolar, ou qualquer cabo unipolar, e a parede de madeira é inferior a 0,3 vez o diâmetro do cabo.

4. No método D, o cabo é instalado em eletroduto (seja metálico, de plástico ou de barro) enterrado em solo com resistividade térmica de 2,5 K · m/W, a uma profundidade de 0,7 m.

5. Nos métodos E, F e G, a distância entre o cabo multipolar, ou qualquer cabo unipolar, e qualquer superfície adjacente é de no mínimo 0,3 vez o diâmetro externo do cabo, para o cabo multipolar, ou no mínimo uma vez o diâmetro do cabo, para os cabos unipolares.

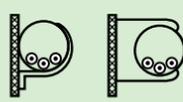
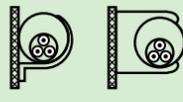
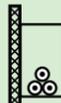
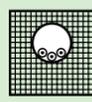
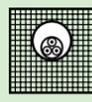
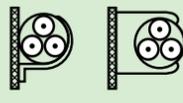
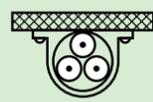
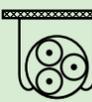
6. No método G, o espaçamento entre os cabos unipolares é de no mínimo uma vez o diâmetro externo do cabo.

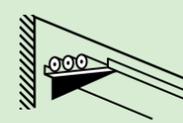
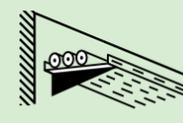
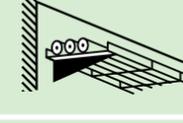
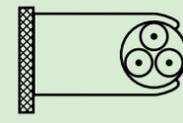
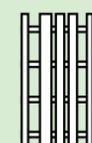
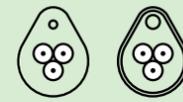
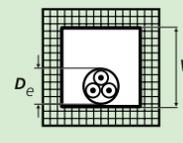
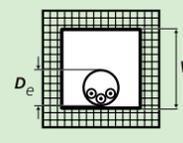
Esses métodos de instalação são indicados pela norma IEC 60364-5-52, para os quais a capacidade de condução de corrente elétrica foi determinada por ensaio ou cálculo. Para obter a capacidade de condução de corrente, é preciso saber o método de referência no qual se enquadra o método de instalação, como mostra a tabela 3.13.



Tabela 3.13

Tipos de linhas elétricas (tabela 33 da norma NBR 5410:2004). Fonte: ABNT

Método de instalação número	Esquema ilustrativo	Descrição	Métodos de referência ⁽¹⁾
1	 Face interna	Condutores isolados ou cabos unipolares em eletroduto de seção circular embutido em parede termicamente isolante ⁽²⁾	A1
2	 Face interna	Cabo multipolar em eletroduto de seção circular embutido em parede termicamente isolante ⁽²⁾	A2
3		Condutores isolados ou cabos unipolares em eletroduto aparente de seção circular sobre parede ou espaçado desta menos de 0,3 vez o diâmetro do eletroduto	B1
4		Cabo multipolar em eletroduto aparente de seção circular sobre parede ou espaçado desta menos de 0,3 vez o diâmetro do eletroduto	B2
5		Condutores isolados ou cabos unipolares em eletroduto aparente de seção não circular sobre parede	B1
6		Cabo multipolar em eletroduto aparente de seção não circular sobre parede	B2
7		Condutores isolados ou cabos unipolares em eletroduto de seção circular embutido em alvenaria	B1
8		Cabo multipolar em eletroduto de seção circular embutido em alvenaria	B2
11		Cabos unipolares ou cabo multipolar sobre parede ou espaçado desta menos de 0,3 vez o diâmetro do cabo	C
11A		Cabos unipolares ou cabo multipolar fixado diretamente no teto	C
11B		Cabos unipolares ou cabo multipolar afastado do teto mais de 0,3 vez o diâmetro do cabo	C

Método de instalação número	Esquema ilustrativo	Descrição	Métodos de referência ⁽¹⁾
12		Cabos unipolares ou cabo multipolar em bandeja não perfurada, perfilado ou prateleira ⁽³⁾	C
13		Cabos unipolares ou cabo multipolar em bandeja perfurada, horizontal ou vertical ⁽⁴⁾	E (multipolar) F (unipolares)
14		Cabos unipolares ou cabo multipolar sobre suportes horizontais, eletrocalha amamada ou tela	E (multipolar) F (unipolares)
15		Cabos unipolares ou cabo multipolar afastado(s) da parede mais de 0,3 vez o diâmetro do cabo	E (multipolar) F (unipolares)
16		Cabos unipolares ou cabo multipolar em leito	E (multipolar) F (unipolares)
17		Cabos unipolares ou cabo multipolar suspenso(s) por cabo de suporte, incorporado ou não	E (multipolar) F (unipolares)
18		Condutores nus ou isolados sobre isoladores	G
21		Cabos unipolares ou cabos multipolares em espaço de construção ⁽⁵⁾ , sejam eles lançados diretamente sobre a superfície do espaço de construção, sejam instalados em suportes ou condutos abertos (bandeja, prateleira, tela ou leito) dispostos no espaço de construção ⁽⁵⁾⁽⁶⁾	$1,5 D_e \leq V < 5 D_e$ B2 $5 D_e \leq V < 50 D_e$ B1
22		Condutores isolados em eletroduto de seção circular em espaço de construção ⁽⁵⁾⁽⁷⁾	$1,5 D_e \leq V < 20 D_e$ B2 $V \geq 20 D_e$ B1
23		Cabos unipolares ou cabo multipolar em eletroduto de seção circular em espaço de construção ⁽⁵⁾⁽⁷⁾	B2



Método de instalação número	Esquema ilustrativo	Descrição	Métodos de referência ⁽¹⁾
24		Condutores isolados em eletroduto de seção não circular ou eletrocalha em espaço de construção ⁽⁵⁾	$1,5 D_e \leq V < 20 D_e$ B2 $V \geq 20 D_e$ B1
25		Cabos unipolares ou cabo multipolar em eletroduto de seção não circular ou eletrocalha em espaço de construção ⁽⁵⁾	B2
26		Condutores isolados em eletroduto de seção não circular embutido em alvenaria ⁽⁶⁾	$1,5 \leq V < 5 D_e$ B2 $5 D_e \leq V < 50 D_e$ B1
27		Cabos unipolares ou cabo multipolar em eletroduto de seção não circular embutido em alvenaria	B2
31 32		Condutores isolados ou cabos unipolares em eletrocalha sobre parede em percurso horizontal e vertical	B1
31A 32A		Cabo multipolar em eletrocalha sobre parede em percurso horizontal e vertical	B2
33		Condutores isolados ou cabos unipolares em canaleta fechada embutida no piso	B1
34		Cabo multipolar em canaleta fechada embutida no piso	B2
35		Condutores isolados ou cabos unipolares em eletrocalha ou perfilado suspensa(o)	B1
36		Cabo multipolar em eletrocalha ou perfilado suspensa(o)	B2

Método de instalação número	Esquema ilustrativo	Descrição	Métodos de referência ⁽¹⁾
41		Condutores isolados ou cabos unipolares em eletroduto de seção circular contido em canaleta fechada com percurso horizontal e vertical ⁽⁷⁾	$1,5 D_e \leq V < 20 D_e$ B2 $V \geq 20 D_e$ B1
42		Condutores isolados em eletroduto de seção circular contido em canaleta ventilada embutida no piso	B1
43		Cabos unipolares ou cabo multipolar em canaleta ventilada embutida no piso	B1
51		Cabo multipolar embutido diretamente em parede termicamente isolante ⁽²⁾	A1
52		Cabos unipolares ou cabo multipolar embutido(s) diretamente em alvenaria sem proteção mecânica adicional	C
53		Cabos unipolares ou cabo multipolar embutido(s) diretamente em alvenaria com proteção mecânica adicional	C
61		Cabo multipolar em eletrodo (de seção circular ou não) ou em canaleta não ventilada enterrado(a)	D
61A		Cabos unipolares em eletrodo (de seção não circular ou não) ou em canaleta não ventilada enterrado(a) ⁽⁸⁾	D
63		Cabos unipolares ou cabo multipolar diretamente enterrado(s), com proteção mecânica adicional ⁽⁹⁾	D
71		Condutores isolados ou cabos unipolares em moldura	A1



Método de instalação número	Esquema ilustrativo	Descrição	Métodos de referência ⁽¹⁾
72 72A		72 – Condutores isolados ou cabos unipolares em canaleta provida de separações sobre parede 72A – Cabo multipolar em canaleta provida de separações sobre parede	B1 B2
73		Condutores isolados em eletroduto, cabos unipolares ou cabo multipolar embutido(s) em caixilho de porta	A1
74		Condutores isolados em eletroduto, cabos unipolares ou cabo multipolar embutido(s) em caixilho de janela	A1
75 75A		75 – Condutores isolados ou cabos unipolares em canaleta embutida em parede 75A – Cabo multipolar em canaleta embutida em parede	B1 B2

- (1) Método de referência a ser utilizado na determinação da capacidade de condução de corrente.
- (2) O revestimento da parede possui condutância térmica de no mínimo 10 W/m² · K.
- (3) Admitem-se também condutores isolados em perfilados, desde que sejam obedecidos os preceitos do item 6.2.11.4.1 da norma NBR 5410:2004:
 “Nas canaletas instaladas sobre paredes, em tetos ou suspensas e nos perfilados, podem ser instalados condutores isolados, cabos unipolares e cabos multipolares. Os condutores isolados só podem ser utilizados em canaletas ou perfilados de paredes não perfuradas e com tampas que só possam ser removidas com auxílio de ferramenta.
- NOTA: Admite-se o uso de condutores isolados em canaletas ou perfilados, sem tampa ou com tampa, desmontável sem auxílio de ferramenta, ou em canaletas ou perfilados com paredes perfuradas, com ou sem tampa, desde que estes condutos:
 a) sejam instalados em locais só acessíveis a pessoas advertidas (BA4) ou qualificadas (BA5), conforme tabela 18 [da norma NBR 5410:2004; aqui, tabela 3.14]; ou
 b) sejam instalados a uma altura mínima de 2,50 m do piso.”
- (4) A capacidade da condução de corrente para bandeja perfurada foi determinada considerando que os furos ocupassem no mínimo 30% da área da bandeja. Se os furos ocuparem menos de 30% da área da bandeja, ela deve ser considerada “não perfurada”.
- (5) Conforme ABNT IEC 60050 (826), poços, galerias, pisos técnicos, condutos formados por blocos alveolados, forros falsos, pisos elevados e espaços internos existentes em certos tipos de divisórias (como as paredes de gesso acartonado) são considerados espaços de construção.
- (6) D_e é o diâmetro externo do cabo, no caso de cabo multipolar. Para cabos unipolares ou condutores isolados, distinguem-se duas situações:
 a) três cabos unipolares (ou condutores isolados) dispostos em trifólio: D_e deve ser igual a 2,2 vezes o diâmetro do cabo unipolar ou condutor isolado;
 b) três cabos unipolares (ou condutores isolados) agrupados em um mesmo plano: D_e deve ser igual a três vezes o diâmetro do cabo unipolar ou condutor isolado.
- (7) D_e é o diâmetro externo do eletroduto de seção circular ou a altura/profundidade do eletroduto de seção não circular ou da eletrocalha.
- (8) Admite-se o uso de condutores isolados em eletroduto enterrado se, no trecho enterrado, não houver nenhuma caixa de passagem e/ou derivação enterrada e for garantida a estanqueidade do eletroduto (nota do item 6.2.11.6.1 da norma NBR 5410:2004).
- (9) Admitem-se cabos diretamente enterrados sem proteção mecânica adicional, desde que esses cabos sejam providos de armação (ver o item 6.2.11.6 da norma NBR 5410:2004).

Código	Classificação	Características	Aplicações e exemplos
BA1	Comuns	Pessoas inadvertidas	–
BA2	Crianças	Crianças em locais a elas destinados*	Creches, escolas
BA3	Incapacitadas	Pessoas que não dispõem de completa capacidade física ou intelectual (idosos, doentes)	Casas de repouso, unidades de saúde
BA4	Advertidas	Pessoas suficientemente informadas ou supervisionadas por pessoas qualificadas, de tal forma que lhes permite evitar os perigos da eletricidade (pessoal de manutenção e/ou operação)	Locais de serviço elétrico
BA5	Qualificadas	Pessoas com conhecimento técnico ou experiência tal que lhes permite evitar os perigos da eletricidade (engenheiros e técnicos)	Locais de serviço elétrico fechados

* Esta classificação não se aplica necessariamente a locais de habitação.

Considerando ainda o dimensionamento do condutor, deve-se ficar atento ao posicionamento dos condutores nos eletrodutos. Caso haja excesso de circuitos de cabos dentro dos eletrodutos, ocorrerá elevação de corrente nos circuitos ou nos cabos multipolares. A tabela 3.15 apresenta o fator de correção da corrente de cada circuito ou cabo multipolar.

Ref.	Forma de agrupamento dos condutores	Número de circuitos ou de cabos multipolares												Tabelas dos métodos de referência
		1	2	3	4	5	6	7	8	9 a 11	12 a 15	16 a 19	≥ 20	
1	Em feixe: ao ar livre ou sobre superfície; embutidos; em conduto fechado	1,00	0,80	0,70	0,65	0,60	0,57	0,54	0,52	0,50	0,45	0,41	0,38	3.16 a 3.19 (métodos A a F)
2	Camada única sobre parede, piso ou em bandeja não perfurada ou prateleira	1,00	0,85	0,79	0,75	0,73	0,72	0,72	0,71	0,70				3.16 e 3.17 (método C)
3	Camada única no teto	0,95	0,81	0,72	0,68	0,66	0,64	0,63	0,62	0,61				

Tabela 3.14

Competência das pessoas (tabela 18 da norma NBR 5410:2004).

Tabela 3.15

Fator de agrupamento (tabela 42 da norma NBR 5410:2004).

Fonte: ABNT



Ref.	Forma de agrupamento dos condutores	Número de circuitos ou de cabos multipolares												Tabelas dos métodos de referência
		1	2	3	4	5	6	7	8	9 a 11	12 a 15	16 a 19	≥ 20	
4	Camada única em bandeja perfurada	1,00	0,88	0,82	0,77	0,75	0,73	0,73	0,72	0,72				3.18 e 3.19 (métodos E e F)
5	Camada única sobre leito, suporte etc.	1,00	0,87	0,82	0,80	0,80	0,79	0,79	0,78	0,78				

Observações:

- Esses fatores são aplicáveis a grupos homogêneos de cabos, uniformemente carregados.
- Quando a distância horizontal entre cabos adjacentes for superior ao dobro de seu diâmetro externo, não é necessário aplicar nenhum fator de redução.
- O número de circuitos ou de cabos com o qual se consulta a tabela refere-se:
 - à quantidade de grupos de dois ou três condutores isolados ou cabos unipolares, cada grupo constituindo um circuito (supondo um só condutor por fase, isto é, sem condutores em paralelo), e/ou
 - à quantidade de cabos multipolares que compõem o agrupamento, qualquer que seja essa composição (só condutores isolados, só cabos unipolares, só cabos multipolares ou qualquer combinação).
- Se o agrupamento for constituído, ao mesmo tempo, de cabos bipolares e tripolares, deve-se considerar o número total de cabos como o número de circuitos e, de posse do fator de agrupamento resultante, a determinação das capacidades de condução de corrente, nas tabelas 3.16 a 3.19, deve ser efetuada:
 - na coluna de dois condutores carregados, para os cabos bipolares; e
 - na coluna de três condutores carregados, para os cabos tripolares.
- Um agrupamento com *n* condutores isolados, ou *n* cabos unipolares, pode ser considerado composto tanto de *n/2* circuitos com dois condutores carregados como de *n/3* circuitos com três condutores carregados.
- Os valores indicados são médios para a faixa usual de seções nominais, com dispersão geralmente inferior a 5%.

Dando continuidade ao dimensionamento dos condutores, as tabelas de 3.16 a 3.19 indicam a máxima capacidade de condução de corrente dos condutores de alumínio e cobre, e a tabela 3.20, o número de condutores carregados a ser considerado, em função do tipo de circuito utilizado na instalação. **Condutores:** cobre e alumínio

Isolação: PVC

Temperatura no condutor: 70 °C

Temperaturas de referência do ambiente: 30 °C (ar), 20 °C (solo)

Seções nominais (mm ²)	Métodos de referência indicados na tabela 3.13											
	A1		A2		B1		B2		C		D	
	Número de condutores carregados											
	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
Cobre												
0,5	7	7	7	7	9	8	9	8	10	9	12	10
0,75	9	9	9	9	11	10	11	10	13	11	15	12
1	11	10	11	10	14	12	13	12	15	14	18	15
1,5	14,5	13,5	14	13	17,5	15,5	16,5	15	19,5	17,5	22	18
2,5	19,5	18	18,5	17,5	24	21	23	20	27	24	29	24
4	26	24	25	23	32	28	30	27	36	32	38	31
6	34	31	32	29	41	36	38	34	46	41	47	39
10	46	42	43	39	57	50	52	46	63	57	63	52
16	61	56	57	52	76	68	69	62	85	76	81	67
25	80	73	75	68	101	89	90	80	112	96	104	86
35	99	89	92	83	125	110	111	99	138	119	125	103
50	119	108	110	99	151	134	133	118	168	144	148	122
70	151	136	139	125	192	171	168	149	213	184	183	151
95	182	164	167	150	232	207	201	179	258	223	216	179
120	210	188	192	172	269	239	232	206	299	259	246	203
150	240	216	219	196	309	275	265	236	344	299	278	230
185	273	245	248	223	353	314	300	268	392	341	312	258
240	321	286	291	261	415	370	351	313	461	403	361	297
300	367	328	334	298	477	426	401	358	530	464	408	336
400	438	390	398	355	571	510	477	425	634	557	478	394
500	502	447	456	406	656	587	545	486	729	642	540	445

Tabela 3.16

Capacidades de condução de corrente elétrica, em amperes, para os métodos de referência A1, A2, B1, B2, C e D (tabela 37 da norma NBR 5410:2004). Fonte: ABNT



Seções nominais (mm ²)	Métodos de referência indicados na tabela 3.13											
	A1		A2		B1		B2		C		D	
	Número de condutores carregados											
	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3
630	578	514	526	467	758	678	626	559	843	743	614	506
800	669	593	609	540	881	788	723	645	978	865	700	577
1 000	767	679	698	618	1 012	906	827	738	1 125	996	792	652
Alumínio												
16	48	43	44	41	60	53	54	48	66	59	62	52
25	63	57	58	53	79	70	71	62	83	73	80	66
35	77	70	71	65	97	86	86	77	103	90	96	80
50	93	84	86	78	118	104	104	92	125	110	113	94
70	118	107	108	98	150	133	131	116	160	140	140	117
95	142	129	130	118	181	161	157	139	195	170	166	138
120	164	149	150	135	210	186	181	160	226	197	189	157
150	189	170	172	155	241	214	206	183	261	227	213	178
185	215	194	195	176	275	245	234	208	298	259	240	200
240	252	227	229	207	324	288	274	243	352	305	277	230
300	289	261	263	237	372	331	313	278	406	351	313	260
400	345	311	314	283	446	397	372	331	488	422	366	305
500	396	356	360	324	512	456	425	378	563	486	414	345
630	456	410	416	373	592	527	488	435	653	562	471	391
800	529	475	482	432	687	612	563	502	761	654	537	446
1 000	607	544	552	495	790	704	643	574	878	753	607	505

Condutores: cobre e alumínio

Isolação: EPR ou XLPE

Temperatura no condutor: 90 °C

Temperaturas de referência do ambiente: 30 °C (ar), 20 °C (solo)

Seções nominais (mm ²)	Métodos de referência indicados na tabela 3.13											
	A1		A2		B1		B2		C		D	
	Número de condutores carregados											
	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
Cobre												
0,5	10	9	10	9	12	10	11	10	12	11	14	12
0,75	12	11	12	11	15	13	15	13	16	14	18	15
1	15	13	14	13	18	16	17	15	19	17	21	17
1,5	19	17	18,5	16,5	23	20	22	19,5	24	22	26	22
2,5	26	23	25	22	31	28	30	26	33	30	34	29
4	35	31	33	30	42	37	40	35	45	40	44	37
6	45	40	42	38	54	48	51	44	58	52	56	46
10	61	54	57	51	75	66	69	60	80	71	73	61
16	81	73	76	68	100	88	91	80	107	96	95	79
25	106	95	99	89	133	117	119	105	138	119	121	101
35	131	117	121	109	164	144	146	128	171	147	146	122
50	158	141	145	130	198	175	175	154	209	179	173	144
70	200	179	183	164	253	222	221	194	269	229	213	178
95	241	216	220	197	306	269	265	233	328	278	252	211
120	278	249	253	227	354	312	305	268	382	322	287	240
150	318	285	290	259	407	358	349	307	441	371	324	271
185	362	324	329	295	464	408	395	348	506	424	363	304
240	424	380	386	346	546	481	462	407	599	500	419	351
300	486	435	442	396	628	553	529	465	693	576	474	396
400	579	519	527	472	751	661	628	552	835	692	555	464
500	664	595	604	541	864	760	718	631	966	797	627	525

Tabela 3.17

Capacidades de condução de corrente elétrica, em amperes, para os métodos de referência A1, A2, B1, B2, C e D (tabela 37 da norma NBR 5410:2004).

Fonte: ABNT



Seções nominais (mm ²)	Métodos de referência indicados na tabela 3.13											
	A1		A2		B1		B2		C		D	
	Número de condutores carregados											
	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3
630	765	685	696	623	998	879	825	725	1122	923	711	596
800	885	792	805	721	1158	1020	952	837	1311	1074	811	
1000	1014	908	923	826	1332	1173	1088	957	1515	1237	916	767
Alumínio												
16	64	58	60	55	79	71	72	64	84	76	73	61
25	84	76	78	71	105	93	94	84	101	90	93	78
35	103	94	96	87	130	116	115	103	126	112	112	94
50	125	113	115	104	157	140	138	124	154	136	132	112
70	158	142	145	131	200	179	175	156	198	174	163	138
95	191	171	175	157	242	217	210	188	241	211	193	164
120	220	197	201	180	281	251	242	216	280	245	220	186
150	253	226	230	206	323	289	277	248	324	283	249	210
185	288	256	262	233	368	330	314	281	371	323	279	236
240	338	300	307	273	433	389	368	329	439	382	322	272
300	387	344	352	313	499	447	421	377	508	440	364	308
400	462	409	421	372	597	536	500	448	612	529	426	361
500	530	468	483	426	687	617	573	513	707	610	482	408
630	611	538	556	490	794	714	658	590	821	707	547	464
800	708	622	644	566	922	830	760	682	958	824	624	529
1000	812	712	739	648	1061	955	870	780	1108	950	706	598

Condutores: cobre e alumínio

Isolação: PVC

Temperatura no condutor: 70 °C

Temperaturas de referência do ambiente: 30 °C

Tabela 3.18

Capacidades de condução de corrente elétrica, em amperes, para os métodos de referência E, F e G (tabela 38 da norma NBR5410:2004).

Fonte: ABNT

Seções nominais (mm ²)	Métodos de referência indicados na tabela 3.13						
	Cabos multipolares			Cabos unipolares(I)			
	Dois condutores carregados	Três condutores carregados	Dois condutores carregados, justapostos	Três condutores carregados, em trifólio	Justapostos	Três condutores carregados, no mesmo plano	
						Espaçados	
Método E	Método E	Método F	Método F	Método F	Método G	Método G	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
Cobre							
0,5	11	9	11	8	9	12	10
0,75	14	12	14	11	11	16	13
1	17	14	17	13	14	19	16
1,5	22	18,5	22	17	18	24	21
2,5	30	25	31	24	25	34	29
4	40	34	41	33	34	45	39
6	51	43	53	43	45	59	51
10	70	60	73	60	63	81	71
16	94	80	99	82	85	110	97
25	119	101	131	110	114	146	130
35	148	126	162	137	143	181	162
50	180	153	196	167	174	219	197
70	232	196	251	216	225	281	254



Seções nominais (mm ²)	Métodos de referência indicados na tabela 3.13						
	Cabos multipolares		Cabos unipolares(I)				
	Dois condutores carregados	Três condutores carregados	Dois condutores carregados, justapostos	Três condutores carregados, em trifólio	Três condutores carregados, no mesmo plano		
					Justapostos	Espaçados	
						Horizontal	Vertical
Método E	Método E	Método F	Método F	Método F	Método G	Método G	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
95	282	238	304	264	275	341	311
120	328	276	352	308	321	396	362
150	379	319	406	356	372	456	419
185	434	364	463	409	427	521	480
240	514	430	546	485	507	615	569
300	593	497	629	561	587	709	659
400	715	597	754	656	689	852	795
500	826	689	868	749	789	982	920
630	958	798	1 005	855	905	1 138	1 070
800	1 118	930	1 169	971	1 119	1 325	1 251
1 000	1 292	1 073	1 346	1 079	1 296	1 528	1 448
Alumínio							
16	73	61	73	62	65	84	73
25	89	78	98	84	87	112	99
35	111	96	122	105	109	139	124
50	135	117	149	128	133	169	152
70	173	150	192	166	173	217	196

Seções nominais (mm ²)	Métodos de referência indicados na tabela 3.13						
	Cabos multipolares		Cabos unipolares(I)				
	Dois condutores carregados	Três condutores carregados	Dois condutores carregados, justapostos	Três condutores carregados, em trifólio	Três condutores carregados, no mesmo plano		
					Justapostos	Espaçados	
						Horizontal	Vertical
Método E	Método E	Método F	Método F	Método F	Método G	Método G	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
95	210	183	235	203	212	265	241
120	244	212	273	237	247	308	282
150	282	245	316	274	287	356	327
185	322	280	363	315	330	407	376
240	380	330	430	375	392	482	447
300	439	381	497	434	455	557	519
400	528	458	600	526	552	671	629
500	608	528	694	610	640	775	730
630	705	613	808	711	640	775	730
800	822	714	944	832	875	1 050	1 000
1 000	948	823	1 092	965	1 015	1 213	1 161

(I) Ou, ainda, condutores isolados, quando o método de instalação permitir.



Condutores: cobre e alumínio

Isolação: EPR ou XLPE

Temperatura no condutor: 90 °C

Temperaturas de referência do ambiente: 30 °C

Tabela 3.19

Capacidades de condução de corrente

elétrica, em amperes, para os métodos de referência E, F e G (tabela 38 da norma NBR 5410:2004). Fonte: ABNT

Seções nominais (mm ²)	Métodos de referência indicados na tabela 3.13						
	Cabos multipolares		Cabos unipolares(I)				
	Dois condutores carregados	Três condutores carregados	Dois condutores carregados, justapostos	Três condutores carregados, em trifólio	Três condutores carregados, no mesmo plano		
					Justapostos	Espaçados	
	Método E	Método E	Método F	Método F		Método F	Horizontal
					Método G		Método G
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
Cobre							
0,5	13	12	13	10	10	15	12
0,75	17	15	17	13	14	19	16
1	21	18	21	16	17	23	19
1,5	26	23	27	21	22	30	25
2,5	36	32	37	29	30	41	35
4	49	42	50	40	42	56	48
6	63	54	65	53	55	73	63
10	86	75	90	74	77	101	88
16	115	100	121	101	105	137	120
25	149	127	161	135	141	182	161
35	185	158	200	169	176	226	201
50	225	192	242	207	216	275	246

Seções nominais (mm ²)	Métodos de referência indicados na tabela 3.13						
	Cabos multipolares		Cabos unipolares(I)				
	Dois condutores carregados	Três condutores carregados	Dois condutores carregados, justapostos	Três condutores carregados, em trifólio	Três condutores carregados, no mesmo plano		
					Justapostos	Espaçados	
	Método E	Método E	Método F	Método F		Método F	Horizontal
					Método G		Método G
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
Alumínio							
16	91	77	90	76	79	103	90
25	108	97	121	103	107	138	122
35	135	120	150	129	135	172	153
50	164	146	184	159	165	210	188



Seções nominais (mm ²)	Métodos de referência indicados na tabela 3.13						
	Cabos multipolares		Cabos unipolares(I)				
	Dois condutores carregados	Três condutores carregados	Dois condutores carregados, justapostos	Três condutores carregados, em trifólio	Três condutores carregados, no mesmo plano		
					Justapostos	Espaçados	
						Horizontal	Vertical
	Método E	Método E	Método F	Método F	Método F	Método G	Método G
							D_e
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
70	211	187	237	206	215	271	244
95	257	227	289	253	264	332	300
120	300	263	337	296	308	387	351
150	346	304	389	343	358	448	408
185	397	347	447	395	413	515	470
240	470	409	530	471	492	611	561
300	543	471	613	547	571	708	652
400	654	566	740	663	694	856	792
500	756	652	856	770	806	991	921
630	879	755	996	899	942	1154	1077
800	1026	879	1164	1056	1106	1351	1266
1000	1186	1012	1347	1226	1285	1565	1472

(I) Ou, ainda, condutores isolados, quando o método de instalação permitir.

Esquema de condutores vivos do circuito	Número de condutores carregados a ser adotado
Monofásico a dois condutores	2
Monofásico a três condutores	2
Duas fases sem neutro	2
Duas fases com neutro	3
Trifásico sem neutro	3
Trifásico com neutro	3 ou 4 ⁽¹⁾

Como se pode observar, as tabelas 3.16 a 3.19 trazem colunas para dois e três condutores carregados, mas nenhuma para quatro condutores carregados. Por isso, a determinação da capacidade de condução de corrente para quatro condutores carregados deve ser feita aplicando o fator de 0,86 às capacidades de condução de corrente válidas para três condutores carregados – sem prejuízo dos demais fatores de correção eventualmente aplicáveis, como os referentes a temperatura ambiente, resistividade térmica do solo e agrupamento de circuitos.

As tabelas 3.21 e 3.22 apresentam os fatores de correção de corrente dos circuitos para temperaturas diferentes da temperatura do local instalado.

Temperatura (°C)	Isolação	
	PVC	EPR ou XLPE
10	1,22	1,15
15	1,17	1,12
20	1,12	1,08
25	1,06	1,04
35	0,94	0,96
40	0,87	0,91
45	0,79	0,87
50	0,71	0,82
55	0,61	0,76
60	0,50	0,71

Tabela 3.20

Número de condutores carregados a ser considerado, em função do tipo de circuito (tabela 46 da norma NBR5410:2004).

Tabela 3.21

Fatores de correção para temperaturas diferentes de 30 °C para linhas não subterrâneas.



Temperatura (°C)	Isolação	
	PVC	EPR ou XLPE
65	–	0,65
70	–	0,58
75	–	0,50
80	–	0,41

Ao dimensionar inicialmente o condutor de cada circuito, o que se determina é a seção nominal do condutor de fase. Assim, para dimensionar o condutor neutro pertencente ao circuito, utiliza-se a tabela 3.23.

Seção dos condutores de fase (mm ²)	Seção reduzida do condutor neutro (mm ²)
$S \leq 25$	S
35	25
50	25
70	35
95	50
120	70
150	70
185	95
240	120
300	150
400	185

Tabela 3.23

Seção reduzida do condutor neutro.

Tabela 3.22
Fatores de correção para temperaturas diferentes de 20°C (temperatura do solo) para linhas subterrâneas.

Temperatura (°C)	Isolação	
	PVC	EPR ou XLPE
10	1,10	1,07
15	1,05	1,04
25	0,95	0,96
30	0,89	0,93
35	0,84	0,89
40	0,77	0,85
45	0,71	0,80
50	0,63	0,76
55	0,55	0,71
60	0,45	0,65
65	–	0,60
70	–	0,53
75	–	0,46
80	–	0,38

Para dimensionar o condutor de proteção, consulta-se a tabela 3.24. Essa tabela só é válida quando o condutor de proteção é constituído do mesmo metal dos condutores de fase; caso contrário, deve-se seguir a determinação da norma IEC 60364-5-54.

Seção dos condutores de fase (mm ²)	Seção mínima do condutor de proteção correspondente (mm ²)
$S \leq 16$	S
$16 < S \leq 35$	16
$S > 35$	S/2

Tabela 3.24

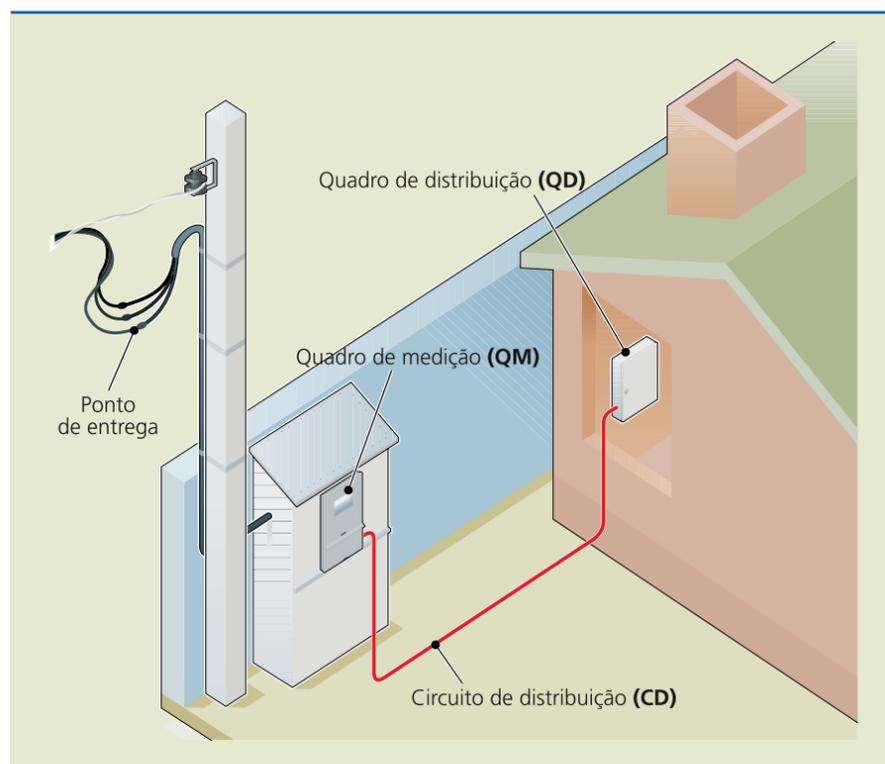
Seção mínima do condutor de proteção (tabela 58 da norma NBR 5410:2004).
Fonte: ABNT

Nas tabelas 3.21 e 3.22, não aparecem as temperaturas de 30 °C e 20 °C, respectivamente, porque são consideradas temperaturas ambientes. Nesses casos, o fator de correção é 1,0, não havendo, portanto, diferença de valor da corrente dos circuitos.

O quadro de distribuição (QD) é o centro de distribuição de toda a instalação elétrica, também designado conjunto de proteção, manobra e comando. Ele recebe os fios que vêm do quadro de medição (QM) e distribui a energia elétrica a um ou mais circuitos terminais. Portanto, o circuito de distribuição (CD) é o conjunto de componentes elétricos compreendidos entre os quadros de medição e de distribuição (figura 3.5).



Figura 3.5
Caminhamento do circuito de distribuição.



Conhecido como fator de utilização.

Para nosso exemplo, o cálculo da potência do circuito de distribuição (P_{CD}) é o seguinte:

$$P_{CD} = \text{provável demanda} \div 0,95$$

$$P_{CD} = 13\,160,80 \div 0,95$$

$$P_{CD} = 13\,853,47 \text{ W}$$

Sabendo que o sistema é bifásico (2F + 1N), a tensão do circuito de distribuição (V_{CD}) é igual a 220 V.

Portanto, a corrente é:

$$I_{CD} = P_{CD} / V_{CD}$$

$$I_{CD} = 13\,853,47 / 220$$

$$I_{CD} = 62,97 \text{ A}$$

3.1.2 Dimensionamento dos condutores do circuito de distribuição

O eletroduto que contém o circuito de distribuição é embutido em alvenaria. Os condutores são de cobre, conforme item 6.da NBR 5410:2004; só se admite o uso dos de alumínio nas condições estabelecidas nos itens 6.2.3.7.1 a 6.2.3.7.3,

com isolamento de PVC e à temperatura ambiente de 30 °C. Portanto, o fator de correção de temperatura (FCT) é igual a 1,0. Ressalte-se, novamente, que a temperatura de 30 °C não aparece na tabela 3.21 (parte dela reproduzida na tabela 3.25) porque é considerada temperatura ambiente e não influencia a corrente do circuito. Caso a temperatura seja diferente de 30 °C, é preciso corrigir a corrente do circuito dividindo-a pelo FCT indicado na tabela 3.21.

Temperatura (°C)	Isolação	
	PVC	EPR ou XLPE
10	1,22	1,15
15	1,17	1,12
20	1,12	1,08
25	1,06	1,04
35	0,94	0,96

Tabela 3.25

Reprodução de parte da tabela 3.21.

Na corrente do circuito de distribuição (I_{CD}), deve-se aplicar o fator de correção de agrupamento (FCA), conforme a tabela 3.15 (reproduzida parcialmente na tabela 3.26). Em nosso exemplo, o FCA é igual a 1,00, pois o circuito é único dentro do eletroduto.

Tabela 3.26

Reprodução de parte da tabela 3.15.

Ref.	Forma de agrupamento dos condutores	Número de circuitos ou de cabos multipolares												Tabelas dos métodos de referência
		1	2	3	4	5	6	7	8	9 a 11	12 a 15	16 a 19	≥20	
I	Em feixe: ao ar livre ou sobre superfície; embutidos; em conduto fechado	1,00	0,80	0,70	0,65	0,60	0,57	0,54	0,52	0,50	0,45	0,41	0,38	3.16 a 3.19 (métodos A a F)

Portanto, a corrente do circuito se manterá em 62,97 A, pois:

$$I_{CD\text{corrigida}} = I_{CD} / FCT \cdot FCA$$

$$I_{CD\text{corrigida}} = 62,97 / 1,0 \cdot 1,0$$

$$I_{CD\text{corrigida}} = 62,97 \text{ A}$$

Considerando o valor da corrente corrigida, consulta-se a tabela 3.13 (reproduzida parcialmente na tabela 3.27) para condutores de cobre, isolamento de PVC,



temperatura no condutor de 70 °C, temperaturas de referência do ambiente de 30 °C (ar) e 20 °C (solo), método de referência B1 (condutores isolados ou cabos unipolares em eletroduto de seção circular embutido em alvenaria) método de instalação 7 e três condutores carregados, conforme mostra a tabela 3.20 (parte dela reproduzida na tabela 3.28).

Tabela 3.27
Reprodução de parte da tabela 3.13.

Método de instalação número	Esquema ilustrativo	Descrição	Métodos de referência
7		Condutores isolados ou cabos unipolares em eletroduto de seção circular embutido em alvenaria	B1

Tabela 3.28
Reprodução de parte da tabela 3.20.

Esquema de condutores vivos do circuito	Número de condutores carregados a ser adotado
Duas fases com neutro	3

Tabela 3.29
Reprodução de parte da tabela 3.16.

Consultando a tabela 3.16 (reproduzida parcialmente na tabela 3.29), que mostra a máxima capacidade de condução de corrente no condutor, verifica-se que a corrente de 68 A satisfaz a corrente do projeto em estudo.

Seções nominais (mm ²)	Métodos de referência indicados na tabela 3.13											
	A1		A2		B1		B2		C		D	
	Número de condutores carregados											
	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
Cobre												
0,5	7	7	7	7	9	8	9	8	10	9	12	10
0,75	9	9	9	9	11	10	11	10	13	11	15	12
1	11	10	11	10	14	12	13	12	15	14	18	15
1,5	14,5	13,5	14	13	17,5	15,5	16,5	15	19,5	17,5	22	18
2,5	19,5	18	18,5	17,5	24	21	23	20	27	24	29	24

Seções nominais (mm ²)	Métodos de referência indicados na tabela 3.13											
	A1		A2		B1		B2		C		D	
	Número de condutores carregados											
	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
4	26	24	25	23	32	28	30	27	36	32	38	31
6	34	31	32	29	41	36	38	34	46	41	47	39
10	46	42	43	39	57	50	52	46	63	57	63	52
16	61	56	57	52	76	68	69	62	85	76	81	67
25	80	73	75	68	101	89	90	80	112	96	104	86

A seção nominal do condutor a ser utilizado para essa corrente é de 16 mm². Portanto, os condutores de fase do circuito de distribuição serão de 16 mm².

Para determinar o condutor neutro pertencente ao circuito, utiliza-se a tabela 3.23 (parte dela reproduzida na tabela 3.30).

Seção dos condutores de fase (mm ²)	Seção reduzida do condutor neutro (mm ²)
S ≤ 25	S

Tabela 3.30
Reprodução de parte da tabela 3.23.

Assim, a seção nominal do condutor neutro será também de 16 mm².

Para dimensionar o condutor de proteção, consulta-se a tabela 3.24 (reproduzida parcialmente na tabela 3.31). Vale lembrar que essa tabela só é válida quando o condutor de proteção é constituído do mesmo metal dos condutores de fase; caso contrário, deve-se seguir a determinação da norma IEC 60364-5-54.

Seção dos condutores de fase (mm ²)	Seção mínima do condutor de proteção correspondente (mm ²)
S ≤ 16	S

Tabela 3.31
Reprodução de parte da tabela 3.24.

Portanto, a seção nominal do condutor de proteção ou terra será também de 16 mm².



3.2 Divisão dos circuitos terminais

Utilizando os cálculos das potências feitos anteriormente, pode-se construir o quadro de previsão de cargas (tabela 3.32) e fazer a divisão de circuitos discriminando seu número, tipo, potência total por circuito e tensão nominal, considerando o exemplo de projeto residencial.

Tabela 3.32
Quadro de previsão de cargas.

Local	Circuito	Tipo	Potências		Tensão (V)
			Parcial	Total	
Sala Quarto Banheiro	1	Iluminação social	160 160 100	420 VA	127
Cozinha Área de serviço	2	Iluminação Serviço	100 100	200 VA	127
Sala Quarto Banheiro	3	Pontos de tomada	3 · 100 3 · 100 1 · 600	1 200 VA	127
Cozinha	4	Pontos de tomada	3 · 600 + 1 · 100	1 900 VA	127
Área de serviço	5	Pontos de tomada	3 · 600	1 800 VA	127
Chuveiro elétrico	6	Ponto específico	6 400	6 400 W	220
Torneira elétrica	7	Ponto específico	4 400	4 400 W	220
Circuito de distribuição	CD	–	13 853,47 W		220

Os critérios para a divisão da instalação em circuitos obedecem também à norma NBR 5410:2004:

- Devem ser previstos circuitos terminais distintos para pontos de iluminação e de tomada (item 4.2.5.5)
- Os pontos de tomada de cozinhas, copas e áreas de serviço devem ter circuitos terminais independentes (item 9.5.3.2).
- Equipamentos ou aparelhos que absorvam corrente igual ou superior a 10 A devem possuir pontos específicos (item 9.5.3.1).
- A potência dos circuitos, com exceção de circuitos exclusivos para pontos específicos, deve estar limitada a 1 200 VA em 127 V e 2 500 VA em 220 V.
- Em instalações com duas ou três fases, deve-se realizar o balanceamento de fases, também chamado balanceamento de cargas, ou seja, distribuir as cargas uniformemente entre as fases, de modo que se obtenha o maior equilíbrio possível (tabela 3.33).

Balanceamento de fases (potências)	
Fase 1	Fase 2
420	
220	
	1 200
1 900	
	1 800
3 200	3 200
2 200	2 200
7 940	8 400

Tabela 3.33
Balanceamento de fases.

Calculando a corrente de cada circuito ($I = P / V$), podem-se acrescentar os dados no quadro de previsão de cargas (tabela 3.34).

Tabela 3.34
Quadro de previsão de cargas com a corrente calculada dos circuitos.

Local	Circuito	Tipo	Potências		Tensão (V)	Corrente do circuito
			Parcial	Total		Calculada (A)
Sala Quarto Banheiro	1	Iluminação social	160 160 100	420 VA	127	3,31
Cozinha Área de serviço	2	Iluminação Serviço	100 100	200 VA	127	1,57
Sala Quarto Banheiro	3	Pontos de tomada	3 · 100 3 · 100 1 · 600	1 200 VA	127	9,45
Cozinha	4	Pontos de tomada	3 · 600 + 1 · 100	1 900 VA	127	14,96
Área de serviço	5	Pontos de tomada	3 · 600	1 800 VA	127	14,17
Chuveiro elétrico	6	Ponto específico	6 400	6 400 W	220	29,09
Torneira elétrica	7	Ponto específico	4 400	4 400 W	220	20,0
Circuito de distribuição	CD	–	13 853,47W		220	62,97



3.3 Localização dos pontos elétricos da instalação na planta baixa

Para determinar a localização dos pontos elétricos na planta baixa, devem ser levadas em conta as informações da norma NBR 5444:1989 – Símbolos gráficos para instalações elétricas prediais e as seguintes orientações:

- Utilizando os símbolos gráficos, distribuir os pontos de luz, pontos de tomada e pontos específicos nos circuitos, numerando cada um deles.
- Evitar posicionar pontos elétricos sobre elementos estruturais (pilares ou vigas de concreto) ou em interferência com outras instalações (por exemplo, em pontos dos projetos de instalações telefônicas, hidráulicas, sanitárias, de combate a incêndio etc.).
- Localizar os pontos de maneira a distribuir uniformemente os pontos de iluminação geral e prever pontos de iluminação para casos específicos.
- Distribuir uniformemente os pontos de tomada de uso geral, de preferência fazendo um bom estudo do local.
- Em copas, cozinhas, áreas de serviço e banheiros, prever a localização de pontos de tomada de uso geral, de acordo com as exigências da norma NBR 5410:2004, para eventuais bancadas existentes. Recomenda-se que essas tomadas estejam a pelo menos 0,20 m de altura da bancada.
- Prever a localização de pontos de tomada (uso exclusivo) a no máximo 1,50 m do aparelho de utilização.
- Localizar os comandos dos pontos de iluminação prevendo interruptores simples, duplos, triplos, paralelos ou intermediários.

O quadro de distribuição é onde se concentram os dispositivos de proteção, manobra e comando, que devem ser instalados de acordo com a norma NBR 5410/2004, que estabelece:

- Acessibilidade (item 6.1.4) – Todos os componentes instalados no quadro de distribuição devem facilitar sua operação, inspeção, manutenção e acesso às conexões. O acesso não pode ser dificultado pela montagem dos componentes.
- Identificação dos componentes (itens 6.1.5.1 e 6.5.4.9) – Placas, etiquetas e outros meios adequados devem possibilitar a identificação dos dispositivos de comando, manobras e/ou proteção, de maneira que a correspondência entre componentes e respectivos circuitos possa ser prontamente reconhecida, evitando qualquer tipo de confusão. Se um dispositivo de comando, manobra e/ou proteção não puder ser observado pelo operador e por essa razão causar perigo, deve ser provida alguma sinalização à vista do operador.
- Independência dos componentes (item 6.1.6.1) – Os componentes devem ser escolhidos e dispostos de tal modo que impeça qualquer influência prejudicial entre as instalações elétricas e não elétricas, bem como entre as instalações elétricas de energia e de sinal da edificação.
- Componentes fixados nas portas ou tampas do quadro de distribuição (item 6.5.4.6) – Componentes como condutores e instrumentos devem ser dispostos de tal forma que os movimentos das portas ou tampas não causem danos aos condutores.

- Espaço de reserva (item 6.5.4.7) – Deve-se prever espaço de reserva para instalações futuras, conforme a tabela 3.35.

Quantidade de circuitos efetivamente disponível (N)	Espaço mínimo destinado à reserva (em número de circuitos)
Até 6	2
7 a 12	3
13 a 30	4
N > 30	0,15 N

Nota: a capacidade de reserva deve ser considerada no cálculo do alimentador do respectivo quadro de distribuição.

- Em relação à quantidade de quadros de distribuição, devem ser considerados: o número de centros de cargas (pontos ou regiões onde se verifica a maior concentração de cargas), o aspecto econômico e a versatilidade desejada.

Os traçados de um projeto de instalação elétrica são feitos em planta baixa, e informações gráficas não pertinentes, como representação de pisos e louças, devem ser omitidas. O destaque deve ser o traçado da instalação. Entretanto, outra planta baixa com esses detalhes pode facilitar a localização dos pontos elétricos (figura 3.6).

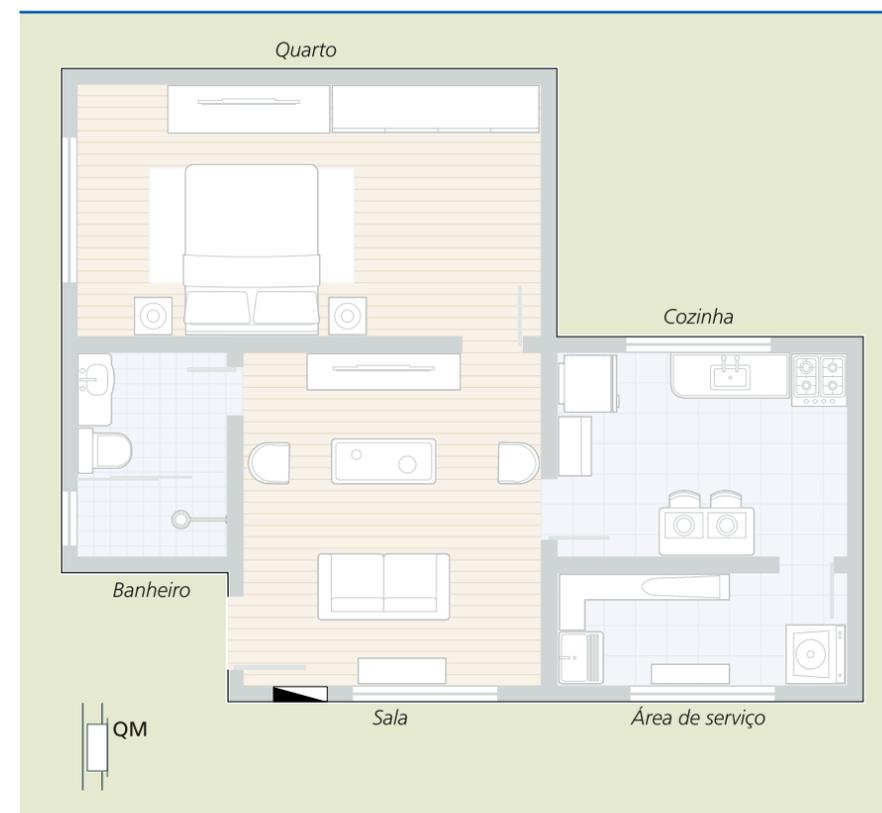


Tabela 3.35

Quadro de distribuição: espaço de reserva (tabela 59 da NBR 5410:2004).

Figura 3.6

Layout das dependências.

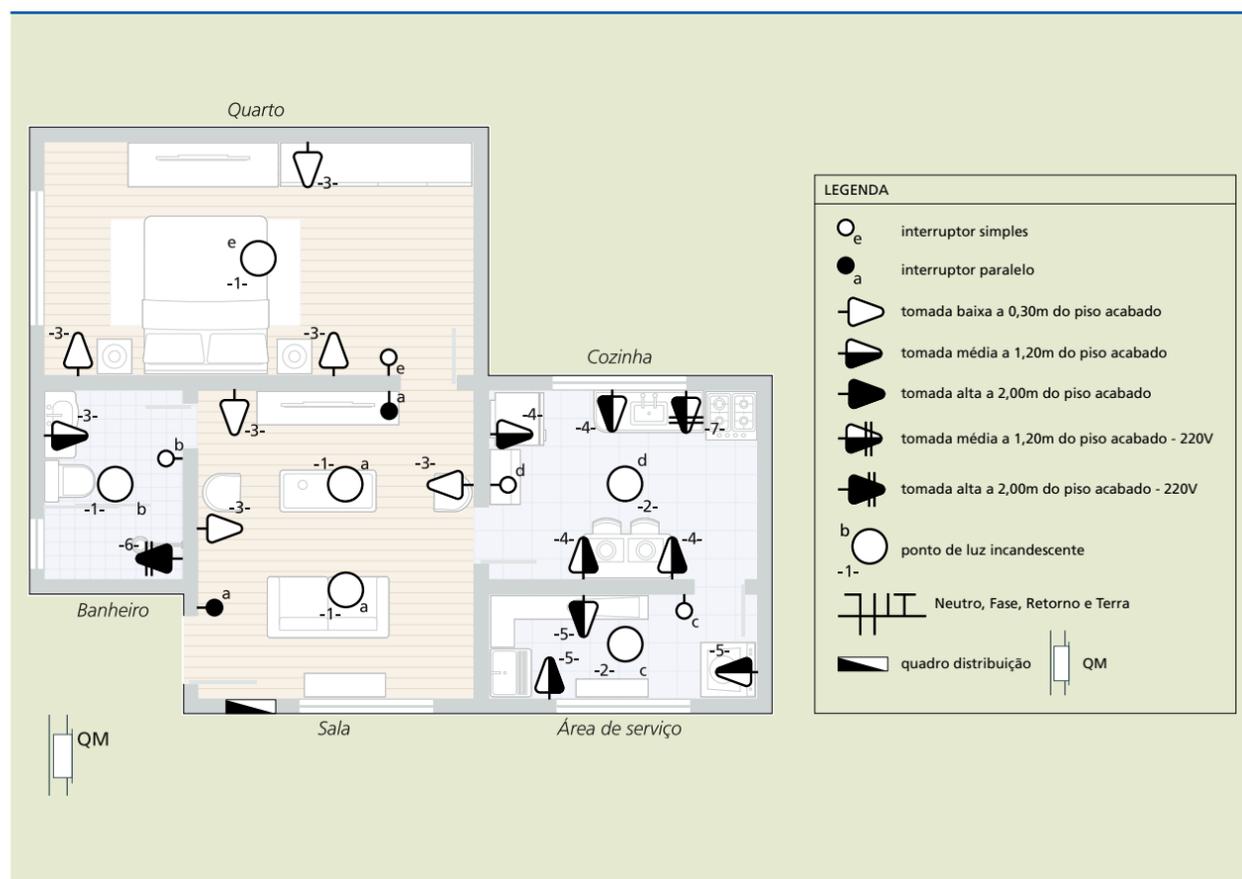


A planta baixa para o traçado da instalação é feita normalmente em escala de 1:50 ou 1:100, e suas especificações e dimensionamentos são executados conforme as normas para confecção de desenhos de planta baixa NBR 10068:1987 – Folhas de desenho: *layout* e dimensões e NBR 10582 – Conteúdo da folha para desenho técnico.

Figura 3.7

Planta baixa com os respectivos números de circuitos.

A planta baixa da figura 3.7 apresenta a localização dos pontos com os respectivos números de circuitos.



3.4 Traçado dos eletrodutos

O traçado dos eletrodutos inicia pelo quadro de distribuição, de acordo com os seguintes procedimentos:

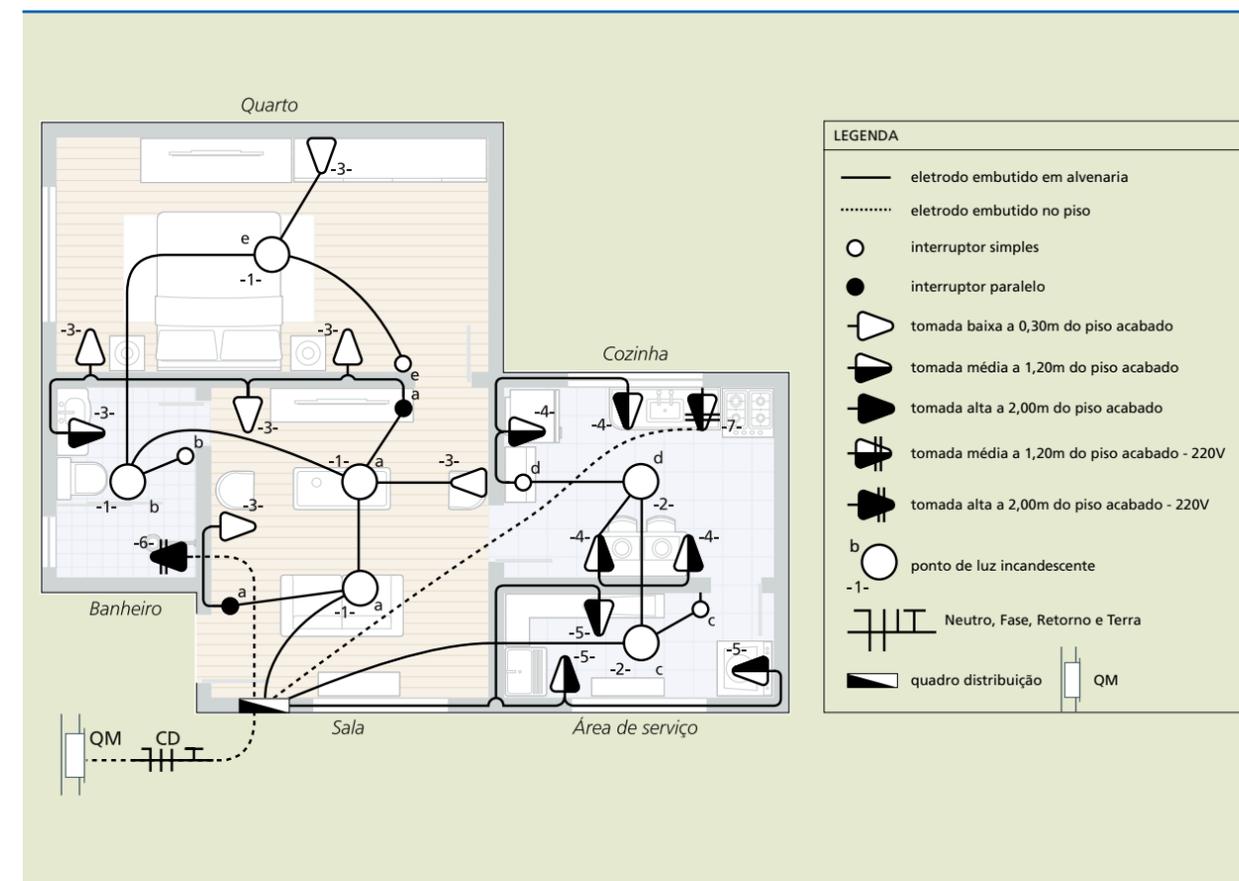
- Privilegiar os trajetos mais curtos e evitar cruzamento de eletrodutos.
- Interligar os pontos de luz aos eletrodutos embutidos no teto, passando por todas as dependências.
- Interligar os pontos de comando e pontos de tomada ao(s) ponto(s) de luz de cada dependência (eletrodutos embutidos nas paredes e/ou no teto).
- Evitar que as caixas octogonais (4" · 4" · 4" com fundo móvel e 3" · 3" · 2" com fundo fixo) embutidas no teto estejam interligadas a mais de cinco eletrodutos.

- Evitar que as caixas retangulares (4" · 4" · 2" ou 4" · 2" · 2") embutidas na parede estejam interligadas a mais de quatro eletrodutos.
- Recomenda-se, em alguns casos, que nas instalações de tomadas baixas e médias os eletrodutos sejam embutidos no piso.

A figura 3.8 apresenta o traçado dos eletrodutos.

Figura 3.8

Traçado dos eletrodutos.



3.5 Representação da fiação

Depois do traçado dos eletrodutos, procede-se à representação da fiação (circuitos terminais com seus respectivos condutores), observando os seguintes procedimentos:

- Representar a fiação do circuito que passa em cada trecho dos eletrodutos.
- Identificar suas seções nominais, em mm² (● = mm²).
- Identificar o circuito a que os condutores pertencem (figura 3.9).

Obs.: fiação de 1,5 mm² não necessita identificação.

- Utilizar a simbologia gráfica normatizada (norma NBR 5444:1989).
- Evitar que nos trechos dos eletrodutos, principalmente no inicial (saída do quadro de distribuição), passem mais de cinco circuitos, preferencialmente.



O número de circuitos passantes eleva o diâmetro do eletroduto, além de influenciar o aumento da seção dos condutores devido ao fator de correção de agrupamento.

Figura 3.9

Representação dos eletrodutos contendo os circuitos e suas fiações.

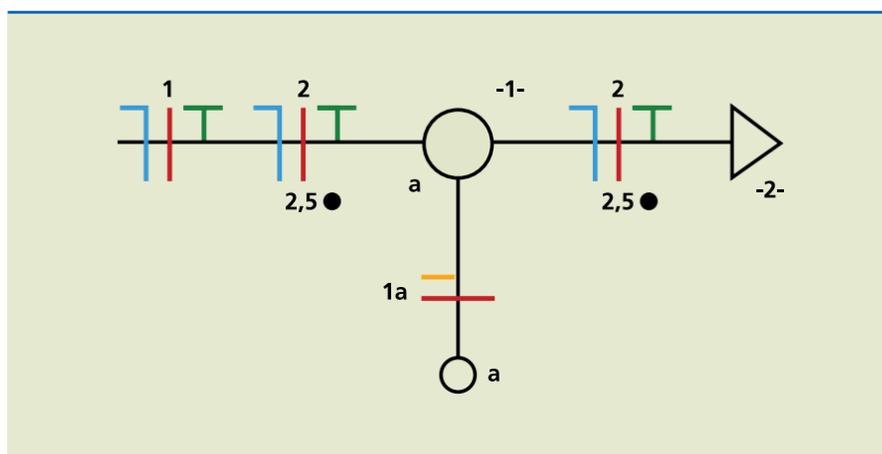
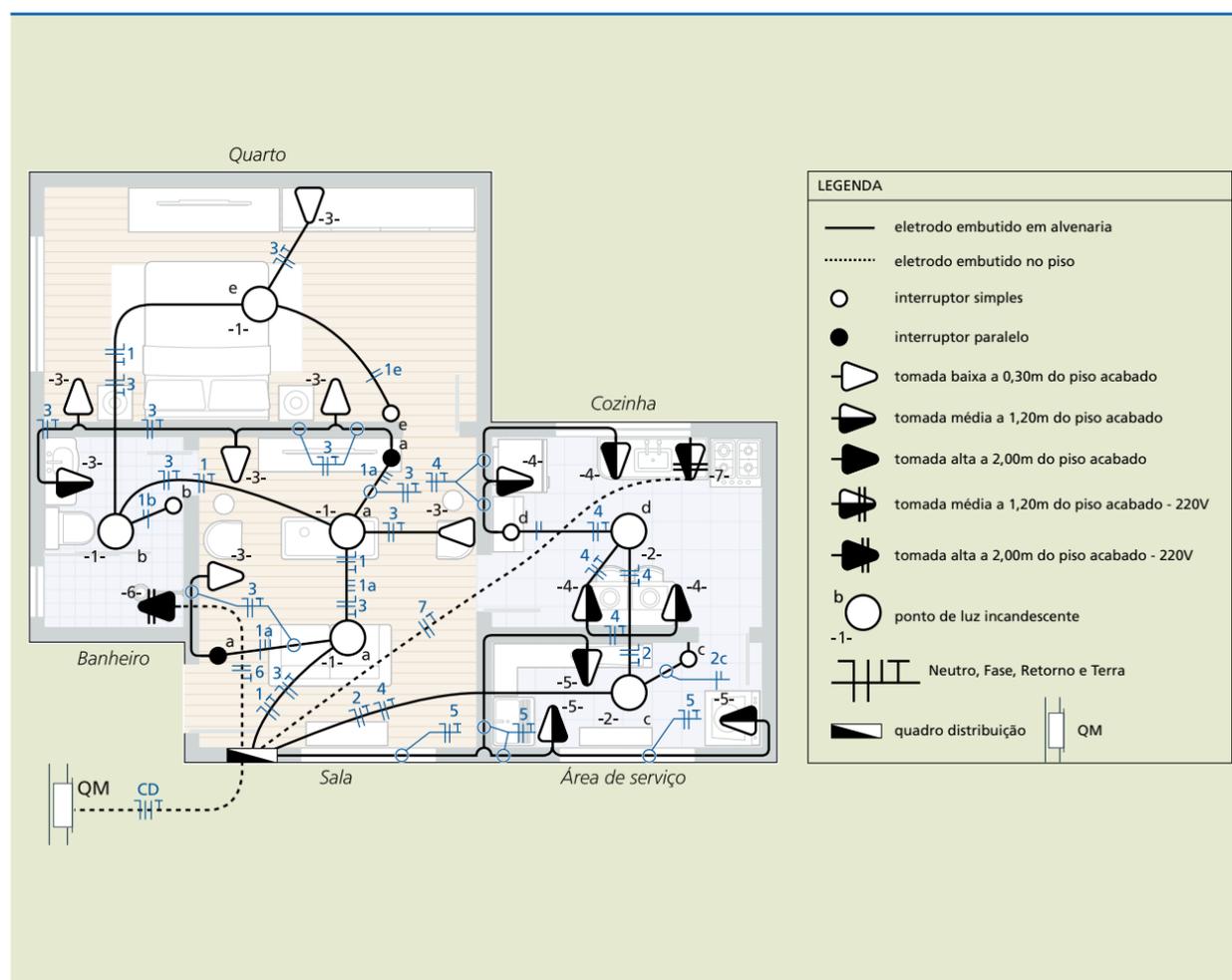


Figura 3.10

Representação da fiação dos circuitos.

A figura 3.10 mostra a representação da fiação dos circuitos.



3.6 Dimensionamento dos condutores dos circuitos terminais

Os circuitos terminais discriminados por números e tipos são os que correspondem aos circuitos de iluminação, de pontos de tomada e de pontos específicos.

O dimensionamento dos condutores elétricos em instalações residenciais segue três critérios: **seção mínima**, conforme tabela 3.11; **máxima capacidade de condução** de corrente (a troca térmica entre os condutores e o ambiente influencia a capacidade de condução de corrente e esta depende do método de instalação do condutor); e limite de queda de tensão, detalhado em seguida.

De acordo com a norma NBR 5410:2004, em qualquer ponto de utilização da instalação residencial, a queda de tensão verificada não deve ser superior aos seguintes valores, dados em relação ao valor da tensão nominal da instalação:

- a) 5%, calculados a partir do ponto de entrega, nos demais casos de ponto de entrega com fornecimento em tensão secundária de distribuição;
- b) 4%, calculados nos circuitos terminais.

Para efetuar o dimensionamento do condutor pela máxima queda de tensão admissível, deve-se levar em conta:

- a) tipo de isolamento do condutor;
- b) método de instalação;
- c) material do eletroduto (magnético ou não magnético);
- d) tipo de circuito (monofásico ou trifásico);
- e) tensão do circuito (tensão fase-neutro ou tensão fase-fase);
- f) corrente de projeto (I_B);
- g) fator de potência;
- h) comprimento do circuito (L), em km;
- i) queda de tensão $e(\%)$ admissível;
- j) cálculo da queda de tensão unitária ($\Delta V_{unit} = \frac{e(\%).V}{I_B.L}$);
- k) escolha do condutor.

A equação
$$\Delta V_{unit} = \frac{e(\%).V}{I_B.L}$$

permite encontrar, na tabela dos fabricantes, o condutor cuja queda de tensão é igual ou imediatamente inferior à calculada, obtendo, assim, a seção do condutor.

Como em instalações elétricas residenciais a distância entre o quadro de distribuição e a carga costuma ser pequena, o limite de queda de tensão não afetará o dimensionamento dos condutores. No entanto, se tal distância for grande, esse critério deve ser considerado.

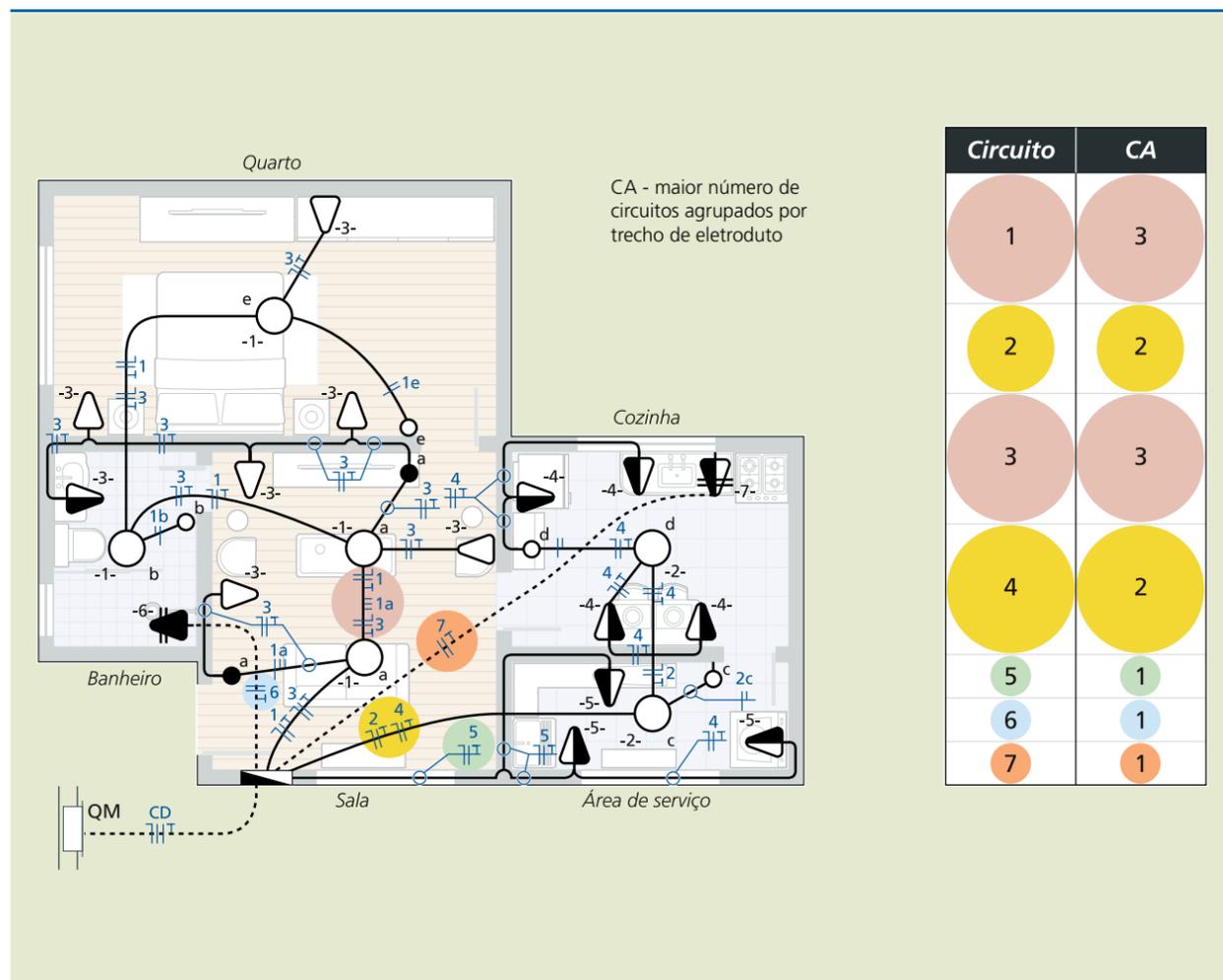


3.6.1 Correção da corrente calculada dos circuitos terminais

Para corrigir o valor da corrente calculada dos circuitos, é preciso consultar a planta com a representação gráfica da fiação e seguir o caminho que o circuito percorre. Nessa análise, observa-se cada circuito individualmente, em todos os trechos de eletrodutos, e define-se o trecho que possui o maior número de circuitos agrupados (CA), que deve ser igual ou superior a 1 (figura 3.11).

Figura 3.11

Indicação dos circuitos agrupados em cada trecho.



Com base nos números de circuitos agrupados, verifica-se qual o valor do fator de correção de agrupamento (fator que deve ser aplicado para evitar aquecimento excessivo dos condutores quando se agruparem vários circuitos em um mesmo eletroduto), conforme a tabela 3.36, que resume os dados da tabela 3.15.

Tabela 3.36

Fator de agrupamento.

Nº de circuitos agrupados	1	2	3	4	5	6	7
Fator de agrupamento (f)	1,00	0,8	0,7	0,65	0,6	0,57	0,54

Para definir o valor da corrente corrigida, divide-se o valor da corrente calculada pelo produto entre o fator de correção de agrupamento, encontrado na tabela 3.36, e o fator de correção de temperatura (FCT) correspondente a cada circuito terminal:

$$I_{\text{corrigida}} = I_{\text{calculada}} / \text{FCT} \cdot \text{FCA}$$

Como em instalações residenciais a isolamento do condutor é, em geral, de PVC e a temperatura é igual a 30 °C, FCT = 1,0. Caso a temperatura seja diferente de 30 °C, deve-se utilizar a tabela 3.21.

Retornando ao quadro de previsão de cargas, anotam-se os novos dados (tabela 3.37).

Tabela 3.37

Quadro de previsão de cargas com a corrente dos circuitos calculada e corrigida.

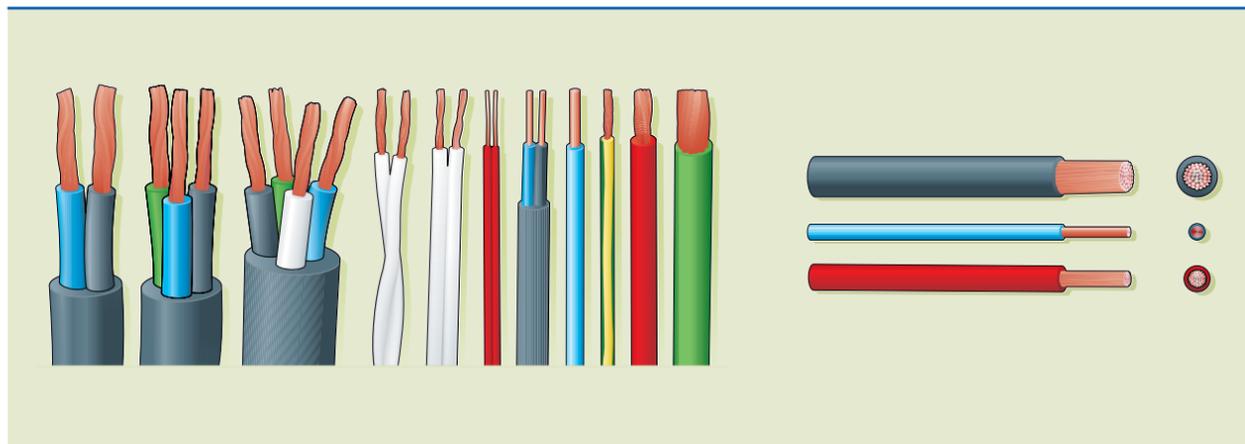
Local	Circuito	Tipo	Potências		Tensão (V)	Corrente do circuito (A)			
			Parcial	Total		Calculada	Fator de Correção		Corrigida
							FCT	FCA	
Sala Quarto Banheiro	1	Iluminação social	160 160 100	420 VA	127	3,31	1,0	0,7	4,73
Cozinha Área de serviço	2	Iluminação serviço	100 100	200 VA	127	1,57	1,0	0,8	1,96
Sala Quarto Banheiro	3	Pontos de tomada	3 · 100 3 · 100 1 · 600	1 200 VA	127	9,45	1,0	0,7	13,50
Cozinha	4	Pontos de tomada	3 · 600 + 1 · 100	1 900 VA	127	14,96	1,0	0,8	18,70
Área de serviço	5	Pontos de tomada	3 · 600	1 800 VA	127	14,17	1,0	1,0	14,17
Chuveiro elétrico	6	Ponto específico	6 400	6 400 W	220	29,09	1,0	1,0	29,09
Torneira elétrica	7	Ponto específico	4 400	4 400 W	220	20,0	1,0	1,0	20,00
Circuito de distribuição	CD	–	13 853,47 W		220	62,97	1,0	1,0	62,97



3.6.2 Seção dos condutores para cada um dos circuitos terminais

Figura 3.12

Tipos de condutores elétricos (fios e cabos) singelos e múltiplos.



Quando a escolha do condutor não envolve o aspecto peso, e sim o espaço a ser ocupado, o mais indicado é o de cobre, por possuir menor diâmetro que o de alumínio, considerando que ambos transportam o mesmo valor de corrente elétrica.

Depois de definir o material do condutor (cobre), a isolação (PVC) e o método de instalação do eletroduto (embutido em alvenaria), pode-se determinar, por meio do valor da corrente corrigida, a seção do condutor de fase para cada um dos circuitos terminais, conforme as tabelas 3.11 (reproduzida parcialmente na tabela 3.38) e 3.16 (parte dela representada na tabela 3.39).

Tabela 3.38

Reprodução de parte da tabela 3.11.

Tipo de linha		Utilização do circuito	Seção mínima do condutor (mm ² – material)
Instalações fixas em geral	Condutores e cabos isolados	Circuitos de iluminação	1,5 Cu
		Circuitos de força (tomadas de corrente)	2,5 Cu

Tabela 3.39

Reprodução de parte da tabela 3.16.

Método de instalação número	Esquema ilustrativo	Descrição	Métodos de referência (I)
7		Condutores isolados ou cabos unipolares em eletroduto de seção circular embutido em alvenaria	BI

Portanto, no projeto em estudo, consideram-se as seguintes informações:

- Condutores: cobre.
- Isolação: PVC.
- Temperatura no condutor: 70 °C.
- Temperaturas de referência do ambiente: 30 °C (ar), 20 °C (solo).
- Número de condutores carregados: dois (entre FN e entre FF).

Observe a seguir a tabela 3.40, que reproduz parte da tabela 3.18.

Tabela 3.40

Reprodução parcial da tabela 3.18.

Seções nominais (mm ²)	Métodos de referência											
	A1		A2		B1		B2		C		D	
	Número de condutores carregados											
	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
Cobre												
0,5	7	7	7	7	9	8	9	8	10	9	12	10
0,75	9	9	9	9	11	10	11	10	13	11	15	12
1	11	10	11	10	14	12	13	12	15	14	18	15
1,5	14,5	13,5	14	13	17,5	15,5	16,5	15	19,5	17,5	22	18
2,5	19,5	18	18,5	17,5	24	21	23	20	27	24	29	24
4	26	24	25	23	32	28	30	27	36	32	38	31
6	34	31	32	29	41	36	38	34	46	41	47	39
10	46	42	43	39	57	50	52	46	63	57	63	52
16	61	56	57	52	76	68	69	62	85	76	81	67
25	80	73	75	68	101	89	90	80	112	96	104	86



Tabela 3.41

Quadro de previsão de cargas com seção dos condutores de fase.

Determinando as seções nominais pelos dois critérios, pode-se refazer o quadro de previsão de cargas (tabela 3.41).

Circuito	Tipo	Potência total	Tensão (V)	Corrente corrigida (A)	Tabela 13	Tabela 18	Seção da fase adequada
					S_{fase} (mm ²)	S_{fase} (mm ²)	S_{fase} (mm ²)
1	Iluminação social	420 VA	127	4,73	1,5	0,5	1,5
2	Iluminação de serviço	200 VA	127	1,96	1,5	0,5	1,5
3	Pontos de tomada	1 200 VA	127	13,50	2,5	1,0	2,5
4	Pontos de tomada	1 900 VA	127	18,70	2,5	2,5	2,5
5	Pontos de tomada	1 800 VA	127	14,17	2,5	1,5	2,5
6	Ponto específico	6 400 W	220	29,09	2,5	4,0	4,0
7	Ponto específico	4 400 W	220	20,00	2,5	2,5	2,5
CD	Circuito de distribuição	13 853,47 W	220	62,97	2,5	16,0	16,0

Tabela 3.44

Quadro de previsão de cargas com seção dos condutores de fase, neutro e terra.

Circuito	Tipo	Potência total	Tensão (V)	Corrente corrigida (A)	Seção do fase	Seção do neutro	Seção do terra
					S_{fase} (mm ²)	S_{neutro} (mm ²)	S_{terra} (mm ²)
1	Iluminação social	420 VA	127	4,73	1,5	1,5	1,5
2	Iluminação de serviço	200 VA	127	1,96	1,5	1,5	1,5
3	Pontos de tomada	1 200 VA	127	13,50	2,5	2,5	2,5
5	Pontos de tomada	1 800 VA	127	14,17	2,5	2,5	2,5
6	Ponto específico	6 400 W	220	29,09	4,0	4,0	4,0
7	Ponto específico	4 400 W	220	20,00	2,5	2,5	2,5
CD	Circuito de distribuição	13 853,47 W	220	62,97	16,0	16,0	16,0

Agora, determina-se a seção dos condutores neutro e de proteção (terra), utilizando as informações das tabelas 3.23 e 3.24, reproduzidas, em parte, nas tabelas 3.42 e 3.43, respectivamente.

Tabela 3.42

Reprodução de parte da tabela 3.23.

Seção dos condutores de fase (mm ²)	Seção reduzida do condutor neutro (mm ²)
$S \leq 25$	S

Tabela 3.43

Reprodução de parte da tabela 3.24.

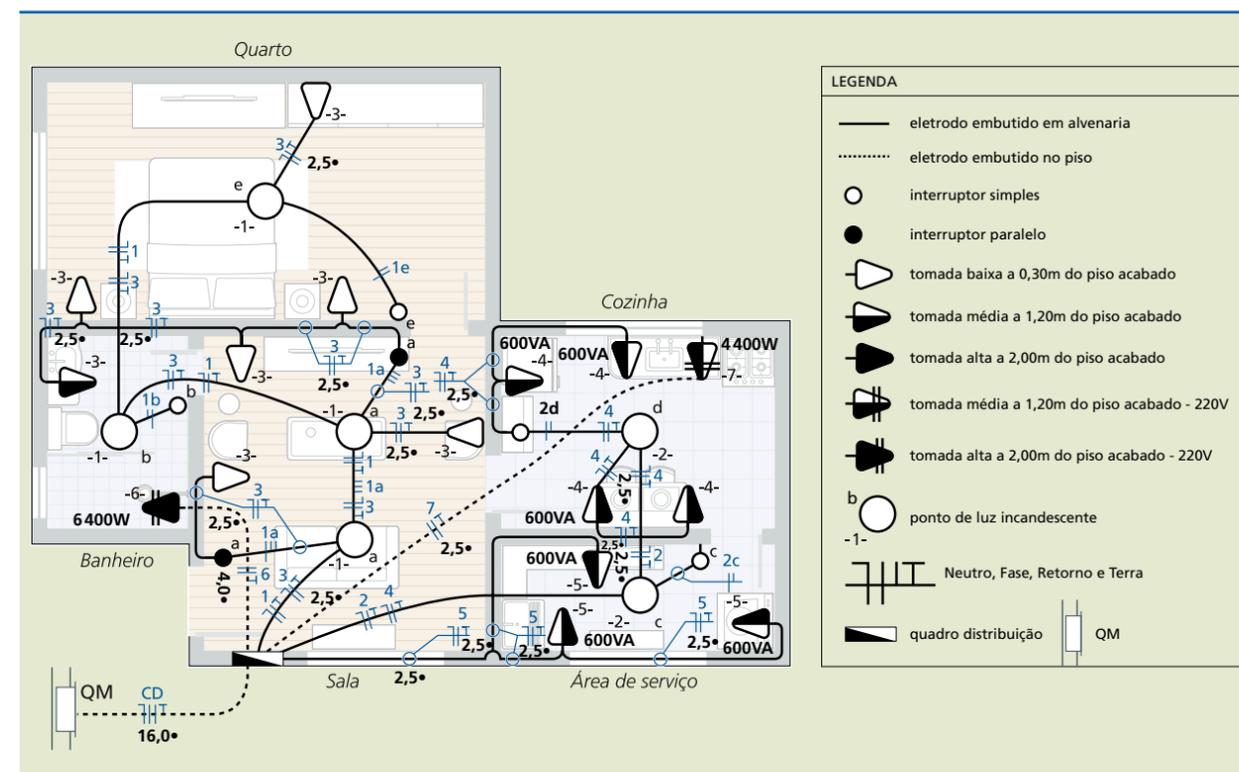
Seção dos condutores de fase (mm ²)	Seção mínima do condutor de proteção correspondente (mm ²)
$S \leq 16$	S

Observando as tabelas 3.42 e 3.43, conclui-se que os condutores neutro e de proteção (terra) acompanharão as fases de cada circuito terminal (quadro 3.26).

Indicam-se, então, na planta baixa as seções nominais dos condutores (figura 3.13). Quando a seção nominal é igual a 1,5 mm², não há necessidade de indicá-la na planta, assim como todas as potências iguais a 100 VA.

Figura 3.13

Planta baixa com indicação das seções dos condutores.



3.7 Dimensionamento dos eletrodutos

Dimensionar eletrodutos é determinar o tamanho nominal do eletroduto para cada trecho da instalação ou para a instalação inteira. O tamanho nominal do eletroduto é seu diâmetro externo, expresso em milímetros. Assim, para realizar o dimensionamento, é necessário consultar a planta baixa com a representação gráfica da fiação e a indicação das seções dos condutores.

Em instalações elétricas residenciais, é obrigatório que os condutores não ocupem mais que 40% da área útil dos eletrodutos (conforme NBR 5410:2004, item 6.2.11.1.6) e, para dimensionar cada um deles, basta saber a quantidade e a seção nominal dos condutores que o ocupam.

Tabela 3.45

Ocupação máxima dos eletrodutos de PVC por condutores de mesma bitola (fios ou cabos unipolares 450/750 V BWF antichama).

Seção nominal	Nº de condutores no eletroduto										
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Tamanho nominal dos eletrodutos											
1,5	16	16	16	16	16	16	20	20	20	20	20
2,5	16	16	16	20	20	20	20	25	25	25	25
4,0	16	16	20	20	20	25	25	25	25	32	32
6,0	16	20	20	25	25	25	25	32	32	32	32
10,0	20	20	25	25	32	32	32	40	40	40	40
16,0	20	25	25	32	32	40	40	40	40	50	50

Analisando a planta baixa da figura 3.13 e a tabela 3.45, pode-se notar que:

- Para os circuitos 5 e 7, com três condutores cada um, de seção nominal de 2,5 mm², contidos no eletroduto, os trechos de eletrodutos terão o tamanho nominal de 16 mm.
- Para o circuito 6, com três condutores, de seção nominal de 4,0 mm², contidos no eletroduto, os trechos de eletrodutos terão o tamanho nominal de 16 mm.
- Para o circuito CD, com quatro condutores, de seção nominal de 16,0 mm², contidos no eletroduto, os trechos de eletrodutos terão o tamanho nominal de 25 mm.

Caso os condutores dos circuitos contidos no mesmo trecho de eletrodutos possuam seções nominais diferentes, o primeiro passo é saber a área total ocupada

pelos condutores no eletroduto, como exemplifica a tabela 3.46, extraída da especificação de um fabricante de fios.

Tabela 3.46

Dimensões totais dos condutores isolados (Pirelli – Pirastic Antiflam).

Seção nominal (mm ²)	1,5	2,5	4	6	10	16	25	35	50	70	95	120
Área total (mm ²)	6,2	9,1	11,9	15,2	24,6	33,2	56,7	71,0	95,0	133,0	177,0	214,0

Deve-se considerar também que a taxa máxima de ocupação do eletroduto, dada pelo quociente entre a soma das áreas das seções transversais dos condutores previstos, calculadas com base no diâmetro externo, e a área útil da seção transversal do eletroduto, não pode ser superior a:

- 53% no caso de um condutor (fio ou cabo).
- 31% no caso de dois condutores (fios ou cabos); e
- 40% no caso de três ou mais condutores (fios ou cabos), como exemplificado na tabela 3.47.

Tabela 3.47

Eletroduto de PVC rígido rosqueável – classe A (NBR 6150).

Área útil ≥ três cabos (40%)	50,7	81,4	138,6	225,6	384,8	497,6	791,7	1 290,8	1 795,5
Diâmetro nominal (mm)	16	20	25	32	40	50	60	75	85

Nota: a área útil do eletroduto e respectivos acessórios de ligação devem possibilitar a instalação e retirada com facilidade dos condutores (fios e cabos), assim como deixar uma área livre, de maneira a permitir a dissipação do calor. Para tanto, o item 6.2.11.1.6-a da NBR 5410:2004 prescreve algumas restrições quanto à taxa máxima de ocupação dos condutores nos eletrodutos.

Agora, é possível dimensionar os trechos de eletroduto do tipo PVC rígido rosqueável, no qual deverão ser instalados os circuitos com os seguintes dimensionamentos:

- Trecho A: circuito 1 (3#1,5 mm²), circuito 1a (3#1,5 mm²) e circuito 3 (3#2,5 mm²) – Pela tabela 3.46, área total = 3 · 6,2 + 3 · 6,2 + 3 · 9,1 = 18,6 + 18,6 + 27,3 ∴ área total = 64,5 mm².
- Trecho B: circuito 2 (3#1,5 mm²) e circuito 4 (3#2,5 mm²) – Pela tabela 3.46, área total = 3 · 6,2 + 3 · 9,1 = 18,6 + 27,3 ∴ área total = 45,9 mm².

Calculada a área útil total ocupada pelos condutores internamente ao eletroduto e com o auxílio da tabela 3.47, dimensiona-se o diâmetro nominal do eletroduto a ser utilizado em cada um dos circuitos:



- **Circuitos 1, 1a e 3** – A área útil ocupada pelo total de condutores nesse trecho de eletroduto é de 64,5 mm². Consultando a tabela 3.47, considera-se a área útil de 81,4 mm²; portanto, o diâmetro nominal do eletroduto deve ser de 20 mm.
- **Circuitos 2 e 4** – A área útil ocupada pelo total de condutores nesse trecho de eletroduto é de 45,9 mm². Consultando a tabela 3.47, considera-se a área útil de 50,7 mm²; portanto, o diâmetro nominal do eletroduto deve ser de 16 mm.

Conhecendo todas as dimensões nominais dos trechos de eletrodutos a serem utilizados, pode-se construir a tabela 3.48.

Tabela 3.48

Correspondência entre circuitos terminais e dimensão nominal do eletroduto.

Circuitos terminais	Dimensão nominal do eletroduto (mm)
1 e 3	20
2 e 4	16
5 e 7	16
6	16
CD	25

Tabela 3.49

Quadro de previsão de cargas com diâmetro nominal dos eletrodutos.

Assim, para o eletroduto do circuito de distribuição, adota-se o diâmetro nominal de 25 mm, e, para o restante da instalação, de 20 mm, informação inserida no quadro de previsão de cargas (tabela 3.49).

Circuito	Tipo	Potência total	Tensão (V)	Corrente corrigida (A)	Secção nominal dos condutores de fase, neutro e terra (mm ²)	Diâmetro dos eletrodutos (mm)
1	Iluminação social	420 VA	127	4,73	1,5	20
2	Iluminação de serviço	200 VA	127	1,96	1,5	20
3	Pontos de tomada	1 200 VA	127	13,50	2,5	20
4	Pontos de tomada	1 900 VA	127	18,70	2,5	20
5	Pontos de tomada	1 800 VA	127	14,17	2,5	20
6	Ponto específico	6 400 W	220	29,09	4,0	20
7	Ponto específico	4 400 W	220	20,00	2,5	20
CD	Circuito de distribuição	13 853,47 W	220	62,97	16,0	25

3.8 Dimensionamento dos dispositivos de proteção

Os disjuntores para baixa tensão (BT) são dispositivos de proteção capazes de estabelecer, conduzir e interromper correntes de operação de um circuito não apenas em condições normais de trabalho, como também em condições anormais, limitando a ocorrência dessa grandeza em módulo e tempo de duração.

Dispositivos mal dimensionados podem causar incêndios ou choques elétricos. Além desses problemas, as seguintes situações colocam em risco a instalação elétrica, os eletrodomésticos e as pessoas:

- Excesso de aparelhos ligados na mesma tomada.
- Aparelhos de potência elevada instalados em redes elétricas com cabos subdimensionados.
- Uso de extensões executadas por pessoal não qualificado.
- Aumento da capacidade dos disjuntores por certos “profissionais” para mascarar um dimensionamento insuficiente dos cabos.

A norma NBR 5410:2004 estabelece quais devem ser as proteções para instalações elétricas residenciais. São elas:

- Proteção contra choques elétricos (básica, supletiva, adicional, uso de dispositivos DR, sistema SELV ou PELV).
- Proteção contra efeitos térmicos (riscos de queimadura, combustão ou degradação dos materiais, comprometimento da segurança de funcionamento dos componentes instalados).
- Proteção contra sobrecorrentes (sobrecarga, curto-circuito, proteção dos condutores de fase, proteção do condutor de neutro).
- Proteção contra sobretensões (temporárias, transitórias).

Além disso, a mesma norma obriga a utilização de disjuntor diferencial residual de alta sensibilidade ($I_{\Delta R} = 30 \text{ mA}$) em circuitos terminais das tomadas de corrente e pontos de utilização em:

- Cozinhas, locais com pisos e/ou revestimento não isolantes e áreas externas.
- Tomadas de corrente em área interna que possam ser utilizadas para alimentar algum equipamento em área externa.
- Aparelhos de iluminação instalados em área externa.
- Banheiros.
- Instalações alimentadas por rede de distribuição pública onde não puder ser garantida a integridade do condutor PEN (Protection Earth + Neutro).

Os circuitos não relacionados nas recomendações e exigências citadas são protegidos por disjuntores termomagnéticos (DTM).

O disjuntor termomagnético somente é ligado ao condutor de fase e o disjuntor diferencial residual, aos condutores de fase e neutro dos circuitos; o neutro não pode ser aterrado após o DR nem seccionar o condutor de proteção.



O interruptor diferencial residual deve ser utilizado, no circuito a ser protegido, complementando o dispositivo de proteção de sobrecorrente (disjuntor termomagnético), com o DTM instalado antes do interruptor DR.

Quando a proteção é feita com DR, é preciso tomar cuidado com o tipo de aparelho a ser instalado, como chuveiros, torneiras elétricas e aquecedores de passagem com carcaça metálica e resistência nua, pois estes apresentam fugas de corrente muito elevadas, não permitindo que o DR permaneça ligado. Por representarem um risco à segurança das pessoas, recomenda-se a substituição desses aparelhos por aqueles com carcaça plástica ou resistência blindada.

Os disjuntores devem ser especificados (identificados) de maneira adequada, para assegurar e garantir a proteção contra curto-circuito e sobrecarga, seguindo rigorosamente as normas atualmente existentes (tabela 3.50):

- NBR NM 60898 – Normatiza os disjuntores especialmente projetados para serem manipulados por usuários leigos, ou seja, pessoas não qualificadas, e para não sofrerem manutenção (normalmente instalações residenciais ou similares).
- NBR IEC 60947-2 – Normatiza os disjuntores manipulados por pessoas qualificadas, ou seja, com formação técnica, e para sofrerem ajustes e manutenção (normalmente para instalações industriais ou similares).

Tabela 3.50

Diferentes categorias de disjuntores BT e suas normas.

Categoria	Características	Norma	Correntes nominais	Aplicações
Minidisjuntores – Disjuntores para instalações domésticas e análogas	Construção modular, montagem em trilho (quando padrão DIN) • Disparador não ajustável	IEC 60898	0,5 a 125 A	Proteção de circuitos terminais em instalações com tensão de no máximo $440 V_{CA}$
Disjuntores para uso geral: • Disjuntores em caixa moldada • Disjuntores de potência	Construção consagrada e tecnologia em constante aperfeiçoamento. Ampla variedade de disparadores e acessórios. Ao lado da tradicional construção aberta, versões em invólucros isolantes. Unidades de disparo versáteis e com amplos recursos, incluindo comunicação.	IEC 60947-2	40 a 3200 A 630 a 6300 A	Proteção de circuitos principais, de distribuição e terminais Proteção do quadro geral (QGBT)

3.8.1 Disjuntor termomagnético

O disjuntor termomagnético apresenta as seguintes características nominais:

- número de polos;
- tensão nominal;
- frequência;

- capacidade de ruptura (kA);
- corrente nominal (A);
- curva de disparo;
- faixa de ajuste do disparador magnético (opcional);
- faixa de ajuste do disparador térmico (opcional).

Capacidade de ruptura (kA) é o maior valor da corrente de curto-circuito que o dispositivo é capaz de interromper sem soldar os contatos ou explodir.

Os disjuntores de baixa tensão atuam em uma faixa situada dentro das curvas de tempo x corrente de seus disparadores. Essas curvas são compostas normalmente por duas partes: uma com características de curva a tempo inverso (disparador térmico) e outra com características de atuação a tempo curto ou instantâneo (disparador magnético).

Na proteção de circuitos que alimentam cargas com características resistivas, como lâmpadas incandescentes, chuveiros, torneiras, aquecedores elétricos e circuitos de tomadas de uso geral, utilizam-se disjuntores de curva B.

Para aplicações que se referem à proteção de circuitos que alimentam cargas indutivas e que apresentam picos de corrente no momento da partida, como micro-ondas e motores para bombas, utilizam-se disjuntores de curva C.

Tanto os disjuntores de curva B como os de curva C protegem integralmente os condutores elétricos da instalação contra curto-circuito e sobrecarga. No entanto, em instalações residenciais ou similares, costuma-se usar os disjuntores de curva B, pois protegem a instalação de maneira mais eficaz contra os curtos-circuitos de baixa intensidade.

A norma IEC 60898 define para o disparo instantâneo, em geral magnético, as faixas de atuação para as curvas B, C e D:

- Curva B: de 3 a 5 I_n .
- Curva C: de 5 a 10 I_n .
- Curva D: de 10 a 20 I_n .

Todos os circuitos devem ter um tipo de proteção e pelo menos um polo. A norma NBR 5410:2004 exige que todo circuito terminal seja protegido contra sobrecorrente por dispositivo que assegure o seccionamento simultâneo de todos os condutores fase (figura 3.14). Ressalte-se que os dispositivos unipolares montados lado a lado, apenas com suas alavancas de manobra acopladas, não são considerados dispositivos multipolares.

Nota

Não é recomendado o uso de fusíveis em circuitos terminais residenciais, pois eles não conseguem garantir que todos os condutores de fase sejam seccionados simultaneamente caso ocorra sobrecarga no circuito elétrico.

De acordo com a norma para disjuntores termomagnéticos (corrente de sobrecarga), há duas condições para dimensionamento do disjuntor (figura 3.15):



$$I_B \leq I_n \leq I_Z \begin{cases} I_B \leq I_n, \text{ em que } I_B \text{ é a corrente do projeto} \\ I_n \leq I_Z, \text{ em que } I_Z \text{ é a máxima capacidade de condução de corrente do condutor} \end{cases}$$

$$I_2 \leq 1,45 I_Z \begin{cases} I_2 = \alpha I_n; \text{ pela NBR IEC 60898, } \alpha = 1,45 \\ \alpha I_n \leq 1,45 I_Z \text{ ou } 1,45 I_n \leq 1,45 I_Z \Rightarrow I_n \leq I_Z \end{cases}$$

em que:

- I_n é a corrente nominal do dispositivo de proteção (disjuntor).
- I_2 , a corrente convencional de atuação.
- α vale:

- pela NBR IEC 60947-2: 1,30 a quente a 30 °C;
- pela NBR 5361: 1,35 a frio a 25 °C;
- pela NBR IEC 60898: 1,45 a quente a 30 °C;
- pela NBR 11840: 1,60.

Figura 3.14
Curvas do DTM.

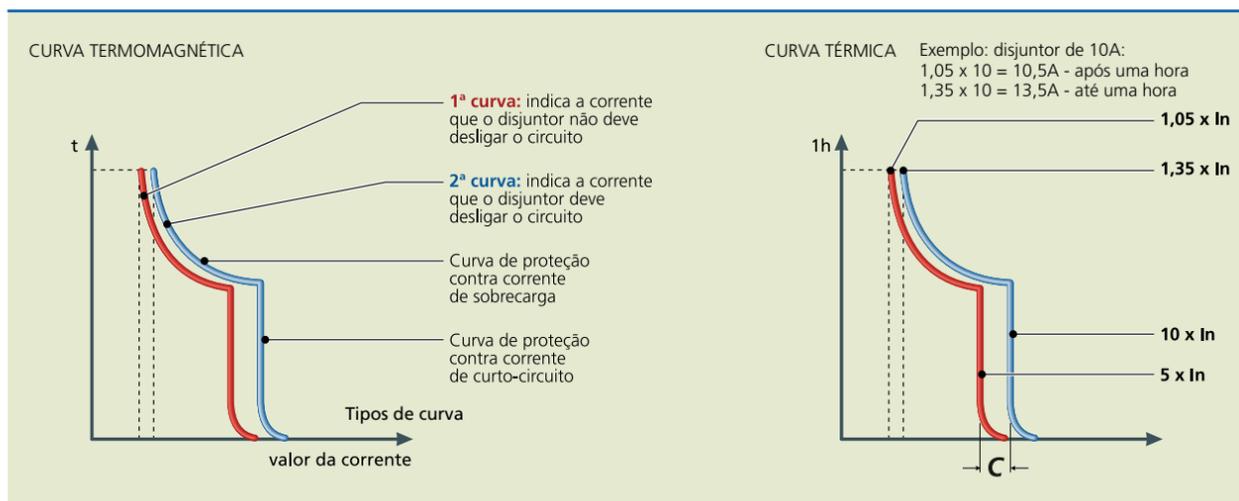
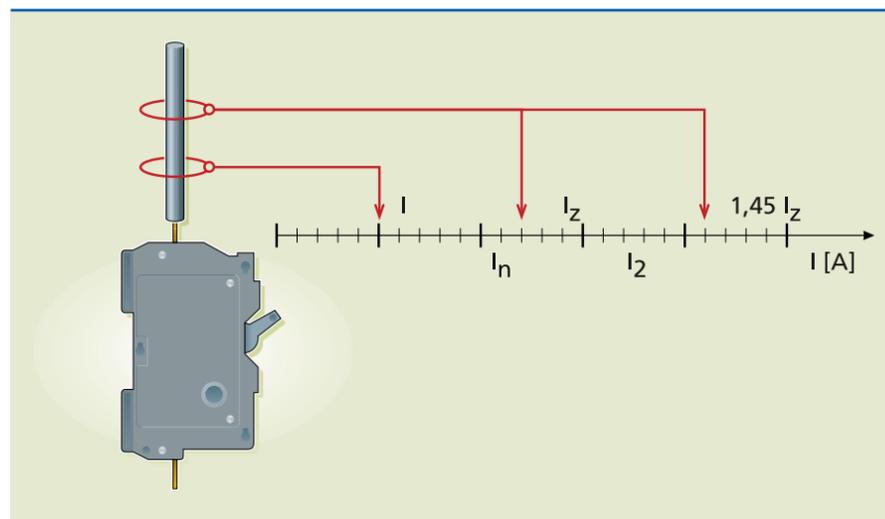


Figura 3.15
Proteção contra sobrecarga do DTM.



Além dessas informações, é necessário consultar a norma para disjuntores termomagnéticos referente à corrente de curto-circuito, segundo a qual o dispositivo de proteção deve estar coordenado com o condutor a fim de proteger o fio contra sobreaquecimento.

A característica do condutor deve fazer parte dos cálculos na integral de Joule, calculada por:

$$I^2 t \leq K^2 \cdot S^2 \quad (3.2)$$

em que:

- $I^2 t$ é a integral de Joule para o dispositivo de proteção.
- $K^2 \cdot S^2$ a integral de Joule para o condutor.

O fator K varia de acordo com o material do condutor e o tipo de isolamento. Normalmente, em instalações residenciais, utiliza-se o cobre; então, por exemplo: K = 115 para cobre com PVC e K = 135 para cobre com EPR ou XLPE, conforme mostra a tabela 3.51.

Assim, duas condições têm de ser atendidas:

$$\Rightarrow \text{Primeira condição: } I_R \geq I_{CC} \quad (3.3)$$

em que:

- I_R é a corrente de ruptura do DTM.
- I_{CC} , a corrente de curto-circuito presumida no ponto da instalação.

$$\Rightarrow \text{Segunda condição: } T_{dd} \leq t, \text{ sendo } t = S^2 \cdot K^2 / I_{CC}^2 \quad (3.4)$$

em que:

- T_{dd} em função de I_{CC} é o tempo de disparo do DTM.
- T , o tempo-limite de atuação do DTM.
- S , a seção nominal do condutor.
- K , a constante relacionada ao material do condutor (tabela 3.51).

Material do condutor	Material da isolamento	
	PVC	EPR ou XLPE
Cobre	K = 115	K = 135
Alumínio	K = 74	K = 87

Tabela 3.51
Constante K.



Figura 3.16

Proteção contra curto-circuito do DTM.

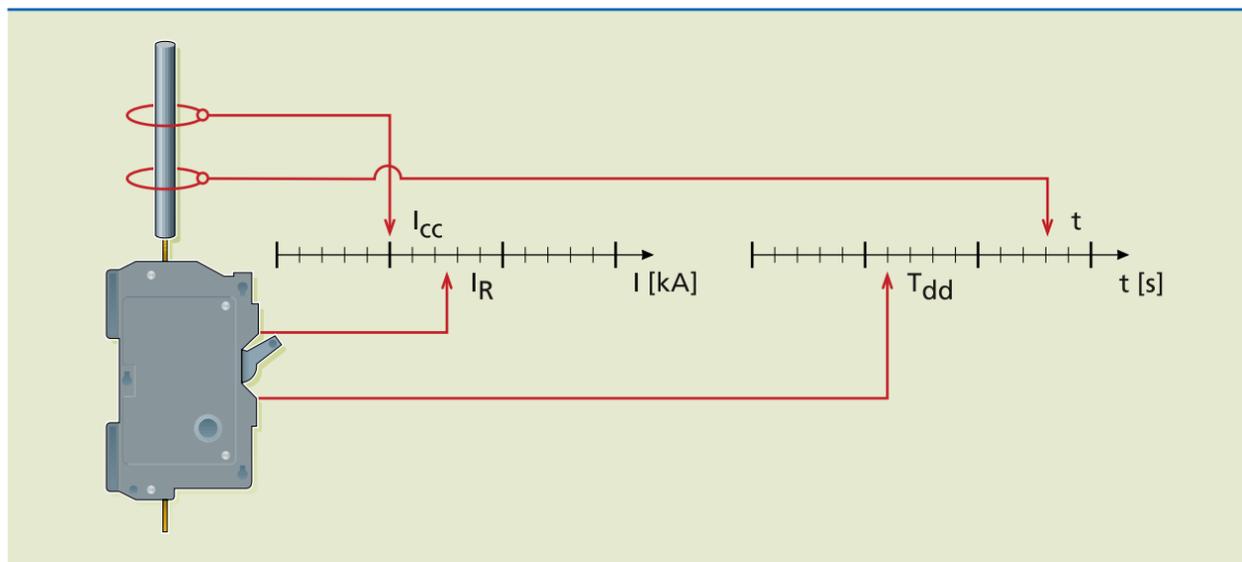
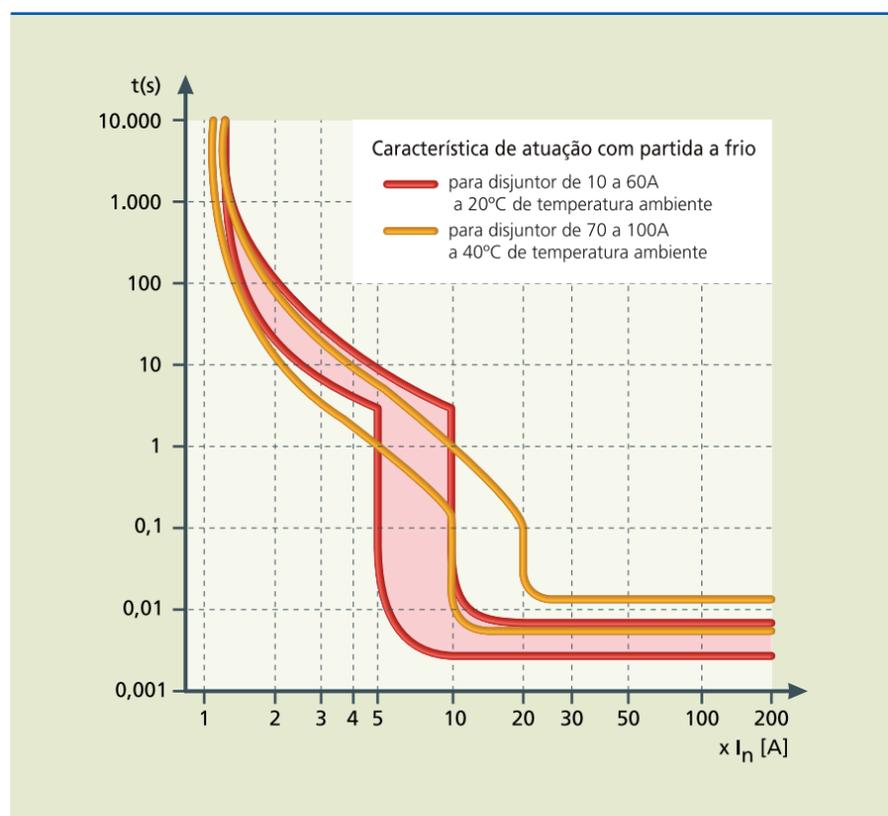


Figura 3.17

Curva de atuação de um disjuntor.



Limiar de atuação magnética:

- 10 a 60 A → 5 a 10 I_N
- 70 a 100 A → 10 a 20 I_N

Tabela 3.52

Capacidade de interrupção (kA).

Tensão de funcionamento (V)	Número de polos		
	1	2	3
127	5,0	–	–
220	3,0	5,0	5,0
380	–	4,5	3,0

Utilizaremos a equação da corrente de curto-circuito em circuitos trifásicos de 220 V/380 V para determinar o valor da I_{CC} presumida para condutores de cobre com S ≤ 50 mm², mas não podemos esquecer que, para circuitos monofásicos de 220 V, devemos dobrar o valor do comprimento L, conforme a equação a seguir:

$$I_{CC} = 22 / [(484 / I_{CC0}^2) + (100 \cdot \cos\Phi_{CC0} \cdot L / I_{CC0} \cdot S) + (5 \cdot L^2 / S^2)]^{-1/2} \quad (3.5)$$

⇒ Inicialmente, faremos o cálculo da corrente de curto-circuito presumida no ponto da instalação (QD) e usaremos esse dado como referência para dimensionar todos os disjuntores da instalação em atendimento à norma. Para calcular a I_{CC} do QD, utilizaremos os dados obtidos no projeto da instalação elétrica:

- Tipo de fornecimento bifásico feito a três fios (duas fases e um neutro) – Tensões: 127 V/220 V.
- Material do condutor: cobre, com seção nominal de 16 mm².
- Comprimento do QM ao QD: 6,50 m.
- I_{cc} na origem (concessionária de energia): 2 kA.
- 1,5 kA ≤ 2 kA ≤ 3 kA; assim, $\cos\Phi_{CC0} = 0,90$.

Aplicando a fórmula:

$$I_{CC} = \frac{22}{\sqrt{\frac{484}{2^2} + \frac{100 \cdot 0,90 \cdot (2 \cdot 6,50)}{2 \cdot 16} + \frac{5 \cdot (2 \cdot 6,50)^2}{16^2}}} = 1,7 \text{ kA} \quad (3.6)$$

Portanto, a corrente de curto-circuito presumida do QD é igual a 1,7 kA.

⇒ Dimensionamento do disjuntor do circuito 4 – pontos de tomada da cozinha tipo de proteção DTM + DR, em que I_B = 18,70 A (corrente do circuito), seção do condutor 2,5 mm², em que I_Z = 24 A. (Obs.: apresentaremos apenas o dimensionamento de um dos circuitos.)

Pela IEC 60898, I_n é a corrente que o disjuntor pode suportar em regime ininterrupto, a uma temperatura de referência especificada (30 °C, temperatura ambiente de referência) e I_n pode ser: 6, 10, 13, 16, 20, 25, 32, 40, 50, 63, 80, 100 e 125 A (veja catálogo do fabricante de disjuntores).



Verificaremos se esses valores atendem às duas condições: $I_B \leq I_N \leq I_Z$ e $I_N \leq I_Z$.

$$I_B \leq I_N \leq I_Z \Rightarrow 18,7 \leq I_N \leq 24$$

Nesse caso, só pode ser $I_N = 20$ A.

$$I_N \leq I_Z \Rightarrow 20 \leq 24 \text{ (atende à segunda condição)}$$

Como a instalação é residencial, deve-se obedecer à norma NBR NM 60898, que regulamenta o uso de disjuntores em instalações residenciais. Tensão do circuito de 127 V_{AC} implica disjuntor monopolar. Portanto, o disjuntor será monopolar e especificado com $I_n = 20$ A. Consultando a tabela 3.53, veremos que nosso disjuntor terá capacidade de interrupção em 5 kA.

Tabela 3.53
Capacidade de interrupção (kA).

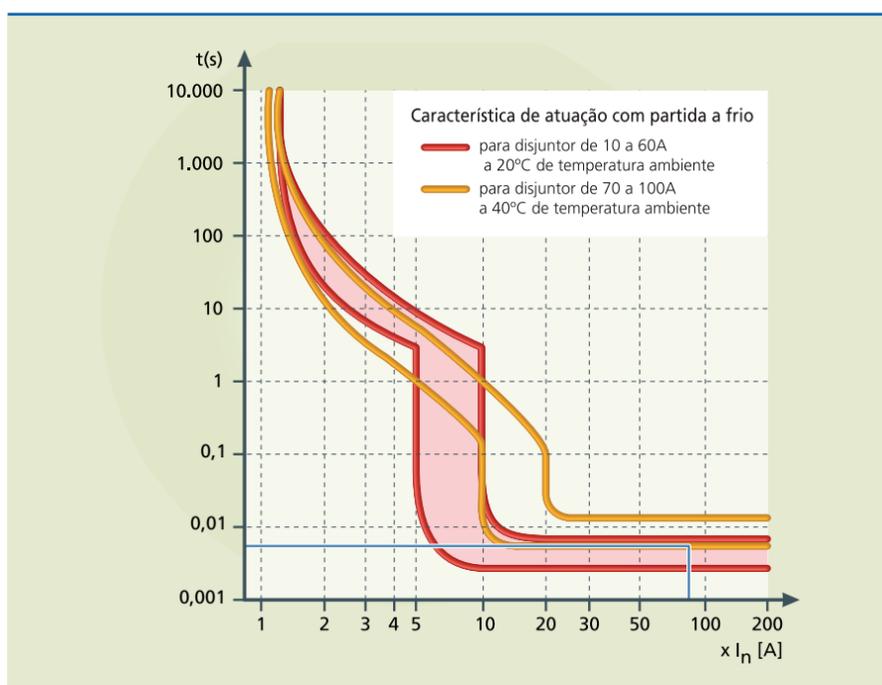
Tensão de funcionamento (V)	Número de polos		
	1	2	3
127	5,0	–	–
220	3,0	5,0	5,0
380	–	4,5	3,0

Assim:

$$\Rightarrow I_R = 5 \text{ kA e } I_{CC} = 1,7 \text{ kA: atende à condição } I_R > I_{CC}.$$

$\Rightarrow I_{CC}/I_N = 1700/20$, portanto igual a 85; entrando na curva de atuação do disjuntor com este valor, encontraremos o valor para T_{dd} (figura 3.18).

Figura 3.18
Curva de atuação de um disjuntor para $I_{CC}/I_n = 85$ do exemplo.



Pela intersecção na curva de atuação do disjuntor, o tempo de desarme é $T_{dd} = 0,008$ s.

Considerando a outra condição, podemos calcular o tempo admissível por:

$$t = S^2 \cdot K^2 / I_{CC}^2 \quad (3.7)$$

em que:

- S é a seção nominal do condutor.
- K , o material de isolamento do condutor.
- I_{CC} , a corrente de curto-circuito presumida.

Então:

$$t = 2,5^2 \cdot 115^2 / 1700^2 \Rightarrow t = 6,25 \cdot 13225 / 289 \cdot 10^4$$

Portanto, $t = 0,0286$ s. Como $T_{dd} < t$, a condição foi atendida.

O disjuntor termomagnético monopolar de 20 A atende e garante a proteção desejada.

A especificação completa e correta para o DTM aqui dimensionado é: disjuntor monopolar termomagnético em caixa moldada, tensão nominal de 127 V, corrente nominal de 20 A a 30 °C, frequência nominal de 50/60 Hz, faixa de atuação instantânea categoria C, capacidade de interrupção nominal em 5 kA em 127 V, de acordo com a NBR IEC 60898.

Como o circuito é para pontos de tomada da cozinha, é ideal a colocação de proteção diferencial residual. Portanto, a corrente nominal (I_n) do dispositivo DR tem de ser maior ou igual à corrente do disjuntor termomagnético a ser utilizado, e a corrente diferencial residual deve ser obrigatoriamente de 30 mA (alta sensibilidade).

3.8.2 Dispositivos DR

O disjuntor de proteção diferencial residual (DR) segue as normas NBR IEC 61008 e NBR IEC 61009 para disjuntores residenciais.

O DR funciona com um sensor que mede as correntes que entram e saem no circuito. As duas apresentam o mesmo valor, porém com direções contrárias à da carga. Se chamarmos a corrente que entra na carga de +I e a que sai de -I, a soma das correntes, portanto, é igual a zero. A soma só não será igual a zero se houver corrente fluindo para a terra, como no caso de um choque elétrico.

O DR deve ser instalado em série com os disjuntores: se for utilizado um único DR, após o disjuntor geral; se houver um DR para cada circuito, além do principal, após cada disjuntor de saída (ou parciais ou alimentadores).



Para facilitar a detecção do defeito, aconselha-se proteger cada aparelho com dispositivo diferencial. Caso isso seja inviável, é preciso separá-los por grupos que possuam características semelhantes, por exemplo: circuito de tomadas, circuito de iluminação etc. (a instalação está conforme recomendação do fabricante de disjuntores de proteção diferencial).

As principais recomendações na instalação do DR são:

- O fio terra (proteção) nunca pode passar pelo disjuntor diferencial.
- O neutro não pode ser aterrado depois de ter passado pelo disjuntor diferencial (figuras 3.19 e 3.20).

Figura 3.19
Instalação do disjuntor com proteção diferencial – CEMIG.

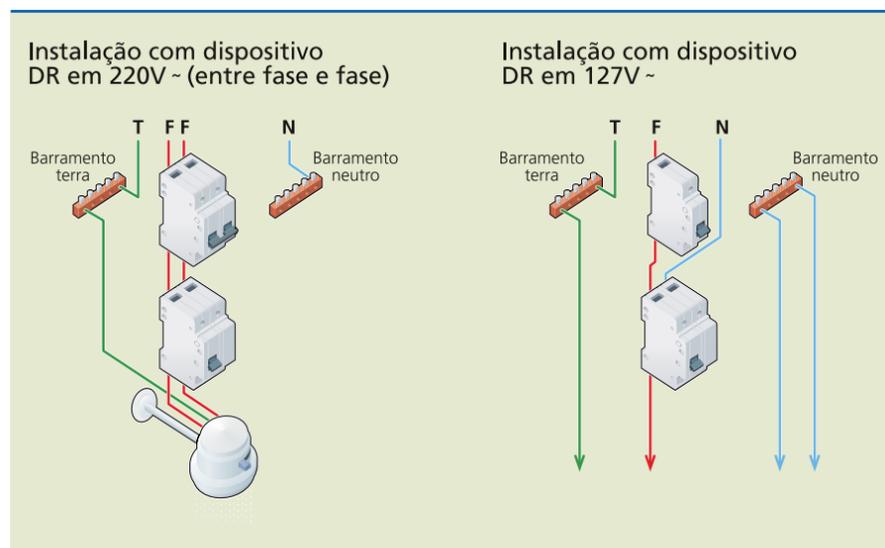


Figura 3.20
Disjuntor com proteção diferencial.



Voltando ao exemplo deste capítulo, vamos dimensionar o circuito 4. Nesse caso, optaremos pelo DR bipolar de corrente nominal de 25 A a 30 °C, sensibilidade de 30 mA, tensão nominal de 127 V_{CA}, frequência nominal de 60 Hz, faixa de atuação instantânea categoria C, capacidade de interrupção nominal em 5 kA em 127 V_{CA}, de acordo com a NBR IEC 60898.

Portanto, o quadro de previsão de cargas ficará completo (tabela 3.54).

Circuito	Tipo	Potência total	Tensão (V)	Corrente corrigida (A)	Seção nominal dos condutores de fase, neutro e terra (mm ²)	Diâmetro do eletroduto (mm)	Disjuntor		
							Tipo	Polos	I (A)
1	Iluminação social	420 VA	127	4,73	1,5	20	DTM	1	10
2	Iluminação de serviço	200 VA	127	1,96	1,5	20	DTM	1	10
3	Pontos de tomada	1 200 VA	127	13,50	2,5	20	DR	2	15
4	Pontos de tomada	1 900 VA	127	18,70	2,5	20	DR	2	20
5	Pontos de tomada	1 800 VA	127	14,17	2,5	20	DR	2	15
6	Ponto específico	6 400 W	220	29,09	4,0	20	DR	2	30
7	Ponto específico	4 400 W	220	20,00	2,5	20	DR	2	25
CD	Circuito de distribuição	13 853,47 W	220	62,97	16,0	25	DTM	2	70

Tabela 3.54

Quadro completo de previsão de cargas

3.8.3 Dispositivos de proteção contra surtos (DPS)

Diversas interferências podem ocorrer em instalações elétricas, ocasionando perturbações. O resultado de algumas dessas interferências são os surtos. Assim, determinadas ocorrências fazem com que os condutores de fase e neutro dos circuitos sejam submetidos a sobretensões, que por vezes chegam a atingir o valor da tensão entre fases. Portanto, é necessário proteger os circuitos contra essas sobretensões e perturbações eletromagnéticas. Algumas delas são:

- Perda do condutor neutro em sistemas trifásicos com neutro, bifásicos com neutro e monofásicos a três condutores, em esquemas TN e TT.
- Falta de terra envolvendo um dos condutores de fase em um esquema IT.

Quando qualquer um desses fatos ocorrer, deve-se prover a instalação de proteção contra essas sobretensões transitórias. Isso pode ser feito utilizando dispositivos de proteção contra surtos (DPS) ou outros meios, equivalentes ao DPS, que garantam a atenuação das sobretensões.

Havendo necessidade de usar DPS, como prevê o item 5.4.2.1.1 da NBR 54190:2004, sua disposição deve respeitar os seguintes critérios, conforme o item 6.3.5.da NBR 5410:2004:



a) Quando o objetivo for a proteção contra sobretensões de origem atmosférica transmitidas pela linha externa de alimentação, bem como a proteção contra sobretensões de manobra, os DPS devem ser instalados junto ao ponto de entrada da linha na edificação ou no quadro de distribuição principal, localizado o mais próximo possível do ponto de entrada.

b) Quando o objetivo for a proteção contra sobretensões provocadas por descargas atmosféricas diretas sobre a edificação ou em suas proximidades, os DPS devem ser instalados no ponto de entrada da linha na edificação.

Os DPS são dispositivos que, em regime anormal de serviço, atuam rapidamente, abrindo um caminho de baixa impedância assim que for detectada uma sobretensão.

Existem diferentes tecnologias de DPS, cada qual indicada para determinada situação:

- As normas IEC/EN definem DPS classe/tipo 1 para proteção de circuitos sujeitos a efeitos de descargas diretas.
- A NBR 5410:2004 define corrente de descarga nominal do DPS classe 2 para a proteção dos circuitos sujeitos aos efeitos de descarga indireta.

A ligação do DPS segue as orientações da NBR 5410:2004, item 6.3.5.2.2:

a) A ligação ao BEP ou à barra PE depende do local exato em que os DPS serão instalados e de como o BEP é implementado, na prática. Assim, a ligação será no BEP quando:

- O BEP se situar a montante (antes) do quadro de distribuição principal (com o BEP localizado, como deve ser, nas proximidades imediatas do ponto de entrada da linha na edificação) e os DPS forem instalados então junto do BEP, e não no quadro.
- os DPS forem instalados no quadro de distribuição principal da edificação e a barra PE do quadro acumular a função de BEP.

Por consequência, a ligação será na barra PE, propriamente dita, quando os DPS forem instalados no quadro de distribuição e a barra PE do quadro não acumular a função de BEP.

b) A hipótese configura um esquema que entra TN-C e que prossegue instalação adentro TN-C, ou que entra TN-C e em seguida passa a TN-S (aliás, como requer a regra geral do item 5.4.3.6). O neutro de entrada, necessariamente PEN, deve ser aterrado no BEP, direta ou indiretamente. A passagem do esquema TN-C a TN-S, com a separação do condutor PEN de chegada em condutor neutro e condutor PE, seria feita no quadro de distribuição principal (globalmente, o esquema é TN-C-S).

c) A hipótese configura três possibilidades de esquema de aterramento: TT (com neutro), IT com neutro e linha que entra na edificação já em esquema TN-S.

d) Há situações em que um dos dois esquemas se torna obrigatório, como a do caso relacionado na alínea *b* do item 6.3.5.(NBR 5410).

Além dessas recomendações, devem ser seguidas as prescrições normativas da NBR 5410:2004 sobre a utilização de dispositivos contra sobretensões:

a) Os dispositivos de proteção contra sobretensões devem ser dispostos de forma a não pôr em perigo pessoas ou equipamentos que estejam próximos durante sua atuação.

b) As características dos dispositivos de proteção contra sobretensões devem ser tais que eles não atuem para tensões iguais ou inferiores à tensão mais elevada que possa haver na instalação em serviço normal.

c) Ao ser feita a seleção dos limitadores de sobretensão, devem ser observados os seguintes parâmetros: tensão nominal da instalação, nível de isolamento da instalação, maneira de ligação do limitador de sobretensão e valor máximo da energia dissipada.

d) O terminal de terra dos limitadores de sobretensão deve ser ligado por uma das seguintes maneiras:

- Um conjunto interligado, compreendendo todas as massas da instalação e todos os elementos condutores estranhos à instalação dos locais servidos por ela.
- um eletrodo de aterramento independente, que apresente uma resistência no máximo igual ao quociente do nível de isolamento mínimo da instalação, diminuído da tensão entre fases ou entre fase e neutro, conforme o modo de ligação do limitador, pela corrente máxima de falta para a terra referente à instalação de tensão mais elevada.

Os DPS devem atender à IEC 61643-1 e ser selecionados com base, no mínimo, nas seguintes características:

- nível de proteção;
- máxima tensão de operação contínua;
- suportabilidade a sobretensões temporárias;
- corrente nominal de descarga e/ou corrente de impulso;
- suportabilidade à corrente de curto-circuito.

Como critério geral, é preciso lembrar que, quando se utiliza o dispositivo DR como proteção adicional e os DPS forem instalados junto ao ponto de entrada da linha elétrica na edificação ou no quadro de distribuição principal, estes devem ser posicionados a montante (antes) do(s) dispositivo(s) DR.

A localização dos DPS destinados à **proteção de sinal** é descrita no item 5.4.2.da NBR 5410:2004.

Toda linha externa de sinal, seja de telefonia, de comunicação de dados, de vídeo, seja qualquer outro sinal eletrônico, deve ser provida de proteção contra surtos nos pontos de entrada e/ou saída da edificação, como estabelece o item 6.3.5.3:

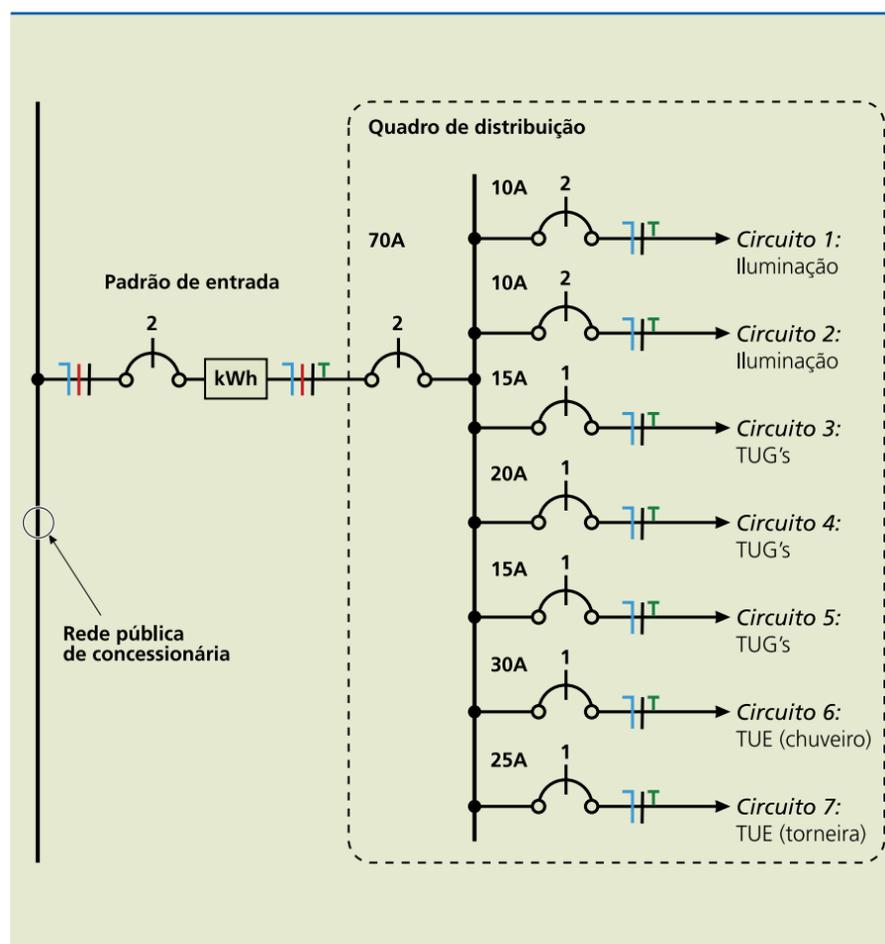


- a) No caso de linha originária da rede pública de telefonia, o DPS deve ser localizado no distribuidor geral (DG) da edificação, situado junto ao BEP.
- b) No caso de linha externa originária de outra rede pública que não a de telefonia, o DPS deve ser localizado junto ao BEP.
- c) No caso de linha que se dirija a outra edificação ou a construções anexas e, ainda, no caso de linha associada à antena externa ou a estruturas no topo da edificação, o DPS deve ser localizado junto ao BEL mais próximo (eventualmente, junto ao BEP quando o ponto de saída ou entrada de tal linha se situar, coincidentemente, próximo ao BEP).

3.9 Diagrama unifilar da instalação elétrica residencial

A figura 3.21 mostra o diagrama unifilar da instalação elétrica residencial estudada neste capítulo.

Figura 3.21
Diagrama unifilar de uma instalação elétrica.



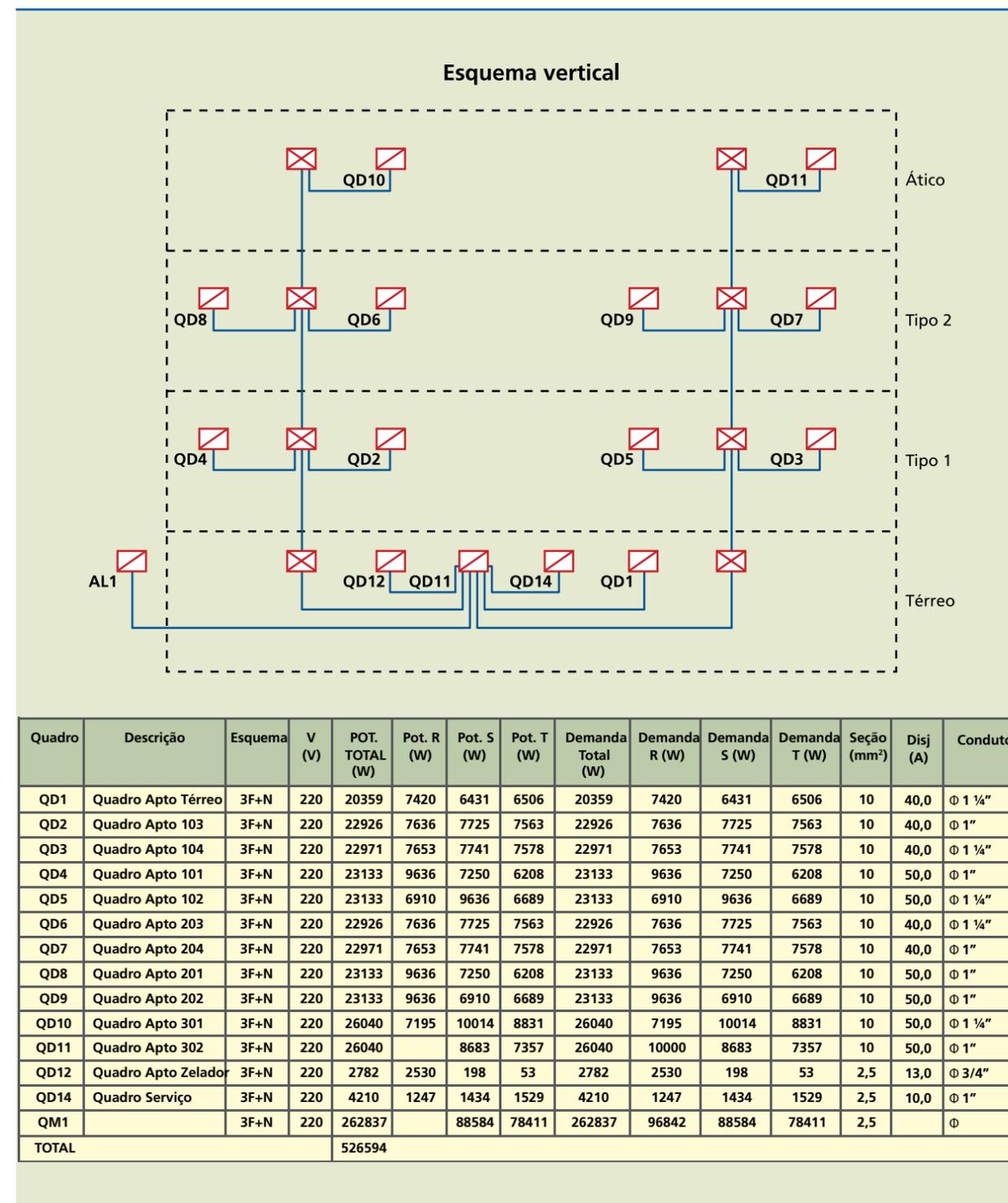
3.10 Prumada elétrica

Prumada elétrica é um desenho esquemático que representa a instalação elétrica no plano vertical. Esse desenho não necessita de escala.

Normalmente, a prumada detalha a instalação completa. Por exemplo, ser for de um edifício, deve apresentar a interligação dos quadros, a potência instalada de cada quadro, a demanda provável, o disjuntor de entrada, o eletroduto e a seção do condutor entre os quadros.

Exemplo 1: a figura 3.22 mostra uma prumada elétrica.

Figura 3.22
Prumada elétrica.



- Tipo: embutir ou sobrepor.
- Polos: dois polos (2P); dois polos e terra (2P + T).
- I_N : 10 e 20 A.
- V_N : 250 V.
- Com três pinos redondos, em formato sextavado.

Eletróduto – Rígido de seção circular, material PVC, tipo, classe, tamanho nominal, de acordo com a NBR 6150.

- Tipo: rosqueável ou soldável.
- Classe: A ou B.
- Tamanhos nominais (mm): 16, 20, 25, ... (curvas de 45°, 90° e 135°, buchas e arruelas).

3.12 Lista de materiais

É necessário fazer a relação de todos os materiais que serão empregados na execução do projeto, com suas respectivas especificações e quantidades (tabela 3.54). A especificação dos componentes deve conter uma descrição sucinta e suas características nominais. A tabela 3.55 é uma representação parcial da listagem necessária.

Tabela 3.55
Lista de materiais.

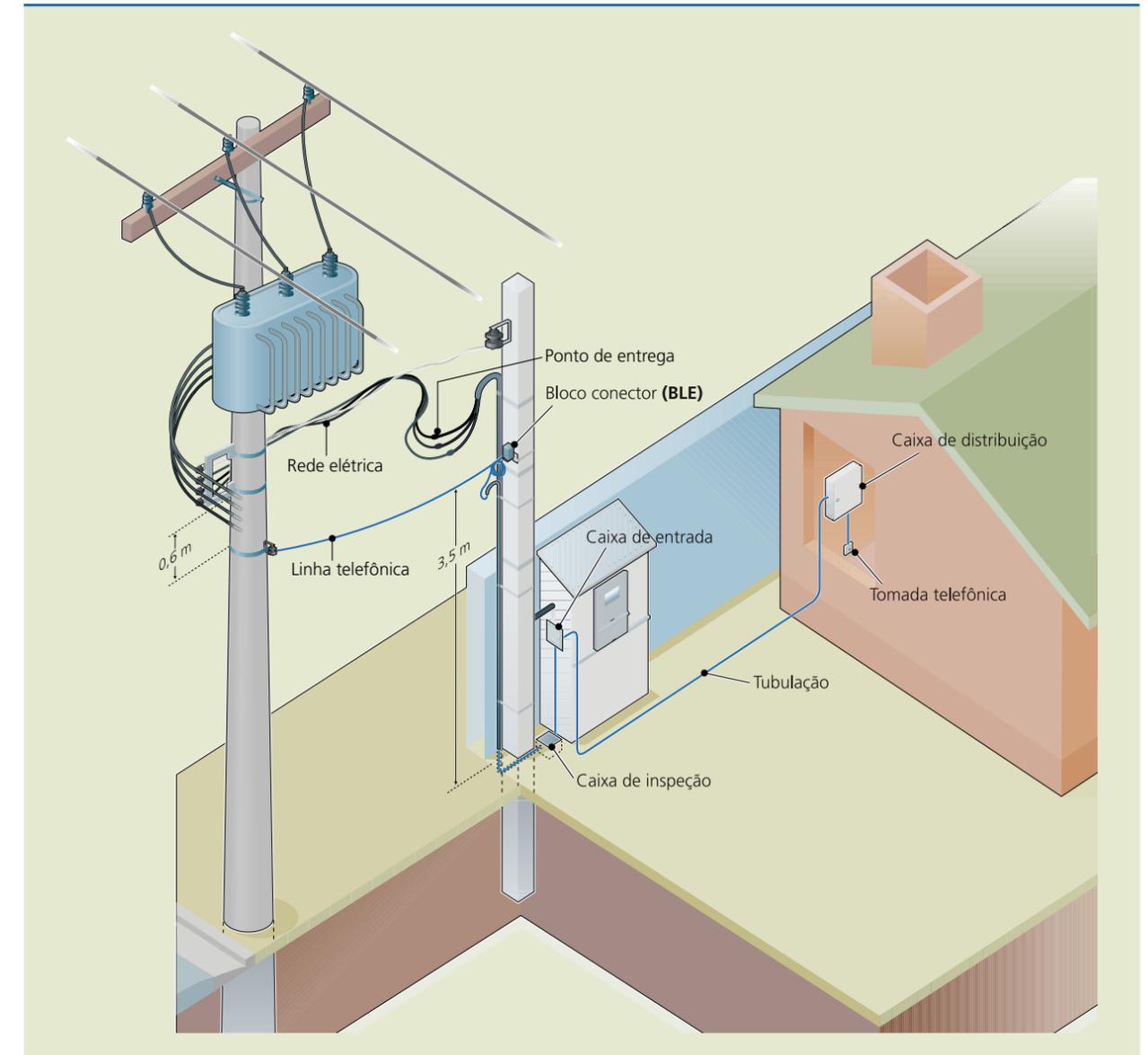
Componente	Cotação de preços		
	Qtde.	Unid. (R\$)	Total (R\$)
Disjuntor monopolar termomagnético em caixa moldada, tensão nominal de 127 V, corrente nominal de 10 A a 30 °C, 60 Hz, categoria C, capacidade de interrupção nominal em 5 kA em 127 V, de acordo com a NBR IEC 60898.	2	0,00	0,00

A aquisição dos componentes deve ser feita tomando como base a lista de material.

3.13 Projeto de instalação telefônica residencial

A entrada telefônica seria o equivalente ao padrão de entrada na instalação elétrica (figura 3.24 e tabela 3.56).

Figura 3.24
Entrada telefônica.



Afastamento mínimo da rede de energia elétrica	
Tensão da rede de energia elétrica	Afastamento mínimo
Até 600 V	0,60 m
Acima de 600 V	2 m

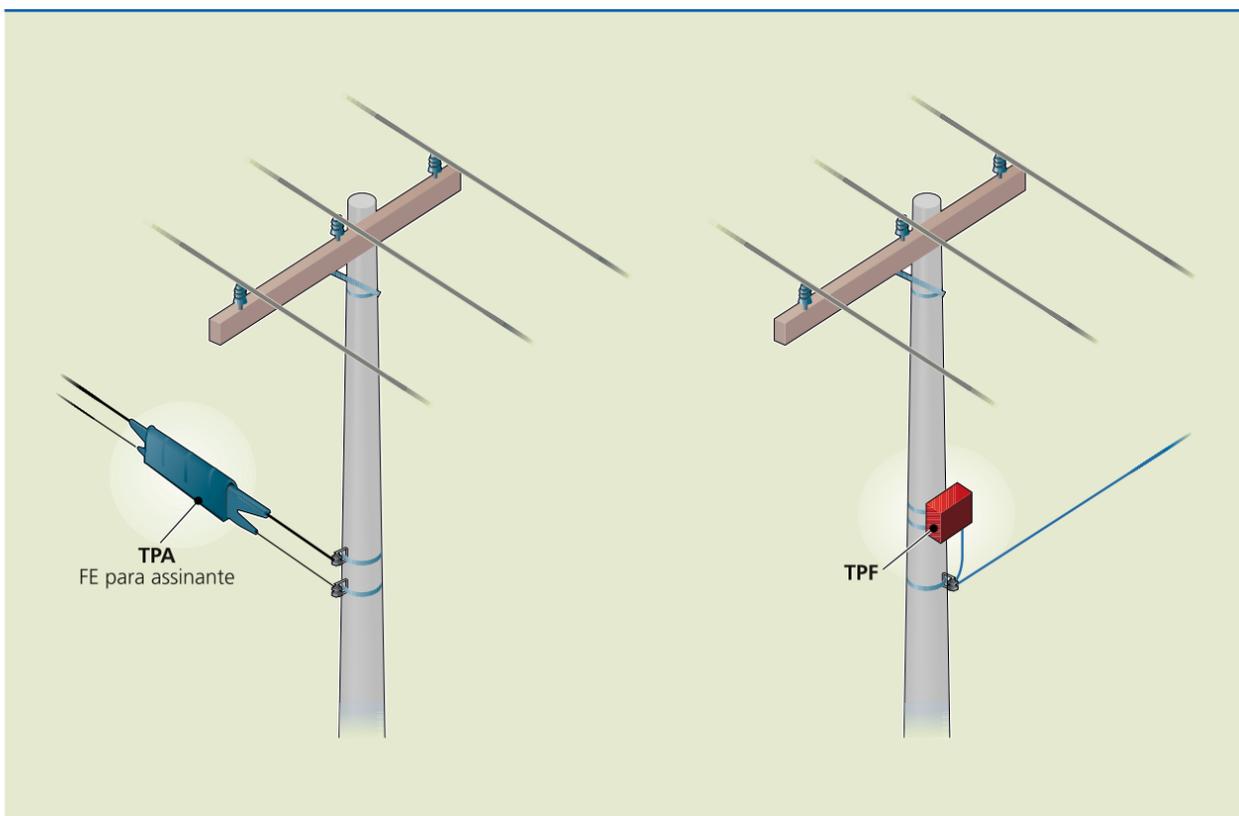
Tabela 3.56
Afastamento mínimo entre rede de energia e telefonia.
Fonte: Prática Telebrás 235-510-614



Figura 3.25

Caixa de emenda ventilada.

A **caixa de emenda ventilada (CEV)** fornece o par de fios FE que vai até a casa do assinante. Os principais tipos podem ser vistos na figura 3.25.



Quantificação de pontos telefônicos em edificações com até cinco pontos telefônicos	
Tipo de edificação	Nº de pontos
Casas com até dois dormitórios	1
Casas com três dormitórios	2
Casas com mais de quatro dormitórios	3

Tabela 3.57

Quantidade mínima de pontos de telefone.
Fonte: norma Telebrás

Quantificação de caixas para tomadas em edificações com até cinco pontos telefônicos	
Tipo de edificação	Nº mínimo de tomadas
Residencial	1 na sala 1 na copa ou cozinha 1 em cada dormitório

Tabela 3.58

Quantidade de caixas para tomadas de telefone.
Fonte: norma Telebrás

A localização das tomadas de telefonia (PT) é documentada na planta baixa (figura 3.26).

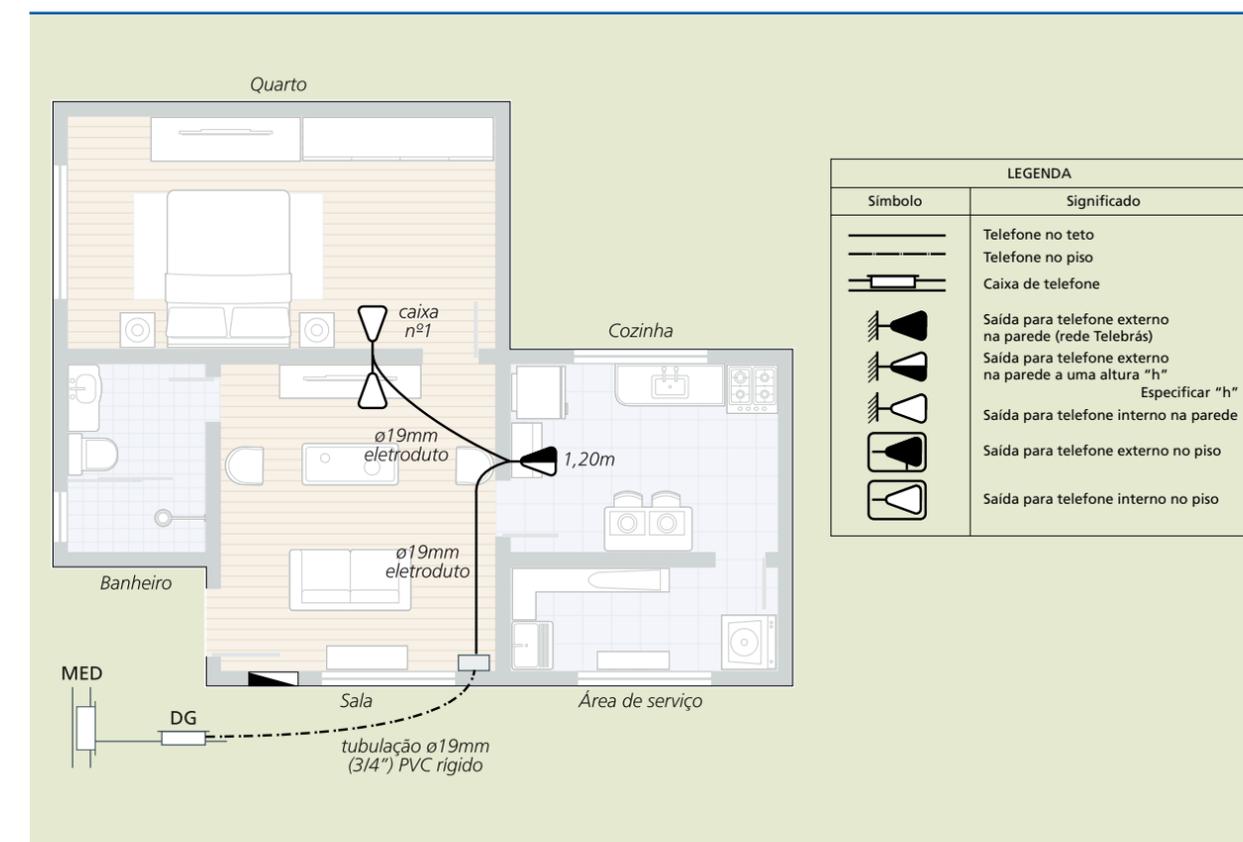
Figura 3.26

Instalação telefônica residencial.

As fases de um projeto telefônico são as seguintes:

- ART.
- Carta de solicitação de aprovação à concessionária.
- Memorial descritivo (documentação escrita).
- Planta contendo:
 - Localização e levantamento da quantidade de pontos telefônicos.
 - Localização do distribuidor geral.
 - Trajetos de eletrodutos e fios/cabos dentro da edificação.
 - Dimensionamento das tubulações.
 - Identificação dos fios/cabos telefônicos e eletrodutos.
 - Convenções.
- Esquemas verticais em edifícios (prumadas).
- Redes internas.
- Especificações.
- Lista de materiais.

Para determinarmos a localização de cada ponto telefônico, seguiremos os procedimentos da norma Telebrás (tabelas 3.57 e 3.58).

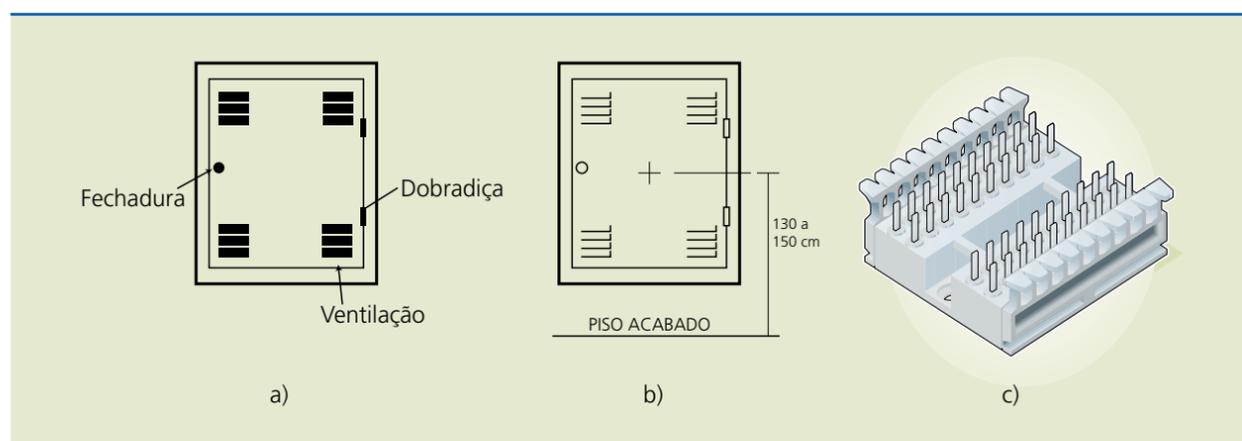


As **caixas telefônicas** são caixas metálicas providas de uma ou duas portas com dobradiças, fechadura padronizada e fundo de madeira compensada à prova d'água. Os principais tipos são: caixa de distribuição geral (DG), caixa de distribuição, caixa de passagem e caixa de saída.

No DG estão as linhas primárias que vêm da concessionária e os cabos de distribuição interna. Essas linhas servem para instalação de blocos terminais, fios e cabos telefônicos das redes interna e externa da edificação. Há blocos internos (BLI) para as redes externa e interna.

A localização do DG deve ser feita de modo a facilitar seu acesso, e seu dimensionamento depende da quantidade de linhas, ramais ou equipamentos que ele vai comportar (figura 3.27).

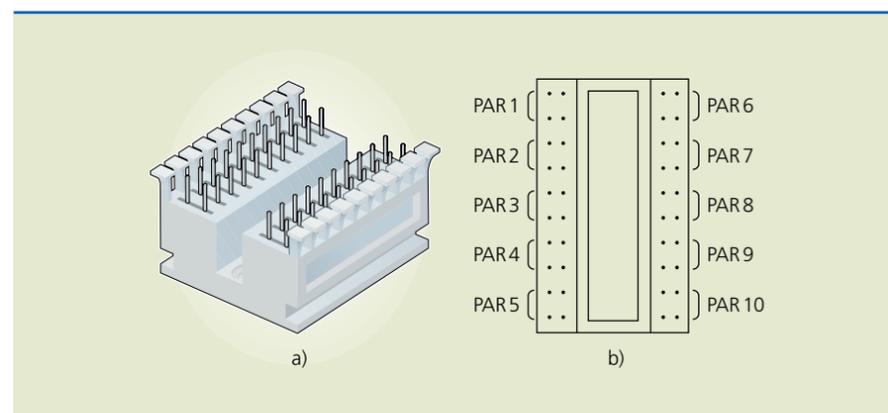
Figura 3.27
Caixa de distribuição:
(a) partes,
(b) especificação
de montagem e
(c) bloco interno.



A caixa de distribuição possui as seguintes características:

- Tem dimensões menores que o DG, mas aparência semelhante.
- É utilizada para instalação de blocos terminais, fios e cabos telefônicos da rede interna (figura 3.28).
- A numeração é feita de cima para baixo nos BLI's.
- Quando atende até seis pontos telefônicos, é considerada parte da rede secundária e somente poderão ser utilizados fios FI.

Figura 3.28
(a) Bloco terminal
e (b) ligação.



A caixa de passagem é usada para fios ou cabos telefônicos. Devem existir quantas caixas forem necessárias, distantes no máximo 18 m uma da outra, pois, em muitos casos, torna-se impossível a puxada dos cabos e fios.

As caixas de passagem podem ser de dois tipos:

- Direta: somente para a passagem de cabos telefônicos.
- Com derivação: prevista para passagem de cabos telefônicos com emendas.

As caixas de saída são utilizadas para instalação das tomadas, embutidas na parede ou no piso, semelhantes às caixas de passagem de instalações elétricas.

As **tomadas telefônicas** permitem ligar o aparelho telefônico em vários locais da residência, podendo ser instaladas em caixas de passagem ou fixadas diretamente em paredes (figura 3.29).

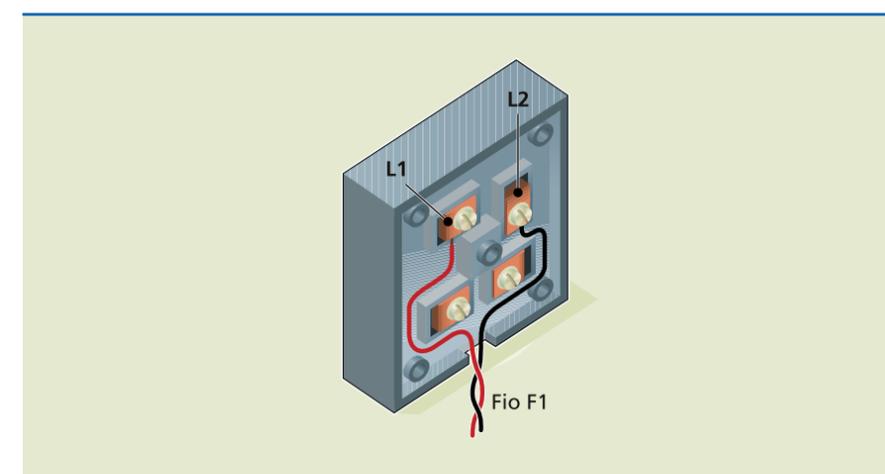


Figura 3.29
Detalhe da montagem.

Os passos para a montagem das tomadas telefônicas são os seguintes:

- Determinar o local em que será instalada a tomada (deverá ficar a 0,30 m do piso e a 0,10 m de cantos e quinas).
- Decapar aproximadamente 1,5 cm da extremidade dos dois condutores.
- Soltar os dois parafusos na frente e abrir a tomada.
- Afrouxar os parafusos da tomada dos dois pontos que não estão em paralelo.
- Fixar os condutores apertando os parafusos.
- Cortar as sobras dos condutores a fim de não causar curto-circuito nos fios da tomada.
- Fechar a tomada apertando os parafusos externos.

Os eletrodutos da instalação telefônica têm de ser independentes dos que servem a instalação elétrica, e nunca os eletrodutos da instalação elétrica devem ser aproveitados para passar os fios do telefone. Recomenda-se evitar o compartilhamento dos cabos da rede telefônica com cabos de antena ou interfone, assim como utilizar eletrodutos rígidos no lugar das mangueiras ou corrugados. O diâmetro interno da tubulação secundária deve ser de no mínimo 19 mm (figura 3.30).



Figura 3.30

Eletrodutos para telefonia.



DIMITRY GAWIKHEDIA.ORG

Pode-se usar eletroduto rígido em áreas descobertas ou externas, mas é preferível o tubo galvanizado com caixas de passagem a cada 15 m. Além disso, recomenda-se:

- Vedar com silicone todas as junções e caixas para evitar infiltração de água.
- Manter o eletroduto distante dos cabos e fios elétricos quando o cabeamento for aéreo e feito por eletrocalhas.

Os **eletrodutos secundários** são destinados à instalação da fiação telefônica interna de uma edificação. Para eletrodutos primários e secundários, o comprimento máximo é determinado de acordo com a quantidade de curvas existentes (tabela 3.59).

Tabela 3.59

Comprimento máximo dos eletrodutos.

Fonte: norma NBR 13822

Trechos		Comprimento máximo
Retilíneos	Verticais	15 m
	Horizontais	30 m
Com uma curva	Verticais	12 m
	Horizontais	24 m
Com duas curvas	Verticais	9 m
	Horizontais	18 m

O dimensionamento dos eletrodutos deve seguir a tabela 3.60.

Pares de fios na seção	Diâmetro interno (mm)	Quantidade
Até 5	19	1
De 6 a 21	25	1
De 22 a 35	38	1
De 36 a 140	50	2
De 141 a 280	75	2
Acima de 280	Usar poço de elevação	

Para dimensionar as caixas de acordo com o número de PT, consulta-se a tabela 3.61.

Caixas	Dimensão interna (cm)			Quantidade de PT
	Altura	Largura	Profundidade	
Tomada ou passagem nº 0	10	5	5	1
Tomada ou passagem nº 1	10	10	5	2
Distribuição nº 2	20	20	7	3 a 5
De entrada	20 30	15 20	7	1 e 2 3 a 5

A tabela 3.62a define as dimensões padronizadas para as caixas internas e a tabela 3.62b indica o número da caixa de acordo com o número de pontos nela acumulados.

Caixas	Dimensão interna (cm)		
	Altura	Largura	Profundidade
Nº 1	10	10	5,0
Nº 2	20	20	13,5
Nº 3	40	40	13,5
Nº 4	60	60	13,5

Tabela 3.60

Dimensionamento do eletroduto para telefonia.
Fonte: norma Telebrás

Tabela 3.61

Dimensionamento das caixas para telefonia.
Fonte: norma Telebrás

Tabela 3.62a

Dimensionamento das caixas internas para telefonia.
Fonte: norma Telebrás



Caixas	Dimensão interna (cm)		
	Altura	Largura	Profundidade
Nº 5	80	80	13,5
Nº 6	120	120	13,5
Nº 7	150	150	16,8
Nº 8	200	200	21,8

Tabela 3.62b

Pontos acumulados na caixa	Caixa de distribuição geral	Caixa de distribuição	Caixa de passagem
Até 5	Nº 3	–	Nº 2
De 6 a 21	Nº 4	Nº 3	Nº 3
De 22 a 35	Nº 5	Nº 4	Nº 3
De 36 a 70	Nº 6	Nº 5	Nº 4
De 71 a 140	Nº 7	Nº 6	Nº 5
De 141 a 280	Nº 8	Nº 7	Nº 6
Acima de 280	Sala e poço de elevação		

Para a interligação das tomadas de telecomunicações, emprega-se o fio FI 60 nos blocos terminais internos instalados nas caixas de distribuição. O fio é isolado em PVC e constituído de um par de condutores de cobre estanhado de 0,64 mm de diâmetro.

As normas aplicáveis à interligação das tomadas são as SPT 235-310-704 (Telebrás), que recomendam o fio FI 60 para uso interno na ligação de aparelhos domiciliares, instalados em tubulações ou presos em rodapés. Para rede interna, são utilizados cabos telefônicos do tipo CI, com condutores de cobre estanhado, de 0,5 mm de diâmetro (figura 3.31).

Figura 3.31



O código de cores dos cabos é apresentado na tabela 3.63.

Grupo 1	
Cor	Abreviação
Branco	Br
Vermelho ou encarnado	Vm
Preto	Pr
Amarelo	Am
Violeta ou roxo	Vt ou Rx
Grupo 2	
Cor	Abreviação
Azul	Az
Laranja	Lr
Verde	Vd
Marrom	Mr
Cinza	Cz

Tabela 3.63

Código de cores dos cabos.
Fonte: norma Telebrás

Par	Cor	Par	Cor
01	Br/Az	14	Pr/Mr
02	Br/Lr	15	Pr/Cz
03	Br/Vd	16	Am/Az
04	Br/Mr	17	Am/Lr
05	Br/Cz	18	Am/Vd
06	Vm/Az	19	Am/Mr
07	Vm/Lr	20	Am/Cz
08	Vm/Vd	21	Vt/Az
09	Vm/Mr	22	Vt/Lr
10	Vm/Cz	23	Vt/Vd
11	Pr/Az	24	Vt/Mr

Tabela 3.64

Combinações possíveis dos pares de cores.



Par	Cor	Par	Cor
12	Pr/Lr	25	Vt/Cz
13	Pr/Vd	–	–

Para a identificação da cor do par de um cabo, adota-se o seguinte o procedimento:

- De 26 a 50:
 - Subtrair 25 do número do par, obtendo, assim, um número de 01 a 25.
 - Consultar a tabela 3.62b. Ex.: Par 02 – Cor Br/Lr.
- De 51 a 75:
 - Subtrair 50 do número do par, obtendo, assim, um número de 01 a 25.
 - Consultar a tabela 3.62b. Ex.: Par 03 – Cor Br/Vd.
- De 76 a 100:
 - Subtrair 75 do número do par, obtendo, assim, um número de 01 a 25.
 - Consultar a tabela 3.62b. Ex.: Par 04 – Cor Br/Mr.

Exemplos

1) Identificar a cor do par 57 de um cabo.

Solução:

$$57 - 50 = 7 \rightarrow \text{Cor Vm/Lr}$$

2) Identificar a cor do par 235 de um cabo.

Solução:

$$235 - 225 = 10 \rightarrow \text{Cor Vm/Cz}$$

Com a finalidade de economizar fios, o trajeto entre os pontos da instalação telefônica tem de seguir o menor caminho. Para isso, é preciso determinar o trajeto da tubulação, dentro de cada parte da edificação, de modo a interligar todas as caixas de saída e projetar caixas de passagem, se estas forem necessárias, para limitar o comprimento da tubulação e/ou o número de curvas.

A **tubulação de entrada** é o eletroduto que recebe a entrada do cabo da rede externa da concessionária e que termina na caixa de distribuição geral. Para a elaboração da tubulação de entrada, é necessário definir se o cabo de entrada do edifício será subterrâneo ou aéreo.

A entrada será subterrânea:

- Quando o edifício possuir mais que 21 PT.
- Quando a rede da concessionária for subterrânea.
- Por motivos estéticos.

A entrada será aérea:

- Quando o edifício possuir 21 PT ou menos.
- Se a rede da concessionária permitir.

Recomenda-se, na fase de visita ao imóvel, verificar e determinar qual será o trajeto dos eletrodutos de entrada, desde a caixa de entrada até a de distribuição geral, se for necessário utilizar caixas de passagem.

Um sistema de **aterramento telefônico** é requerido para qualquer tipo de edificação, exceto casas, com as seguintes características, conforme norma Telebrás:

- Alta capacidade de condução de corrente elétrica (diâmetro da cordoalha de aço cobreada ou fio rígido de 6 mm de diâmetro).
- Baixo valor de resistência de aterramento, menor que 15 Ω .
- Estabilidade no valor de resistência de aterramento.
- Primeira haste situada a, no máximo, 30 m da caixa ou sala do distribuidor geral (DG).
- No caso de sistemas de aterramento distintos, afastamento de no mínimo 20 m entre eles.

Para correta instalação, medir inicialmente a resistência ôhmica do solo com um medidor de resistência de terra (terrômetro). Obtendo o valor **R** da resistência de terra (em Ω), calcula-se o valor da resistividade (ρ) pela equação:

$$\rho = 31,4R \quad (3.8)$$

Com base no valor da resistividade, verifica-se, na tabela 3.65, o número de hastes que devem ser utilizadas no aterramento (figura 3.32).

Resistividade ($\Omega \cdot m$)	Número de hastes
Até 60	2
de 61 a 140	3
de 141 a 230	4
de 231 a 380	5
de 381 a 700	5 com tratamento químico em três hastes no mínimo

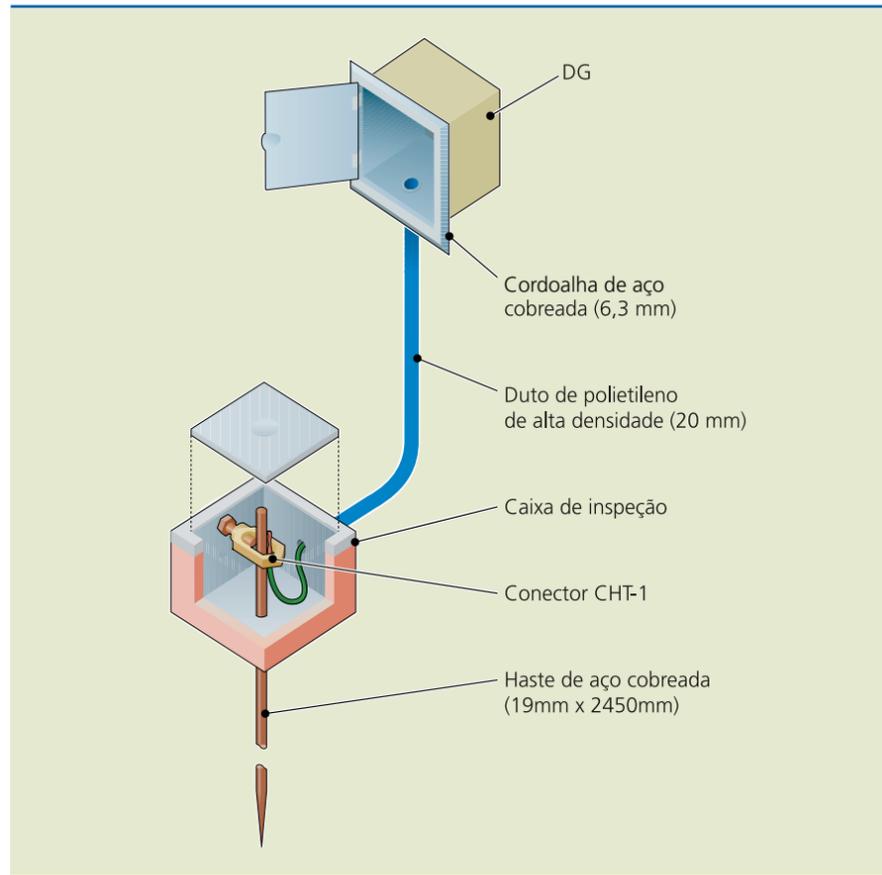
Tabela 3.65

Número de hastes a serem utilizadas no aterramento.
Fonte: Telebrás

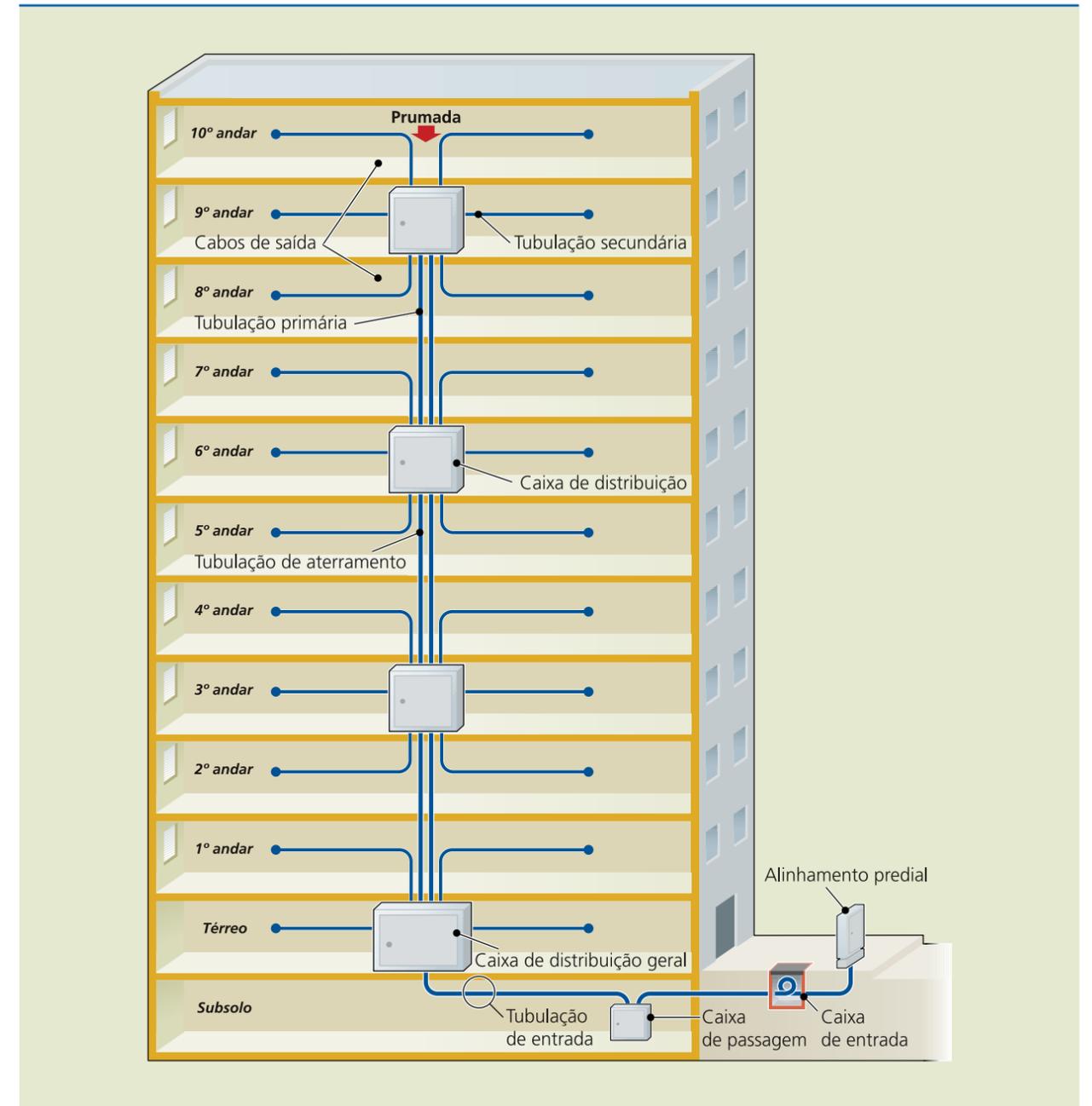


Figura 3.32

Sistema de aterramento de uma caixa de distribuição geral e conector mecânico CHT-1.



A figura 3.33 apresenta um exemplo de **prumada telefônica**. Os eletrodutos para instalação telefônica são compostos por eletrodutos primário, secundário, de entrada e de aterramento.

**Figura 3.33**

Tubulação em edifício com prumada convencional.

As normas utilizadas para redes telefônicas são as seguintes:

- NBR 13300 – Terminologia.
- NBR 13301 – Redes telefônicas internas em prédios.
- NBR 13726 – Redes telefônicas internas em prédios: tubulação de entrada telefônica.
- NBR 13727 – Redes telefônicas internas em prédios: plantas de projeto de tubulação telefônica.
- NBR 13822 – Redes telefônicas em edifícios com até cinco pontos telefônicos.
- Normas aplicáveis – SPT 235-310-704 (Telebrás).
- Normas aplicáveis – Prática Telebrás 235-510-614.



3.14 Projeto para TV a cabo

A **quantidade de pontos** para apartamentos e residências é de, no mínimo, uma caixa na sala e uma nos dormitórios.

Para as **tubulações**, o diâmetro interno dos eletrodutos de entrada e primário deve ser de no mínimo 38 mm, e o do eletroduto secundário, de no mínimo 25 mm até a primeira caixa de saída de TV a cabo. Na interligação da primeira caixa com as demais caixas de saída, pode ser utilizado eletroduto de 19 mm.

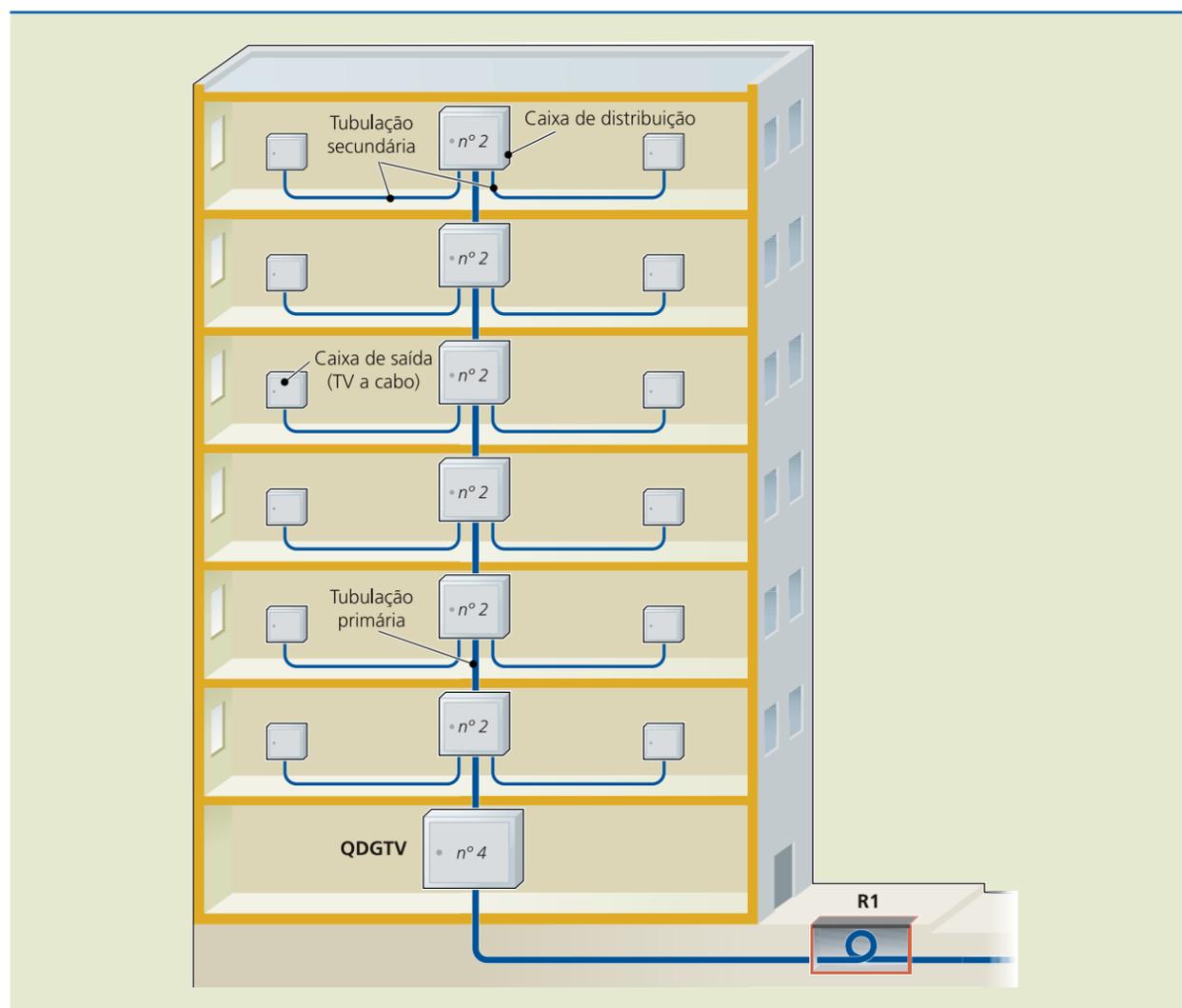
Para os **QDGTV** (quadros de distribuição geral de TV a cabo), utilizam-se caixas nº 4, de 60x60x12 cm, tomada monofásica e fio terra. Todas as caixas de distribuição, de distribuição geral e de passagem de TV a cabo devem ser instaladas a uma altura de 1,30 m do piso acabado.

Figura 3.34

Prumada de tubulação de TV a cabo em edifício.

Para **passagem e distribuição de TV a cabo**, usam-se caixas nº 2, de 30x30x12 cm.

A **prumada** de tubulação de TV a cabo pode ser vista na figura 3.34.



A localização dos pontos de TV a cabo deve ser definida na planta baixa.



Figura 3.35

Instalação de TV a cabo.

As normas que regulamentam a instalação de TV a cabo são:

- NBR 14565:2007 – Cabeamento de telecomunicações para edifícios comerciais.
- Normas e práticas Anatel.

3.15 Esquemas de aterramento

O esquema de aterramento TN-C é utilizado na distribuição para edifícios residenciais, porém, a partir do ponto de entrega, ele será convertido em um esquema TN-S. Portanto, a edificação terá como esquema de aterramento o tipo TN-C-S.

De acordo com o item 4.2.2.2 da **NBR 5410:2004**, os tipos de esquemas são TN, (variantes TN-S, TN-C-S E TN-C), TT e IT, explicados a seguir.

3.15.1 Esquema TN

O esquema TN possui um ponto de alimentação diretamente aterrado, e as massas são ligadas a esse ponto por condutores de proteção. Consideram-se três variantes de esquema TN, de acordo com a disposição do condutor neutro e do condutor de proteção, a saber:

a) Esquema TN-S, no qual o condutor neutro e o condutor de proteção são distintos (figura 3.36).

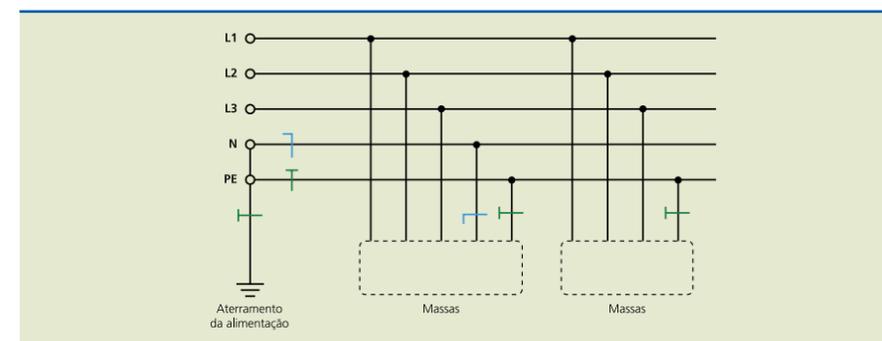


Figura 3.36

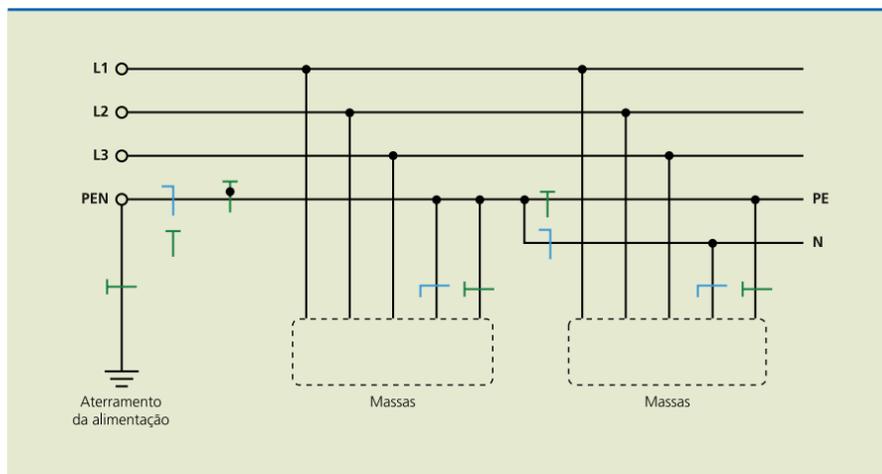
Esquema TN-S (norma ABNT NBR 5410:2004).



b) Esquema TN-C-S, em parte do qual as funções de neutro e de proteção são combinadas em um único condutor. Em um projeto elétrico predial residencial, normalmente se usa o esquema TN-C-S até o quadro do apartamento e o esquema TN-S dentro dele (figura 3.37).

Figura 3.37

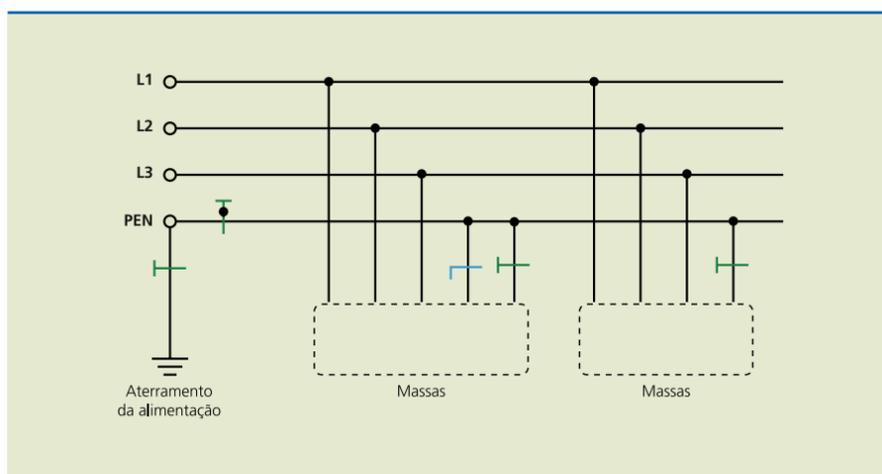
Esquema TN-C-S (norma ABNT NBR 5410:2004).



c) Esquema TN-C, no qual as funções de neutro e de proteção são combinadas em um único condutor, denominado PEN, na totalidade do esquema (figura 3.38).

Figura 3.38

Esquema TN-C (norma ABNT NBR 5410:2004).



A principal aplicação do TN-C é no sistema de distribuição de energia.

Nota: Atenção a falta fase-massa é igual a falta fase-neutro.

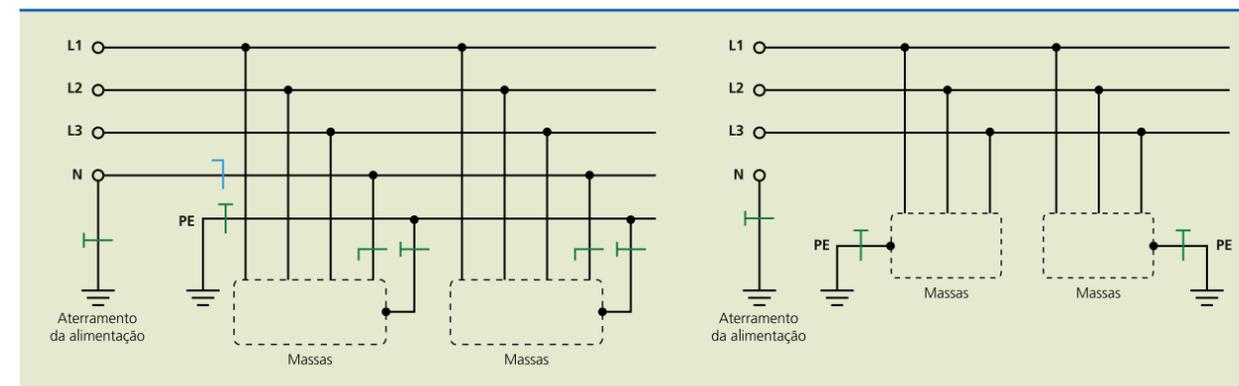
3.15.2 Esquema TT

O esquema TT possui um ponto da alimentação diretamente aterrado, estando as massas da instalação ligadas a eletrodo(s) de aterramento eletricamente distinto(s) do eletrodo de aterramento da alimentação (figura 3.39). No caso de falta direta fase-massa, as correntes resultantes dessa falta são inferiores à

corrente de curto-circuito, podendo, todavia, ser suficientes para provocar o surgimento de tensões perigosas.

Figura 3.39

Esquema TT (norma ABNT NBR 5410:2004).

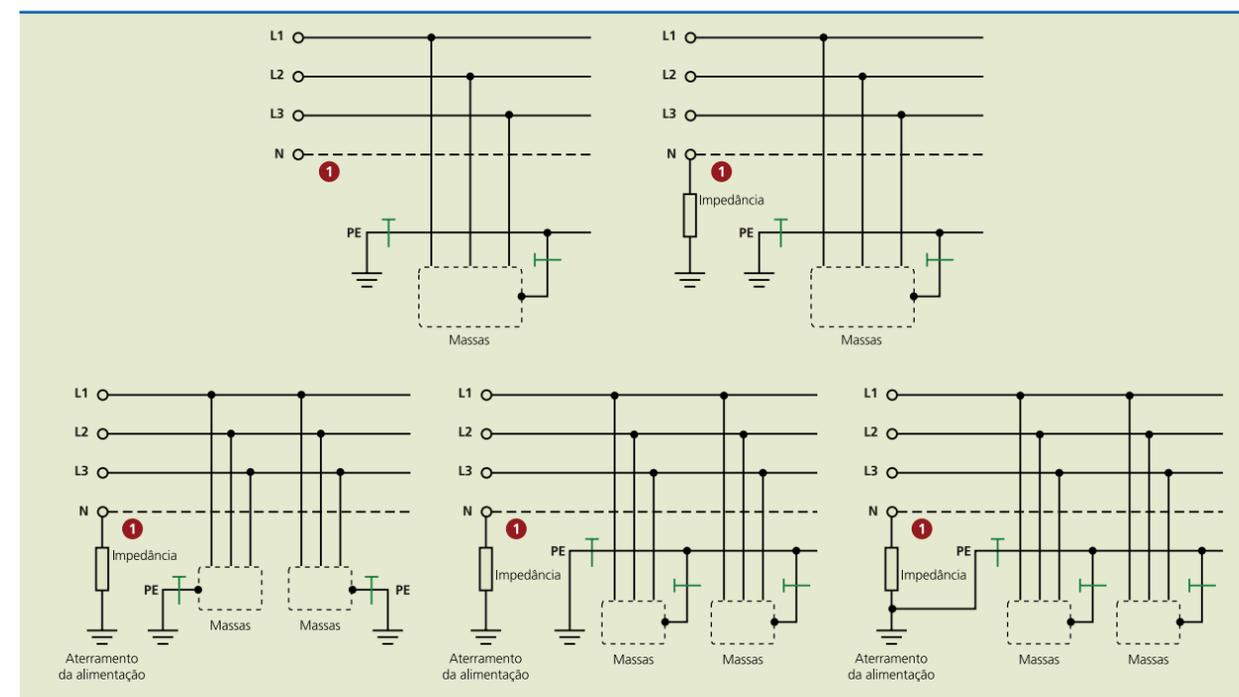


3.15.3 Esquema IT

No esquema IT, todas as partes “vivas” são isoladas da terra ou um ponto da alimentação é aterrado por meio de impedância (figura 3.40). As massas da instalação podem ser aterradas no mesmo eletrodo de aterramento da alimentação ou em eletrodo(s) de aterramento próprio(s), seja porque não há eletrodo de aterramento da alimentação, seja porque o eletrodo de aterramento das massas é independente do eletrodo da alimentação. O neutro (ou qualquer parte “viva”) é isolado (ou ligado por meio de altas impedâncias) em relação à terra (I), permanecendo aterradas independentemente as massas (T) através do condutor de proteção. No caso de uma só falta entre fase e massas, a corrente é nula ou desprezível para provocar tensões perigosas nas massas.

Figura 3.40

Esquema IT (norma ABNT NBR 5410:2004).



Cada uma das letras usadas nos sistemas de aterramento tem um significado:

a) Primeira letra – Situação da alimentação em relação à terra:

T: um ponto diretamente enterrado.

I: isolamento de todas as partes “vivas” em relação à terra ou aterramento por meio de uma impedância.

b) Segunda letra – Situação das massas da instalação em relação à terra:

T: massas diretamente aterradas, independentemente do aterramento eventual de um ponto de alimentação.

N: massas ligadas diretamente ao ponto de alimentação aterrado (em corrente alternada, o ponto aterrado é normalmente o ponto neutro).

c) Outras letras (eventuais) – Disposição dos condutores neutro e de proteção:

S: funções de neutro e de proteção asseguradas por condutores distintos.

C: funções de neutro e de proteção combinadas em um único condutor (PEN).

3.15.4 Aterramento elétrico

Para o funcionamento eficiente dos dispositivos de proteção e segurança, os elementos básicos da instalação elétrica devem ser adequadamente dimensionados:

- Condutor de neutro.
- Condutor de proteção.
- Aterramento.

O aterramento elétrico tem a finalidade de proteger tanto a instalação elétrica como as pessoas que a utilizam, por meio da ligação intencional com a terra. Dois tipos de aterramento são usuais nas instalações elétricas:

- **Aterramento funcional** – É a ligação à terra de um dos condutores, geralmente o neutro, e está diretamente relacionado ao perfeito funcionamento da instalação, tornando-o confiável.
- **Aterramento de proteção** – É a ligação à terra das massas e dos elementos condutores estranhos à condução e está diretamente relacionado à proteção contra choques elétricos por contato indireto.

A NBR 5419:2005 exige que se mantenha uma resistência de terra menor que 10Ω (item 5.1.3.3.2), mas, para conseguir isso, a norma determina que se levem em conta o tipo de solo e as opções de aterramento.

Deve-se lembrar que o eletrodo de aterramento é um componente da edificação, pois faz parte da distribuição elétrica.

A NBR 5410:2004 trata, no item 3.3, da proteção contra choques elétricos e contra sobretensões e perturbações eletromagnéticas. A interligação de

elementos especificados – todos os barramentos e infraestrutura – ao eletrodo de aterramento deve ser feita para obter a equipotencialização necessária para os fins de proteção contra choques elétricos e contra sobretensões e perturbações magnéticas. Determinada equipotencialização pode ser satisfatória para proteção contra choques elétricos, mas insuficiente para proteção contra perturbações eletromagnéticas.

Nota

O valor da resistência de terra para as instalações elétricas é de 10Ω , mas para instalações de equipamentos de tecnologia da informação é de no máximo 5Ω .

3.15.5 Aterramento elétrico residencial

As normas ABNT NBR 5410:2004 – Instalações elétricas de baixa tensão, NBR 5419:2005 – Proteção de estruturas contra descargas atmosféricas e NBR 13571:1996 – Haste de aterramento aço-cobreada e acessórios são algumas referências para dimensionar e projetar o aterramento.

O aterramento residencial tem como objetivo garantir a segurança de pessoas e animais contra choques elétricos. Para que seja eficiente, é necessário que todo o circuito elétrico disponha de condutor de proteção, também conhecido como fio terra. A execução do aterramento é simples, mas exige materiais adequados e conexões elaboradas corretamente (figura 3.41).

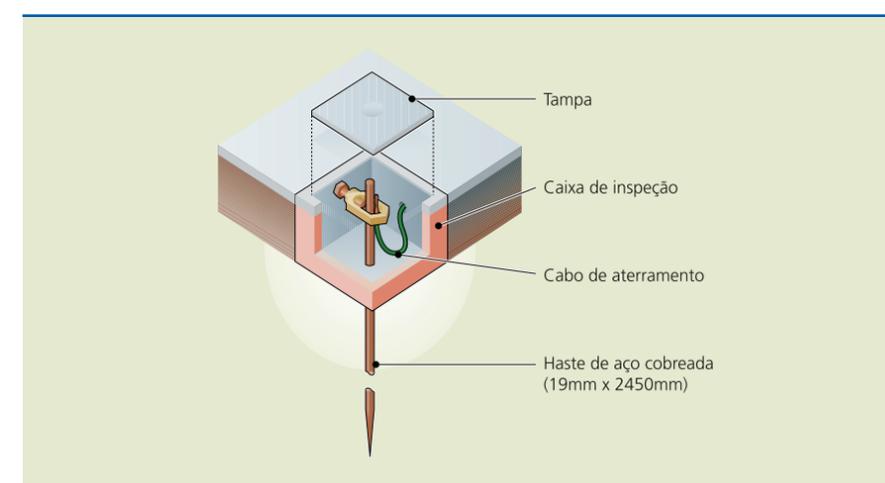


Figura 3.41

Maneira mais simples e correta de instalar o fio terra em uma residência.

Os materiais necessários para aterramento são:

- Caixa de inspeção.
- Haste de aterramento de aço cobreado com diâmetro mínimo de $5/8''$ (15 mm), revestida de cobre pelo processo de deposição eletrolítica com camada mínima de 0,254 mm (alta camada) e mínimo de 2,40 m de comprimento.



- Conectores do tipo cabo haste ou grampo.
- Condutor na cor verde-amarelo ou verde.
- terminal à pressão.

O fio de proteção nas cores verde ou verde-amarelo deve ser instalado de acordo com a NBR 5410:2004.

Figura 3.42

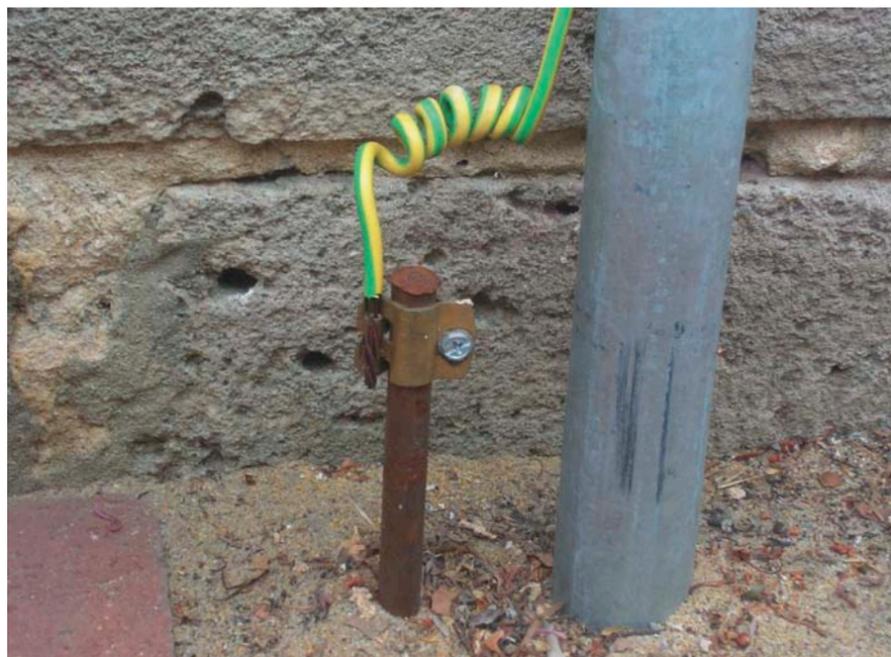


O tipo de solo no qual será executada a fixação da haste deve ser adequado para receber a descarga elétrica proveniente do circuito. Os solos úmidos são melhores e os secos e rochosos exigem tratamentos específicos.

3.15.6 Emprego do sistema de aterramento para múltiplas funções

Figura 3.43

Aterramento único (norma ABNT NBR 5410:2004).



BEP (barramento de equipotencialização principal)

- condutor de aterramento;
- condutores de proteção principais;
- condutores de equipotencialidade principais;
- condutor neutro, se disponível;
- barramento de equipotencialidade funcional (ver 6.4.8.5), se necessário;
- condutores de equipotencialidade ligados a eletrodos de aterramento de outros sistemas (por exemplo, SPDA).

3.15.7 Conexões aos eletrodos

Para conexões aos eletrodos, podem ser utilizados os seguintes dispositivos:

- **Dispositivos mecânicos** – São dispositivos de simples instalação e podem ser desconectados para medição de resistência de aterramento. Apresentam desempenho satisfatório, porém às vezes sofrem corrosão. Se devidamente protegidos, apresentam vida útil longa e permitem inspeção e manutenção da fiação.
- **Conexões por compressão** – São de fácil instalação e apresentam baixa resistência de contato, porém não podem ser desconectadas para medição de resistência de aterramento.
- **Solda exotérmica** – Esse método realiza uma conexão permanente e praticamente elimina a resistência de contato e os problemas de corrosão, sendo ideal para ligações diretamente no solo. Requer o emprego de mão de obra especializada e não pode ser utilizada em locais em que haja misturas explosivas.

3.15.8 Ligação equipotencial

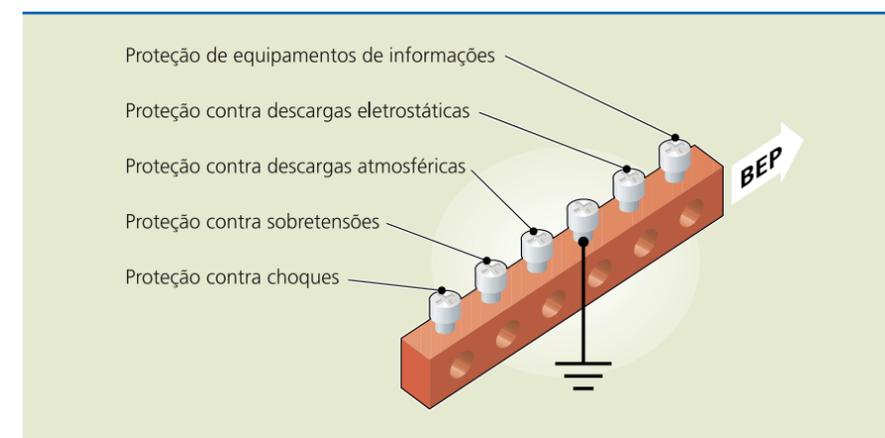


Figura 3.44

Esquema de ligação equipotencial principal.

3.16 Instalações de redes de dados em residências

Atualmente, a infraestrutura predial e residencial deve ser concebida e projetada seguindo normas específicas para contemplar as antigas instalações elétricas e atuais instalações de sinais de comunicações.



Um projeto adequado do cabeamento estruturado é fundamental para que os sinais de comunicações sejam devidamente transmitidos ao destino sem sofrer interferências da rede de energia elétrica.

O principal conceito para residências é um cabeamento estruturado com a finalidade de permitir a automação, controle e transmissão de sinais com garantia de flexibilidade, conveniência e conforto perante essas mudanças de tecnologias. Para isso, é preciso implantar um cabeamento genérico, de telecomunicações e de sinais de controle, para prover uma distribuição interna de cabos de alta performance.

Para que essa rede seja implantada, atenda aos requisitos mínimos de tais sistemas e permita o funcionamento dos equipamentos adequadamente, é necessário um planejamento prévio, que siga as recomendações da norma. Nesse caso, não se ficará dependente do tipo de equipamento a ser utilizado, pois a infraestrutura terá condições de atender aos requisitos da maior parte dos equipamentos.

A norma que, no Brasil, trata do cabeamento residencial é a ANSI/TIA/EIA 570A – Residential Telecommunications Cabling Standard – 1999. Ela define padrões e referências para o correto dimensionamento de um cabeamento residencial e especifica os subsistemas que o compõem, entre os quais: tipos de cabos, tipos de conectores, requisitos de espaços e encaminhamentos de distribuição.

Essa norma estabelece dois graus de distribuição interna de cabeamento, baseados em serviços e sistemas que poderão ser suportados dentro de cada residência. Para determinar o grau de um sistema de cabeamento residencial, é preciso conhecer as reais aplicações para o ambiente.

O grau 1 provê um cabeamento básico, que atinge os requisitos mínimos para serviços de telecomunicações (telefonia, dados e televisão). A norma recomenda a utilização de um canal UTP (cabo de par trançado não blindado) de categoria 3 (performance mínima) e um canal coaxial (série 6) por tomada (tabela 3.66).

O grau 2 provê um cabeamento que atende aos requisitos atuais (básicos) e também aos futuros serviços de telecomunicações multimídia. Deve prever ainda maior quantidade de equipamentos e necessita de maior capacidade de transmissão. A norma recomenda o uso de dois canais UTP de categoria 5 e/ou superior, dois canais coaxiais (série 6) e, como opcional, um par de fibras ópticas por tomada (tabela 3.66).

Tabela 3.66

Grau de um sistema de cabeamento residencial.
Fonte: ANSI/TIA/EIA 570A

Serviços residenciais típicos suportados por grau		
Serviço	Grau 1	Grau 2
Telefone	X	X
Televisão	X	X
Dados	X	X
Multimídia		X

Cabeamentos residenciais reconhecidos por grau		
Cabeamento	Grau 1	Grau 2
UTP 4 pares	Categoria 3	Categoria 5 (recomendada)
	Categoria 5 (recomendada)	Categoria 5e (recomendada)
Coaxial	X	X
Fibra óptica		Opcional

A instalação deve ser feita com o máximo de cuidado, observando as técnicas corretas, para o adequado funcionamento de todos os componentes. Portanto, é necessário:

- Prever as instalações de entrada de acordo com o tamanho do projeto e das exigências das concessionárias locais. Nessa entrada, considerar a chegada do cabo da companhia telefônica, dos cabos provenientes da TV a cabo, de dados etc.
- Providenciar um sistema de proteção e aterramento adequados.
- Utilizar todos os componentes de mesma categoria.
- Evitar extensões e/ou emendas nos cabos.

As normas que regulamentam a instalação de redes de dados em residências são:

- ANSI-J-STD 607-A – Aterramento.
- ANSI/EIA/TIA 606-A – Administração da infraestrutura de telecomunicações em edifícios comerciais.
- NBR 14565 – Elaboração de projetos de cabeamento de telecomunicações para rede interna estruturada.

3.17 Ferramentas computacionais

Apresentam-se a seguir alguns programas disponíveis no mercado para projetos de instalações elétricas e telefônicas, cabeamentos estruturados, cálculos luminotécnicos e outros.

- **AutoCAD** – *Software* gráfico de CAD, para desenhos do projeto elétrico.
- **Softlux** – Para cálculos luminotécnicos com métodos de cavidades zonais e ponto a ponto.
- **AltoQi Lumine** – Programa integrado para elaboração de projetos de instalações elétricas prediais e cabeamento estruturado.
- **Excel** – Para cálculos de demanda e dimensionamento.
- **Electrical Designer – Quadro de Comandos e Esquemas Elétricos** – Para projetos de painéis e quadros de comando.
- **CADDPROJ Elétrica** – Para projetos de instalações elétricas, telefonia, TV, interfone, som, alarme e lógica.



3.18 Ferramentas, equipamentos e materiais

As principais ferramentas, equipamentos e materiais utilizados em instalações elétricas são:

- Alicates de bico redondo ou cônico
- Alicates de bico meia-cana
- Alicates de corte diagonal ou lateral
- Alicates universal
- Alicates descascador de fios
- Alicates de compressão
- Chave de fenda
- Arco de serra ou serra para metais
- Brocas
- Furadeira elétrica portátil
- Parafusadeira elétrica portátil
- Canivete – estilete
- Talhadeira
- Ponteiro
- Limas
- Esmeril
- Maçarico a gás
- Soprador térmico
- Ferro de soldar ou soldador elétrico
- Tarraxa
- Torno comum de bancada
- Torno de encanador
- Lixa
- Escada
- Metro articulado e trena
- Fitas e cabos de aço para enfição
- Ferramentas de curvar eletrodutos metálicos rígidos
- Teste de corrente elétrica
- Máquina de cortar paredes

Figura 3.45



3.19 Emendas em instalações

Para efetuar emendas em instalações, recomenda-se as técnicas a seguir.

- **Prolongamento de condutores** – Descape as extremidades dos condutores e após a execução, isole a emenda com fita isolante.

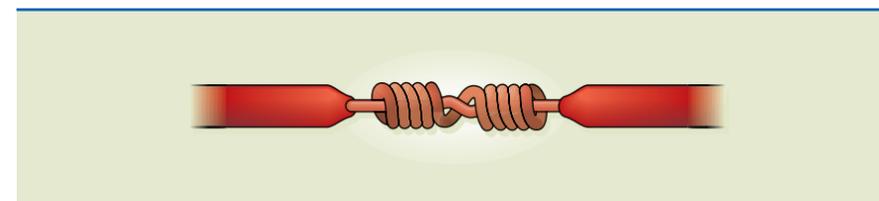


Figura 3.46

Prolongamento de condutores.

- **Condutores em derivação** – Descape as extremidades dos condutores e proceda como mostra a figura 3.46. Após a execução, isole a emenda com fita isolante.

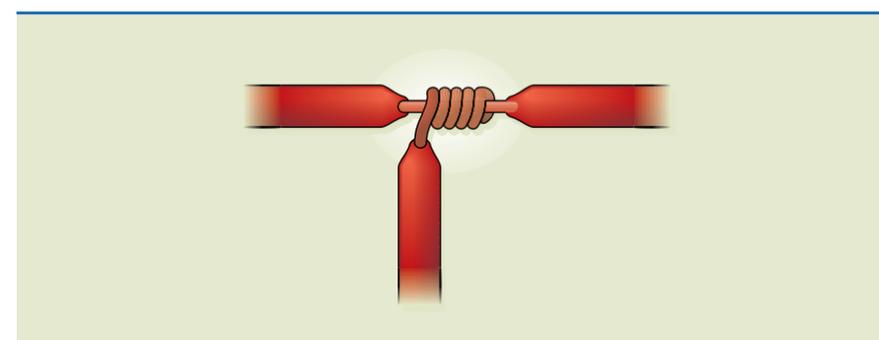


Figura 3.47

Condutores em derivação.

Conectores e derivadores para emendas – São dispositivos que fazem ligação elétrica entre condutores. São utilizados para eliminar ou reduzir fugas de corrente provocadas por emendas ou outros tipos de conexões.



Capítulo 4

Motores eléctricos



4.1 Breve histórico

Os dispositivos que convertem energia elétrica em energia mecânica de rotação são conhecidos como motores elétricos. Com as descobertas das relações entre eletricidade, magnetismo e movimento, foi possível desenvolver motores elétricos de corrente contínua e alternada, monofásico e trifásico.

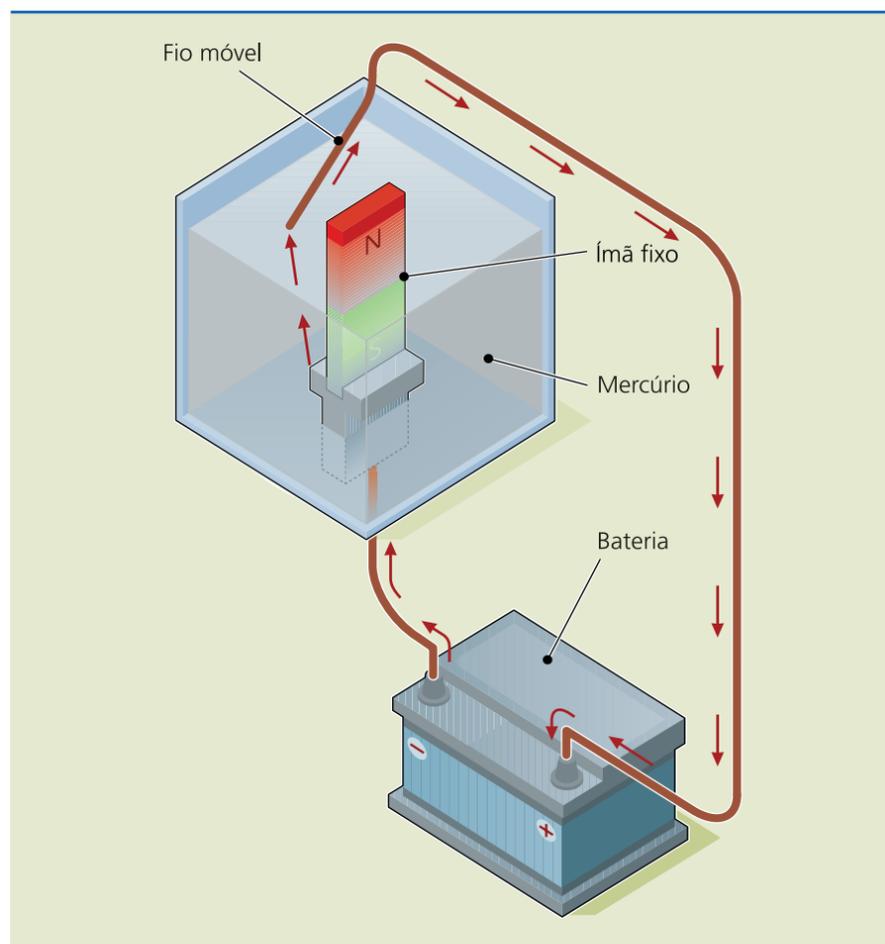
A base de funcionamento dos motores elétricos é o princípio da força magnética: um circuito indutor, chamado **estator**, produz um campo magnético fixo para que o circuito induzido, denominado **rotor**, entre em movimento ao ser percorrido por corrente elétrica.

Um dos pioneiros na pesquisa dos motores elétricos foi Michael Faraday. Em 1822, durante seus experimentos, ele observou a manifestação de um movimento circular ao montar um circuito em série com uma pilha de corrente contínua, ímãs e dois recipientes cheios de mercúrio.

Em um dos recipientes, Faraday prendeu um ímã em forma de barra na posição vertical e manteve um fio móvel mergulhado no mercúrio. Ao fechar o circuito, nele se estabeleceu corrente elétrica e o fio móvel passou a girar ao redor da barra magnetizada (figura 4.1).

Figura 4.1

Experimento de Faraday com ímã fixo e fio móvel.



No outro recipiente, Faraday manteve o fio fixo e o ímã móvel. Assim, ao fechar o circuito, o ímã passou a girar ao redor do fio fixo (figura 4.2). Faraday atribuiu esses movimentos à ação do campo magnético.

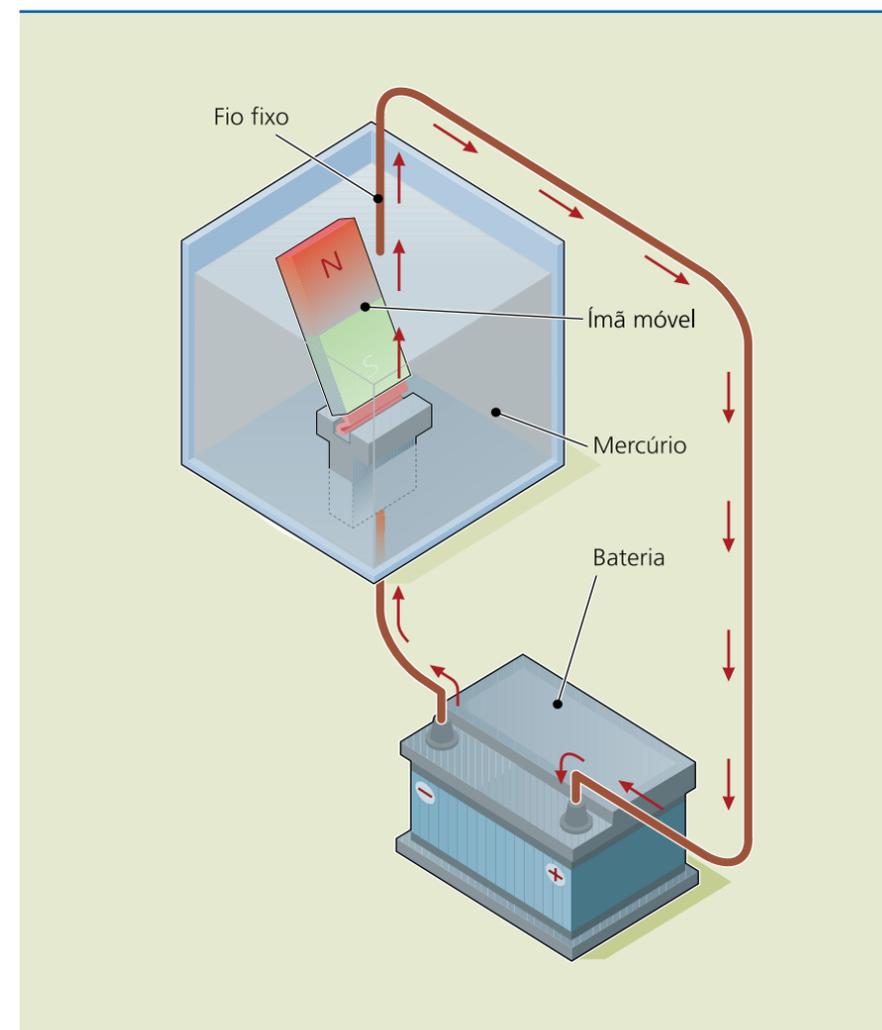


Figura 4.2

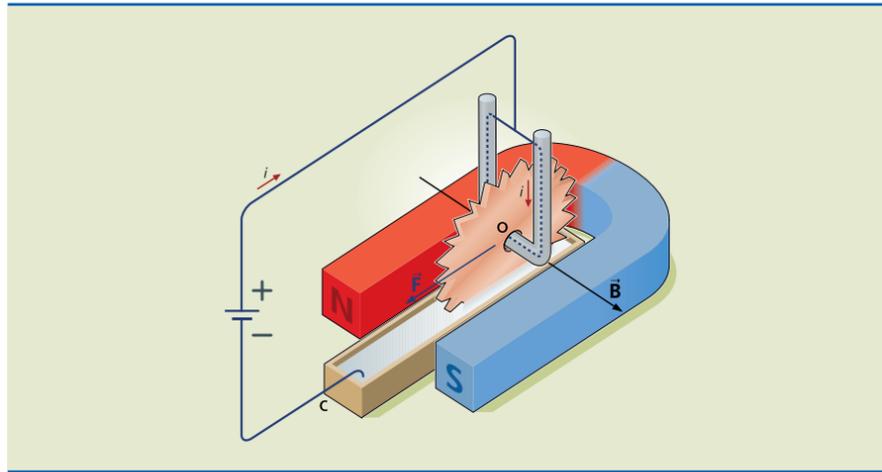
Experimento de Faraday com ímã móvel e fio fixo.

Alguns anos mais tarde, em 1828, Peter Barlow desenvolveu o primeiro motor elétrico, conhecido como **roda de Barlow** (figura 4.3). Trata-se de uma roda metálica com dentes imersos em um recipiente cheio de mercúrio. A roda fica suspensa por um eixo horizontal sob a ação de um campo magnético uniforme, originário de um ímã em forma de ferradura. Ao se aplicar uma diferença de potencial fornecida por uma bateria, uma corrente i se estabelece, percorrendo a roda e o mercúrio. Nessas condições, surge uma força magnética com direção e sentido, resultante da interação entre os campos magnéticos do ímã permanente e da corrente elétrica, que faz a roda girar.

Na roda de Barlow, o circuito elétrico sempre estará fechado, pois os dentes da roda estão imersos no mercúrio. Para inverter o sentido de rotação da roda, deve-se inverter o sentido da corrente elétrica e, para isso, é necessário inverter os polos da bateria.



Figura 4.3
Roda de Barlow.

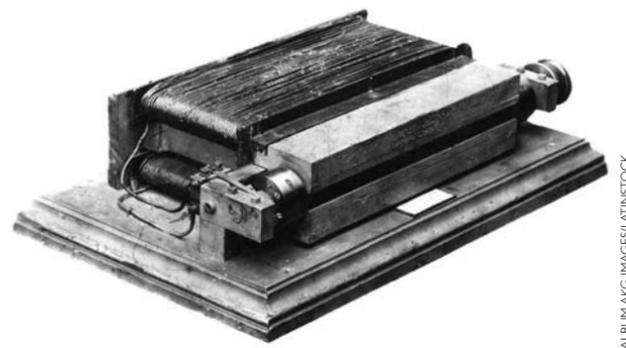


Em 1833, W. Ritchie montou um experimento mais sofisticado, composto por fios enrolados ao redor de um núcleo de ferro girando ao redor de um ímã permanente. Esse conjunto, ao ser energizado, conseguiu realizar giros completos ao redor de um eixo. Tal façanha foi possível porque no dispositivo havia uma peça que possibilitava inverter o sentido da corrente que circulava nos fios cada vez que completava 180° de giro. Assim, W. Ritchie inventou o **comutador**, responsável pela inversão da corrente na bobina (rotor), de maneira que o giro de 360° se complete.

Todos os experimentos feitos até então utilizavam ímã permanente para gerar campo magnético fixo. A substituição do ímã permanente por um eletroímã foi proposta em 1841, por Charles Wheatstone e William Fothergill Cooke, ao agruparem os enrolamentos do circuito induzido em forma de bobina. A substituição do ímã permanente pelo eletroímã foi um avanço fundamental para que os motores adquirissem maior potência.

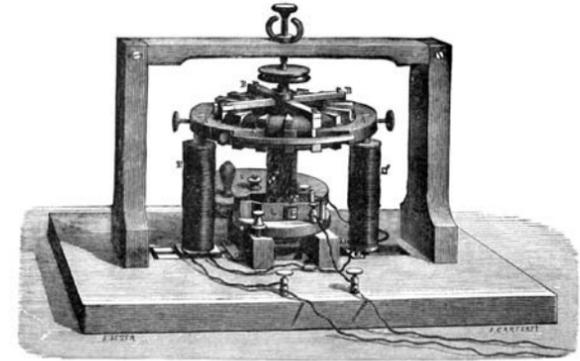
Em 1866, Werner Siemens, utilizando um eletroímã, criou uma máquina que transformava energia mecânica em elétrica (figura 4.4), chamada **gerador CC** ou **dínamo**. Ela possuía a capacidade de se autoinduzir, porque retirava do próprio enrolamento do rotor a tensão necessária para gerar o magnetismo. Quando se aplicava uma tensão elétrica contínua em seus terminais, o rotor entrava em movimento, característica semelhante, portanto, à do motor elétrico.

Figura 4.4
O primeiro dínamo elétrico (1866).



ALBUM AKG-IMAGES/LATINSTOCK

Figura 4.5
Dínamo de Pacinotti.



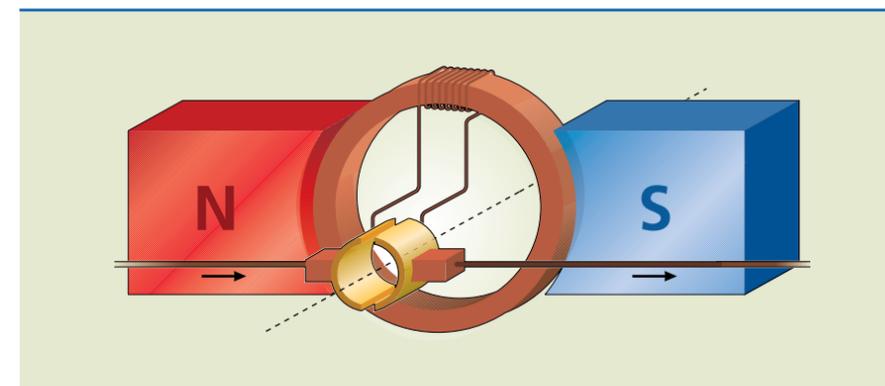
O dínamo ilustrado na figura 4.5 foi desenvolvido pelo italiano Antonio Pacinotti, porém, de acordo com alguns historiadores, ele apresentou o invento a uma oficina para obter a patente e o proprietário, o belga Zénobe-Théophile Gramme, patenteou-o, mas com seu nome, em 1871, depois de realizar alguns melhoramentos.

Figura 4.6
Dínamo de Gramme.



Como se observa na figura 4.6, o grande anel na parte superior da máquina de Gramme é um ímã permanente. Na parte inferior, há um ímã e, entre os polos do ímã, um disco preso a uma manivela. Próximo a essa manivela, encontram-se bobinas constituídas de fios de cobre com espiras em volta de um núcleo de ferro de formato circular, conforme ilustra a figura 4.7.

Figura 4.7
Representação da parte inferior do dínamo de Gramme.



Ao girar a manivela, as espiras de cobre atravessam o campo magnético uniforme, gerando, então, corrente elétrica. Sabe-se que, pelo princípio da indução eletromagnética, essa corrente será alternada, mas, com o uso do comutador, a corrente obtida era contínua.

Pulsação é a grandeza simbolizada por ω na equação da corrente. Representa a velocidade angular.

No entanto, com apenas uma bobina, a corrente contínua gerada apresenta **pulsação** muito elevada. Para solucionar o problema, Gramme utilizou 16 bobinas, combinadas em oito pares, resultando em uma tensão e corrente contínuas quase constantes, como mostra a figura 4.8.

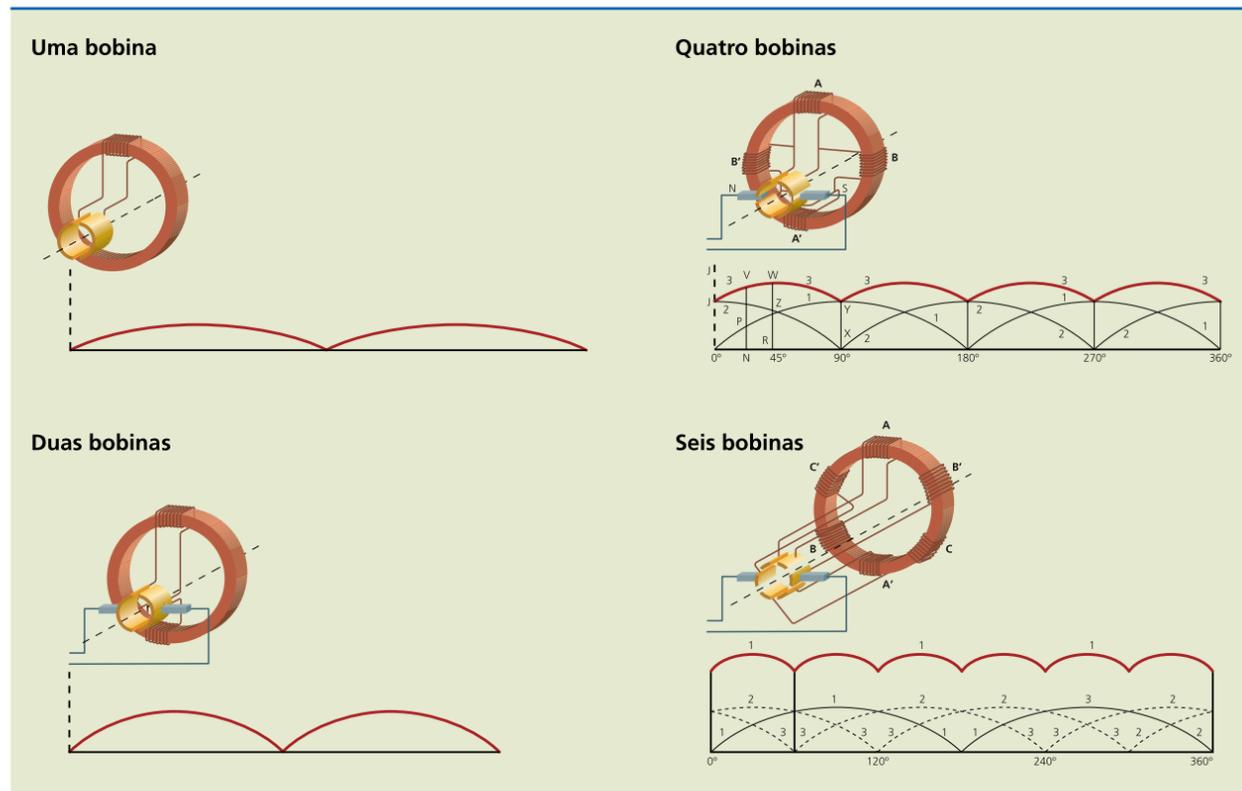


Figura 4.8
Aumento do número de polos de um dínamo.

Vale salientar que o dínamo de Gramme também poderia ser usado como motor CC, bastando para isso alimentá-lo com corrente contínua.

O dínamo de Gramme foi usado em diferentes aplicações práticas, como para acender as luzes de faróis, nas fábricas e no processo de galvanização de metais. Graças a esse sucesso, Gramme passou a ser conhecido como o inventor do primeiro dínamo capaz de produzir corrente contínua a ser utilizado na prática. É interessante salientar que o fornecimento da energia mecânica para fazer o dínamo funcionar era obtido das máquinas a vapor desenvolvidas por James Watt.

Não demorou muito tempo para que se tentasse substituir as máquinas a vapor por motores elétricos. Em 1879, surgiu a primeira locomotiva elétrica, com potência de 2 kW, porém o motor elétrico ainda apresentava desvantagens quando comparado com as máquinas térmicas, entre elas o uso de comutador, de elevado custo de fabricação.

Além das pesquisas para tentar aperfeiçoar os motores CC, iniciou-se também o desenvolvimento de motores que utilizassem corrente alternada (a primeira máquina CA havia sido construída em 1832, pelo italiano S. Dal Negro), assim como o estudo e a aplicação do princípio do campo magnético girante, por Galileu Ferraris.

Finalmente, em 1883, Nikola Tesla desenvolveu o primeiro gerador de corrente alternada. Com base nesse modelo, a empresa Westinghouse passou a construir enormes geradores de energia elétrica com capacidade suficiente para aproveitar, por exemplo, a energia hidráulica das cataratas do Niágara e transformá-la em energia elétrica. Tesla também estudou e desenvolveu máquinas com sistema polifásico.

Comparado com o gerador de corrente contínua, o gerador de corrente alternada é mais simples de ser fabricado, mais silencioso, mais seguro e de baixa manutenção.

Em 1891, o russo Michael von Dolivo-Dobrovolski, que dois anos antes havia patenteado o motor trifásico com rotor de gaiola (figura 4.9), inaugurou uma fábrica em série de motores assíncronos.

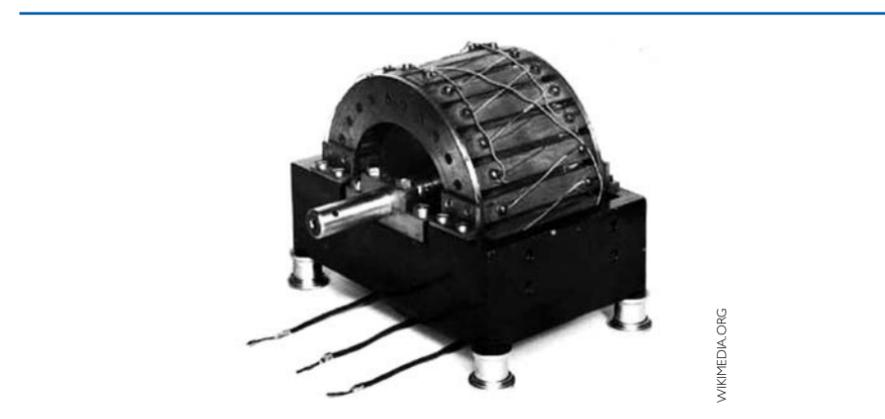


Figura 4.9
O primeiro motor trifásico com rotor de gaiola.

4.2 Motores de corrente contínua

O motor de corrente contínua funciona segundo o princípio da força magnética: quando dois campos magnéticos interagem, manifesta-se uma força de natureza magnética.

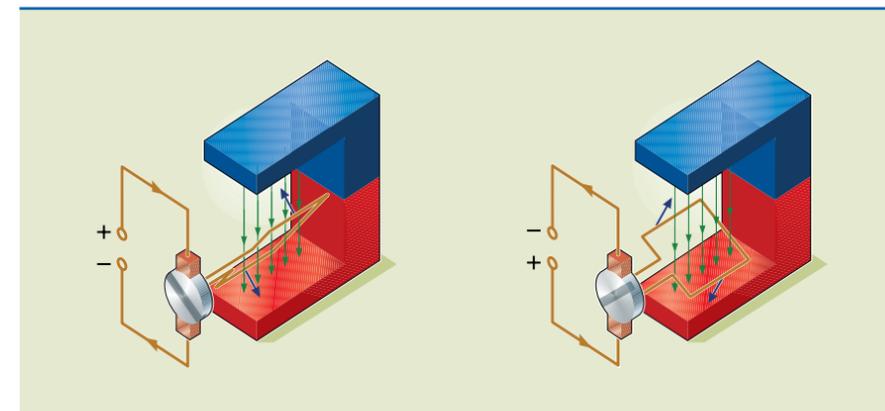


Figura 4.10
Princípio de funcionamento do motor CC.



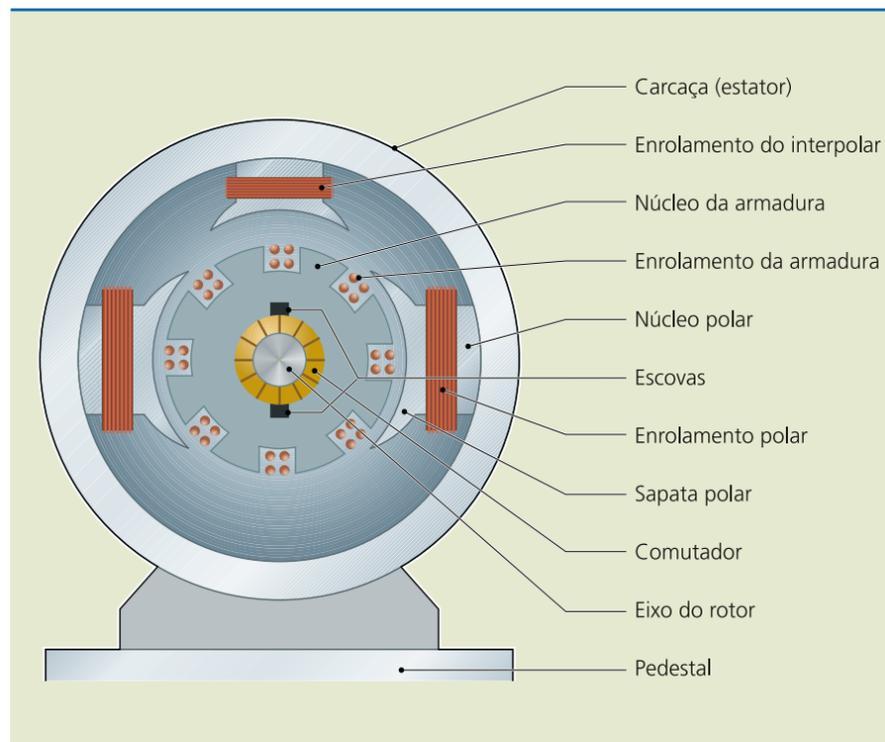
Como se pode notar na figura 4.10, ao fornecer corrente elétrica à espira – que representa o rotor –, seu campo magnético interage com o campo magnético do ímã permanente – que representa o estator –, estabelecendo um binário de forças que põe a espira em movimento.

Graças ao comutador, a corrente inverte de sentido na espira, fazendo com que ela continue girando. A velocidade do giro é determinada pelo número de rotações do eixo em relação ao tempo (rpm). O torque produzido é proporcional à intensidade do campo magnético e ao valor da corrente elétrica no rotor, também conhecido como armadura.

A figura 4.11 mostra detalhes internos de um motor CC.

Figura 4.11

Detalhes internos de um motor CC (corte frontal).



Para entender as partes que formam o motor, consideramos que ele é formado por estator e rotor.

No estator, encontram-se os seguintes componentes:

- **Carcaça** – Serve como suporte dos demais componentes e também fecha o circuito magnético, pois fornece o retorno do fluxo magnético.
- **Enrolamento de campo** – Gera a força magnetomotriz (f.m.m.) necessária à produção do fluxo magnético para gerar o movimento.
- **Polos** – São as ranhuras soldadas na carcaça, que recebem os enrolamentos de campo.
- **Escovas** – Consistem em dois pedaços de grafite que ficam em contato com o comutador, fornecendo a corrente elétrica ao circuito da armadura.

No rotor, encontram-se os seguintes componentes:

- **Eixo da armadura** – Produz a rotação para o núcleo da armadura, que, por sua vez, é utilizado para reduzir as perdas magnéticas no enrolamento da armadura.
- **Enrolamento da armadura** – Compõe-se de fios enrolados em formato de bobina, por onde a corrente elétrica circula.
- **Comutador** – É responsável pela inversão da corrente elétrica no enrolamento da armadura.

Pode-se representar um motor elétrico CC por meio de um circuito elétrico, conforme ilustra a figura 4.12, em que:

- V_{ta} é a tensão da armadura (V);
- I_a é a corrente da armadura (A);
- r_a é a resistência da armadura (Ω);
- V_g é a força contraeletromotriz (V);
- r_s é a resistência do campo série (Ω);
- r_f é a resistência do campo em derivação (Ω);
- I_f é a corrente do campo em derivação (A);
- V_t é a tensão nos terminais do motor (V);
- I_L é a corrente na linha do motor (A).

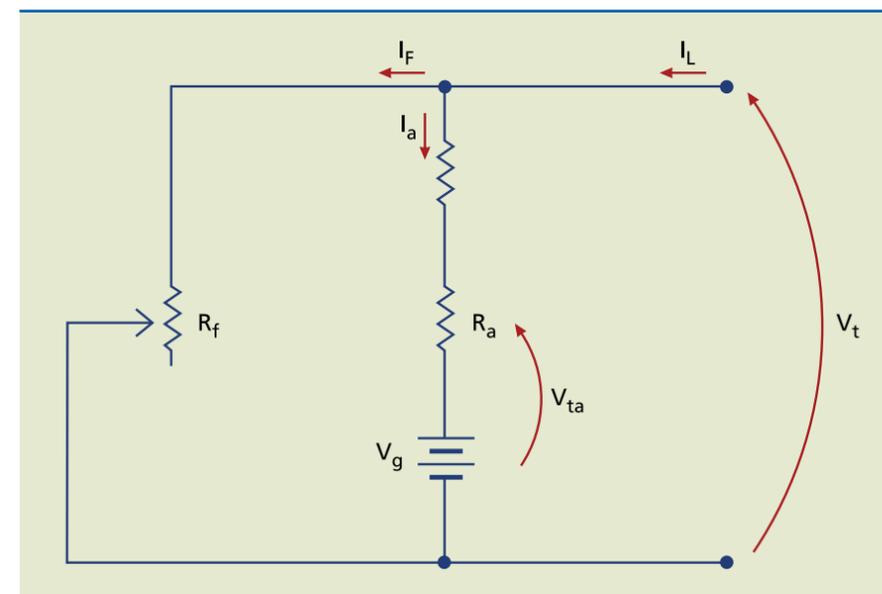


Figura 4.12

Circuito equivalente de um motor CC.

4.2.1 Principais tipos de motores de corrente contínua

Motor em derivação

Também é conhecido como **motor paralelo**. O torque aumenta proporcionalmente à elevação da intensidade da corrente na armadura, enquanto sua velocidade diminui. Para controlar a velocidade, coloca-se uma resistência variável (reostato) nas bobinas de campo, para controlar a tensão de entrada (figura 4.13).



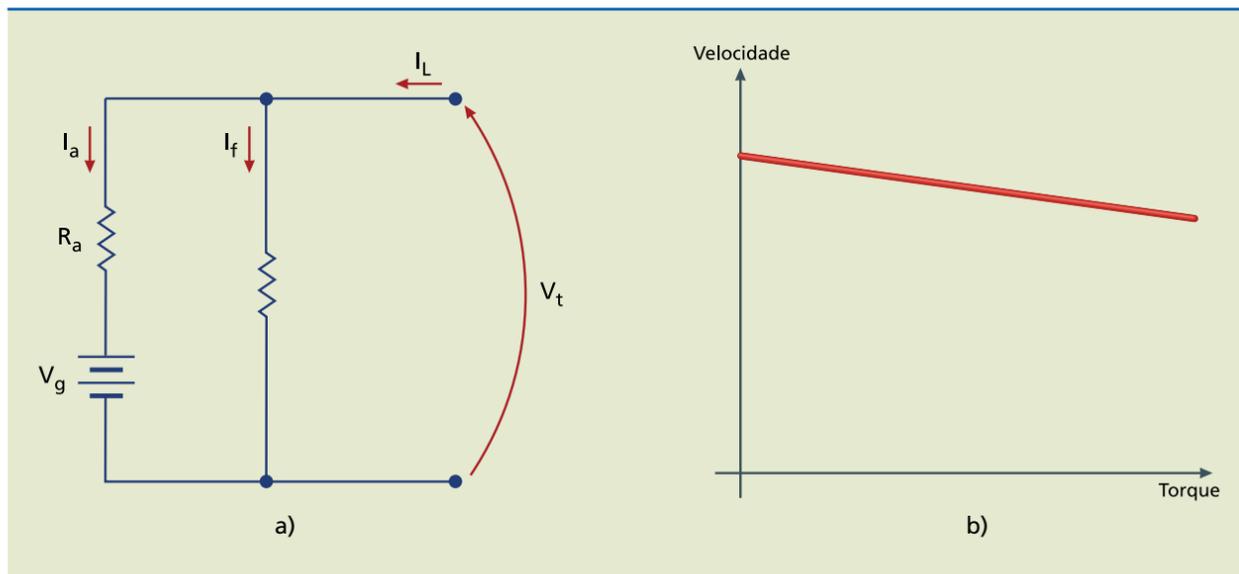


Figura 4.13

Características de um motor em derivação: (a) circuito equivalente e (b) gráfico velocidade • torque.

Motor série

As bobinas de campo são conectadas em série com a armadura; assim, a velocidade varia inversamente proporcional ao valor da carga aplicada (figura 4.14). Esse tipo de motor gira lentamente com cargas elevadas e rapidamente quando está vazio, por isso pode se danificar facilmente. É utilizado em guinchos e guindastes, pois fornece torque elevado, porém baixa rotação.

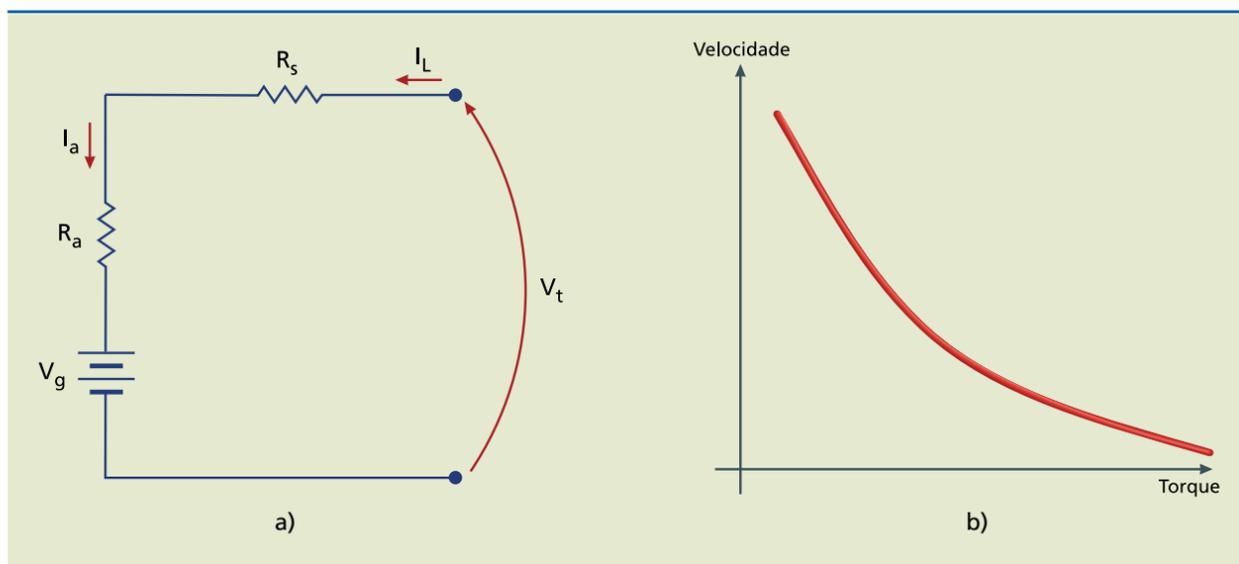


Figura 4.14

Características de um motor série: (a) circuito equivalente e (b) gráfico velocidade • torque.

Motor composto

Associa características dos motores em derivação e série. A eficiência de seu funcionamento depende do valor da carga. Graças aos avanços da tecnologia, foi possível desenvolver um motor de corrente contínua sem escovas (BLDC, sigla

em inglês de *brushless direct current*). Nesse modelo, os ímãs permanentes ficam no rotor e os eletroímãs, no estator. Seu acionamento se faz por meio de um MOSFET de alta potência, comandado por um computador, que energiza os eletroímãs enquanto o rotor gira. Assim, além de não emitir faíscas e possuir refrigeração mais eficaz, o motor é muito mais preciso. Infelizmente, o alto custo de manufatura desse modelo impede que substitua totalmente o motor CC comum. No entanto, o BLDC é utilizado em *hardwares*, CDs e DVDs, assim como auxilia na refrigeração de um PC, já que o ventilador (*cooler*) é um motor CC sem escovas.

Motor de passo

É um motor com posicionamento preciso, de maneira que cada impulso elétrico do sinal de alimentação corresponde a um ângulo fixo de rotação.

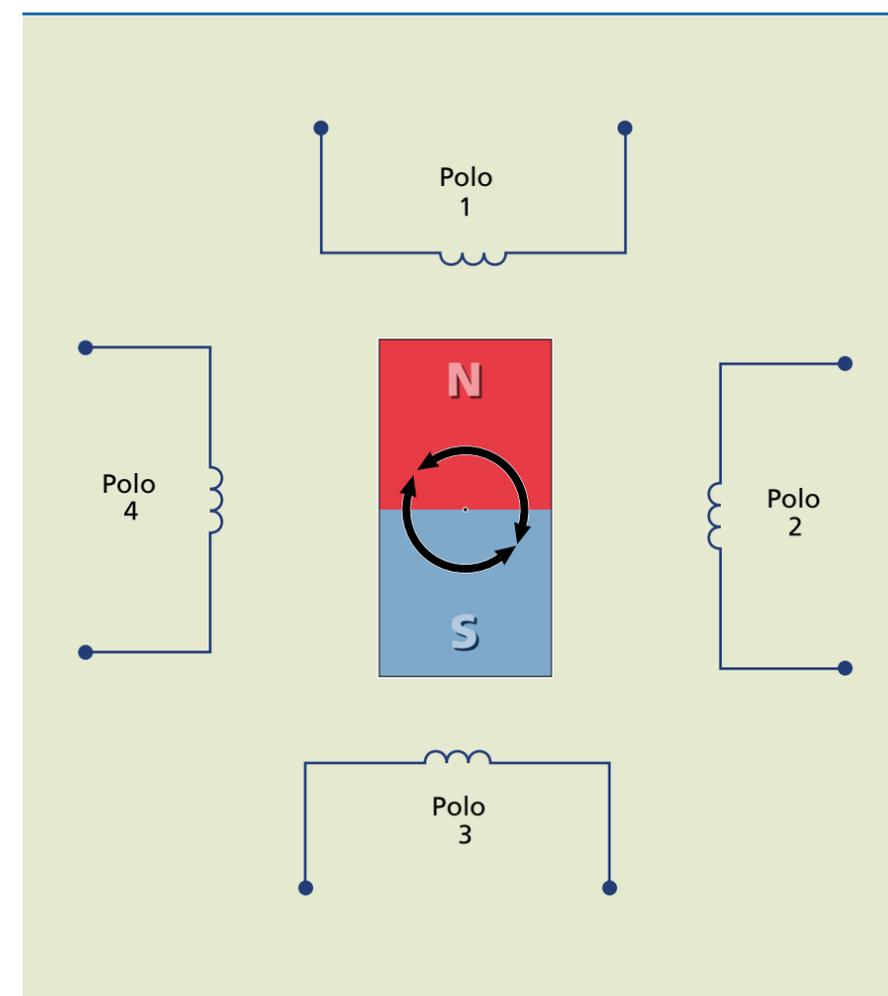


Figura 4.15

Princípio de funcionamento de um motor de passo.

Como se observa na figura 4.15, o estator é composto de quatro polos e o rotor é um ímã permanente. Para entender o funcionamento desse motor, vamos considerar que, ao energizar os enrolamentos, o polo 1 é um polo sul magnético e o polo 3, um polo norte. Nessas condições, o ímã se movimentará até

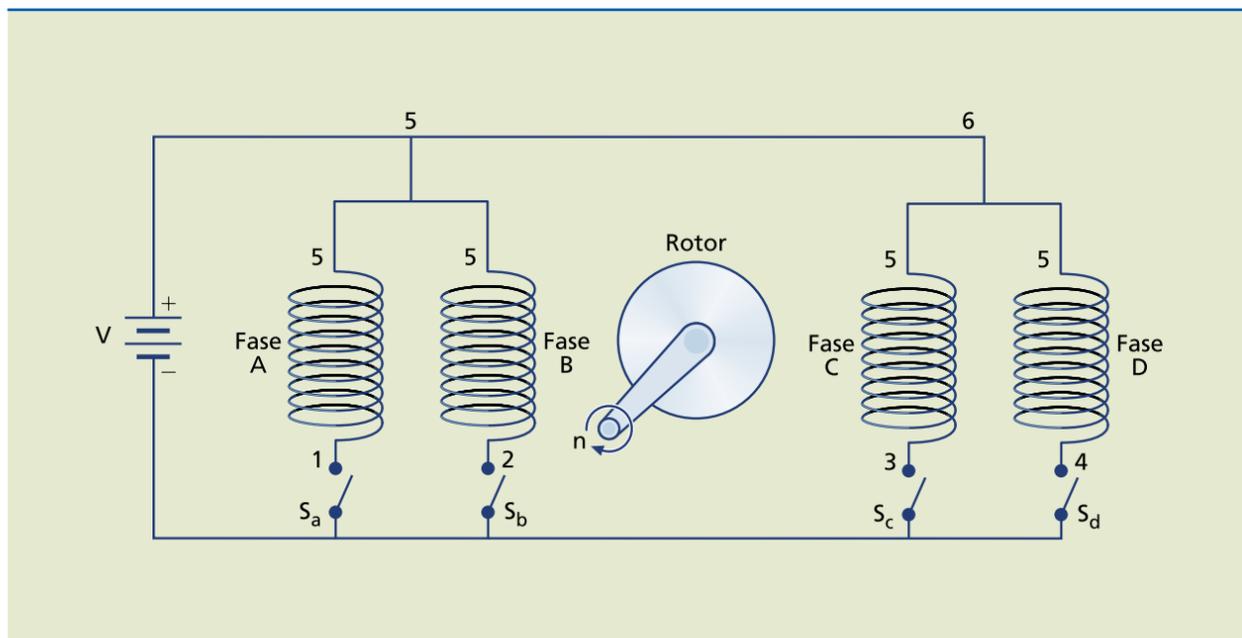


ficar alinhado com esse campo. Se, no próximo pulso, o polo 2 é sul e o polo 4 é norte, o rotor (ímã) executará outro giro de 90°, efetuando mais um passo.

Essa sincronia de passos é possível porque o rotor também é composto por polos, porém em número ímpar, e não par, como o estator; assim, os polos do estator e do rotor nunca estarão alinhados no mesmo momento. Então, o ângulo de passo será determinado pelo número de polos do estator e do rotor, normalmente entre 1,8° e 30°.

Figura 4.16
Motor de passo de quatro fases.

Podem ser utilizadas sequências para movimentar um motor de passo: passo completo e meio passo.



Uma sequência de comandos do motor de passo de quatro fases (figura 4.16) para os dois sentidos de rotação pode ser vista na tabela 4.1.

Tabela 4.1
Sequência de comandos de motor de passo de quatro fases.

Passo	Sa	Sb	Sc	Sd
P1	LIGADA	DESLIGADA	LIGADA	DESLIGADA
P2	LIGADA	DESLIGADA	DESLIGADA	LIGADA
P3	DESLIGADA	LIGADA	DESLIGADA	LIGADA
P4	DESLIGADA	LIGADA	LIGADA	DESLIGADA

Trocando o estado das chaves de LIGADA e DESLIGADA para “1” e “0”, respectivamente, podemos verificar como o motor de passo gira nos dois sentidos (tabelas 4.2 e 4.3).

Passo	Sa	Sb	Sc	Sd
P1	1	0	1	0
P2	1	0	0	1
P3	0	1	0	1
P4	0	1	1	0

Tabela 4.2
Sequência de comandos para rotação no sentido horário do motor de passo.

Passo	Sa	Sb	Sc	Sd
P1	0	1	1	0
P2	0	1	0	1
P3	1	0	0	1
P4	1	0	1	0

Tabela 4.3
Sequência de comandos para rotação no sentido anti-horário do motor de passo.

No caso do meio passo, o circuito que energiza os enrolamentos magnetiza apenas uma bobina (ou um grupo de bobinas) do estator; assim, em vez de o rotor se alinhar de maneira a apontar para um dos polos do estator, ele fica entre dois polos.

As tabelas 4.4 e 4.5 mostram como o motor gira nos sentidos horário e anti-horário para meio ângulo de passo.

Passo	Sa	Sb	Sc	Sd
P1	1	0	1	0
P2	1	0	0	0
P3	1	0	0	1
P4	0	0	0	1
P5	0	1	0	1
P6	0	1	0	0
P7	0	1	1	0
P8	0	0	1	0

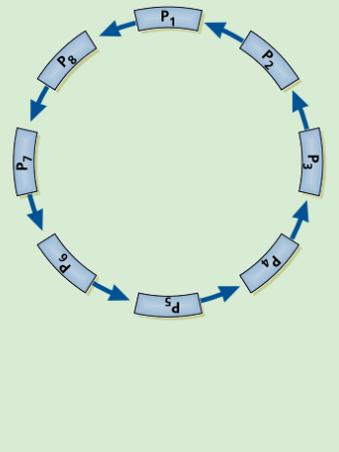
Tabela 4.4
Sequência de comandos para meio ângulo de passo no sentido horário de rotação.



Tabela 4.5

Sequência de comandos para meio ângulo de passo no sentido anti-horário de rotação.

Passo	Sa	Sb	Sc	Sd
P1	0	0	1	0
P2	0	1	1	0
P3	0	1	0	0
P4	0	1	0	1
P5	0	0	0	1
P6	1	0	0	1
P7	1	0	0	0
P8	1	0	1	0



A tabela 4.6 apresenta a relação de valores de ângulo de passo e de meio ângulo de passo e respectivos números de passos por volta.

Tabela 4.6

Relação de valores de ângulo de passo e de meio ângulo de passo e respectivos números de passos por volta.

Motor de passo	Ângulo de passo	Passos por volta	Meio ângulo de passo	Passos por volta
A	0,72°	500	0,36°	1 000
B	1,80°	200	0,90°	400
C	2,00°	180	1,00°	360
D	2,50°	144	1,25°	288
E	5,00°	72	2,50°	144
F	7,50°	48	3,75°	96
G	15,00°	24	7,50°	48

Observando as tabelas 4.2 a 4.5, conclui-se que é possível projetar um circuito de acionamento sequencial de um motor de passo utilizando um dispositivo eletrônico flip-flop JK como contadores síncronos, que são mais apropriados para gerar uma sequência qualquer.

Finalizando, a figura 4.17 mostra a relação entre torque e velocidade em um motor de passo, indicando que a velocidade de rotação depende do tempo entre os passos determinados pelo circuito de acionamento.

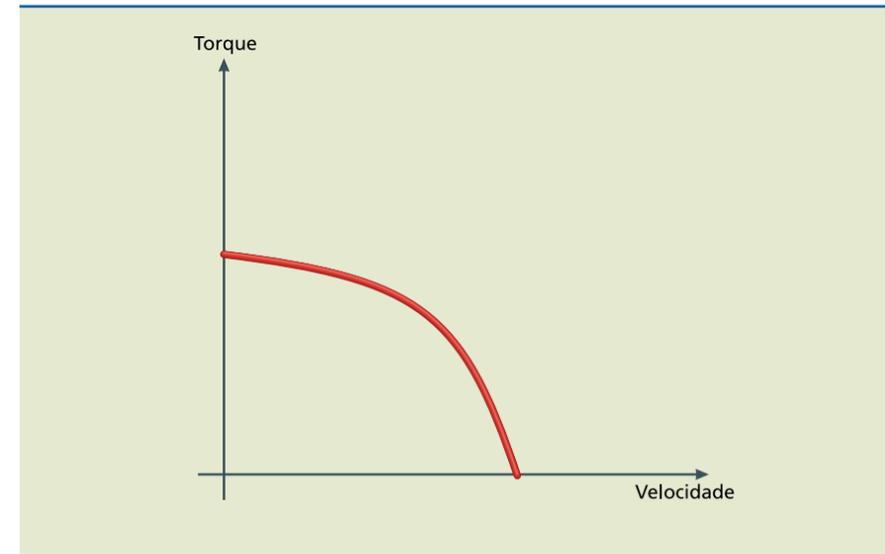


Figura 4.17

Relação entre torque e velocidade de um motor de passo.

Servomotor

É um motor que funciona geralmente por corrente contínua. Ele possui um sensor óptico que assegura que seu posicionamento seja bastante preciso. Entre suas características destacam-se:

- rotação, suave e uniforme em todas as velocidades;
- torque constante;
- baixo nível de ruído e vibração;
- boa capacidade de sobrecarga.

Os servomotores necessitam de um sinal pulsado como entrada de referência, conhecido como PWM (sigla em inglês de *pulse-width modulation* – modulação por largura de pulso). O sensor de posicionamento é um dispositivo eletromecânico usado para verificar movimento ou posição, chamado *encoder*. O *encoder* utiliza sensores ópticos, que fornecem pulsos que podem ser interpretados como movimento, posição ou direção. Em um servomotor, ele é instalado internamente.

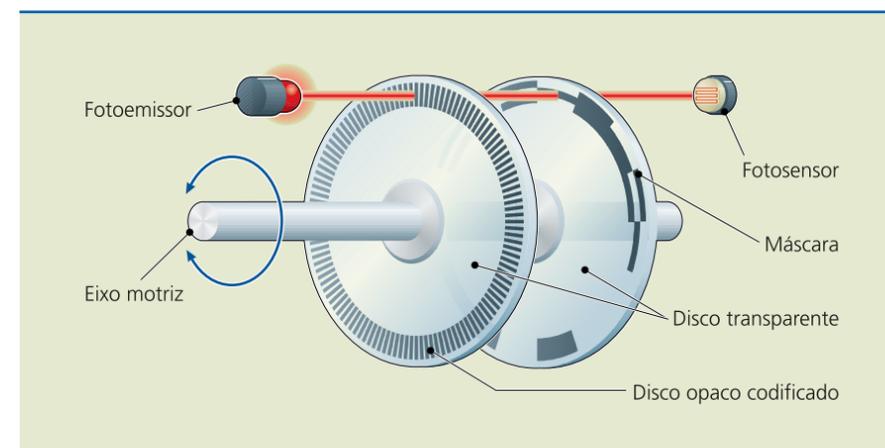


Figura 4.18

Encoder rotativo incremental.

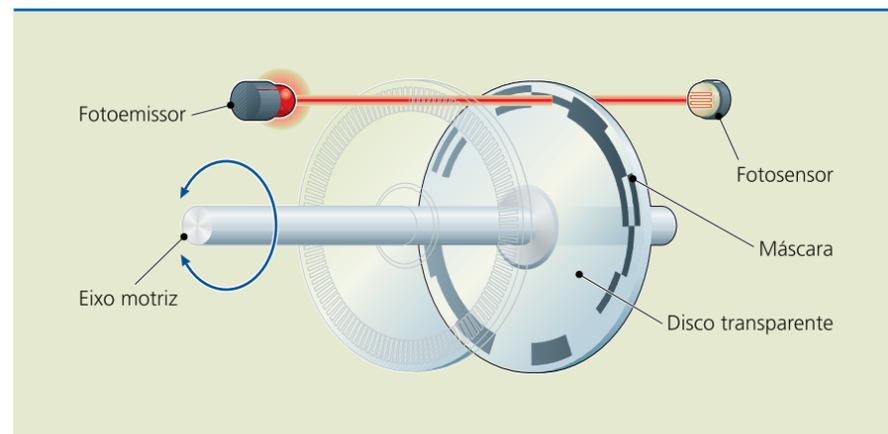


Como mostra a figura 4.18, em um *encoder* rotativo incremental, instala-se no eixo do motor um disco codificado com fendas composto por um elemento emissor de luz e um elemento fotossensível. Um feixe de luz é emitido e, ao atravessar uma das fendas do disco codificado, aciona o elemento fotossensível. Assim, enquanto o motor girar, o disco acompanhará essa rotação. A passagem e a interrupção contínuas do feixe de luz no elemento fotossensível produzirão um sinal elétrico binário conhecido como trem de pulsos. Esse código binário, ao ser inserido em um circuito, informa a posição angular do eixo do motor.

Geralmente, o *encoder* incremental fornece dois pulsos quadrados (dois canais) defasados de 90° . A leitura de um deles fornece apenas a velocidade, enquanto a leitura dos dois fornece também o sentido do movimento. Existe ainda outro sinal, chamado de zero, que informa a posição absoluta “zero” do *encoder*.

Figura 4.19

Encoder rotativo absoluto.



Outro tipo de *encoder* rotativo é o absoluto (figura 4.19). Seu princípio de funcionamento é o mesmo do incremental, porém ele não fornece um trem de pulsos, e sim um valor numérico específico para cada posição angular, pois o disco codificado é dividido em segmentos transparentes e opacos. A principal diferença entre o *encoder* incremental e o absoluto é que no incremental a posição é dada por pulsos a partir do pulso zero (referencial), enquanto no absoluto ela é determinada pela leitura de um código específico para cada posição de seu curso. Esse detalhe evita que os motores de passo com *encoder* absoluto percam a posição real caso aconteça um corte de sinal de alimentação elétrica. Já os motores de passo com *encoder* incremental perdem a posição real na ausência de sinal elétrico.

Outro sensor que pode ser usado em um servomotor é o *resolver* (figura 4.20), geralmente utilizado em robôs e outras aplicações cujas posições devem ser continuamente determinadas. Sua finalidade é medir o ângulo do eixo, informando a posição do rotor do servomotor; ele faz isso por meio da produção de formas de onda defasadas de 90° .

O *resolver* é um transformador de alta frequência, em que o enrolamento primário está localizado no rotor, e os dois enrolamentos secundários, no estator. A

posição do rotor é informada por uma tensão proporcional, gerada por um circuito, que recebe as amplitudes e fases das tensões induzidas nos enrolamentos secundários.

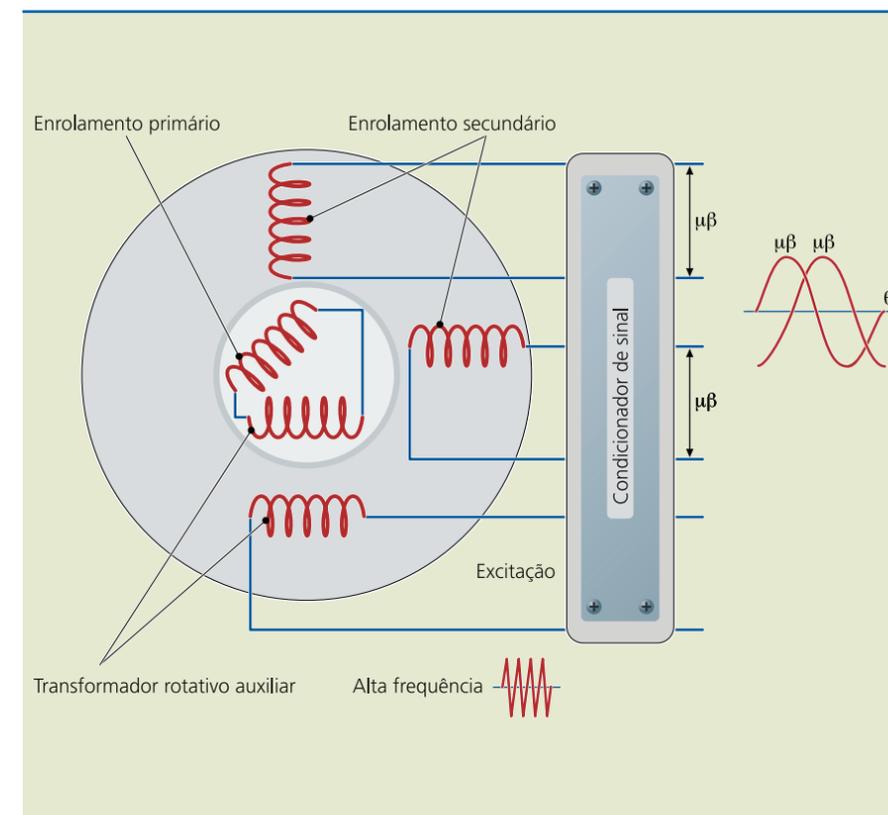


Figura 4.20

Resolver.

Atualmente, com a utilização de materiais magnéticos conhecidos como terras raras (ver na tabela periódica dos elementos químicos), que possuem grande força coerciva e alta retentividade magnética, os servomotores são, na maioria, motores de corrente alternada sem escovas, com ímãs permanentes elaborados com esses materiais.

4.3 Motores de corrente alternada

Na busca de aperfeiçoamento dos motores elétricos de corrente contínua, muitas pesquisas e experimentos foram realizados. Um dos principais resultados foi alcançado por Nikola Tesla, ao desenvolver inventos utilizando a corrente alternada monofásica e, principalmente, trifásica. Graças a esses estudos, passaram a ser produzidas máquinas elétricas mais simples, compactas, leves, com maior durabilidade, melhor rendimento e de fácil manutenção.

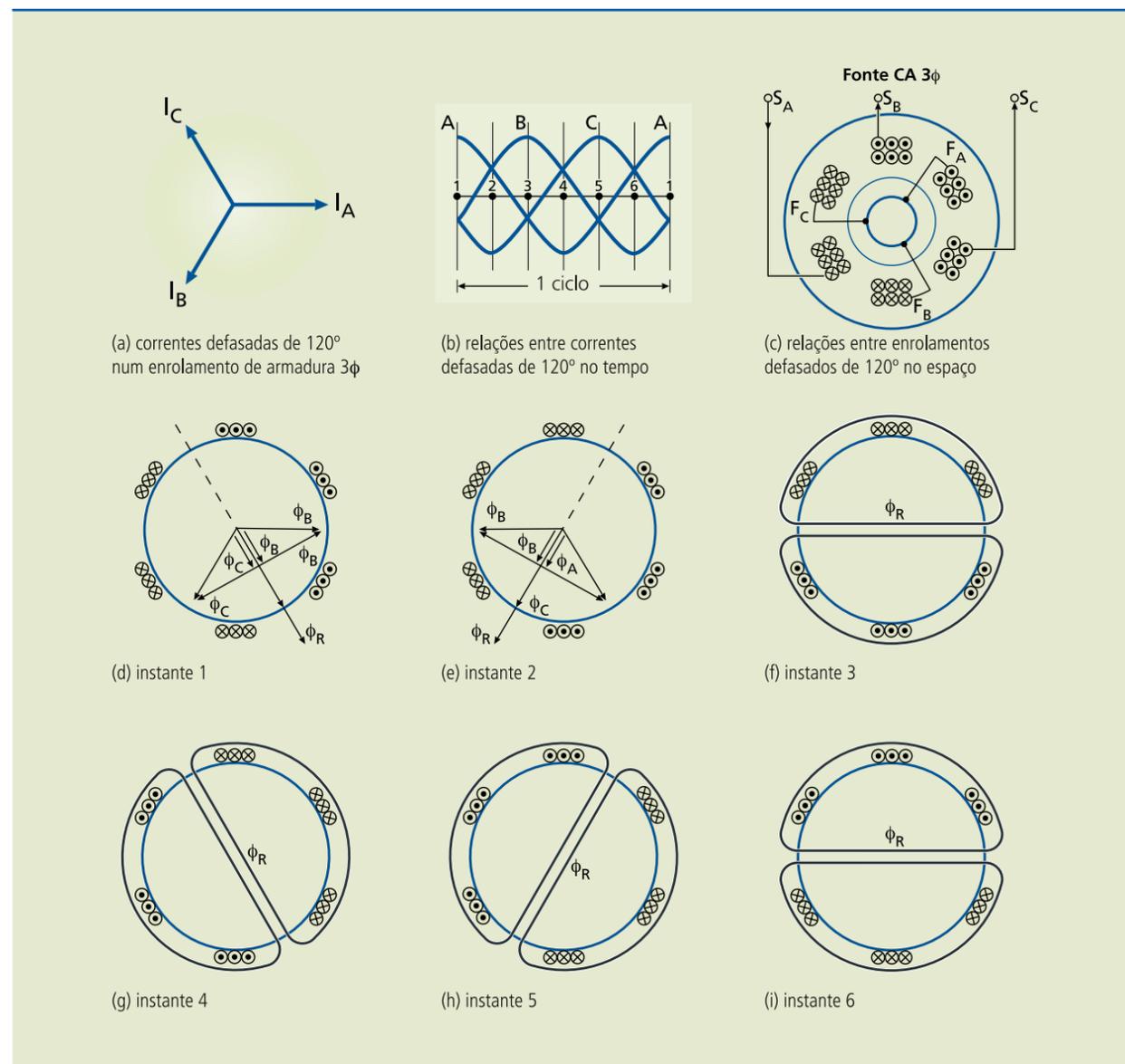
4.4 Motores trifásicos

Com a descoberta do campo magnético girante, foi possível desenvolver máquinas elétricas cujo sistema de alimentação era composto por três fases de mesma intensidade e defasadas de 120° , mais conhecido como sistema trifásico.



Figura 4.21
Princípio do campo magnético girante.

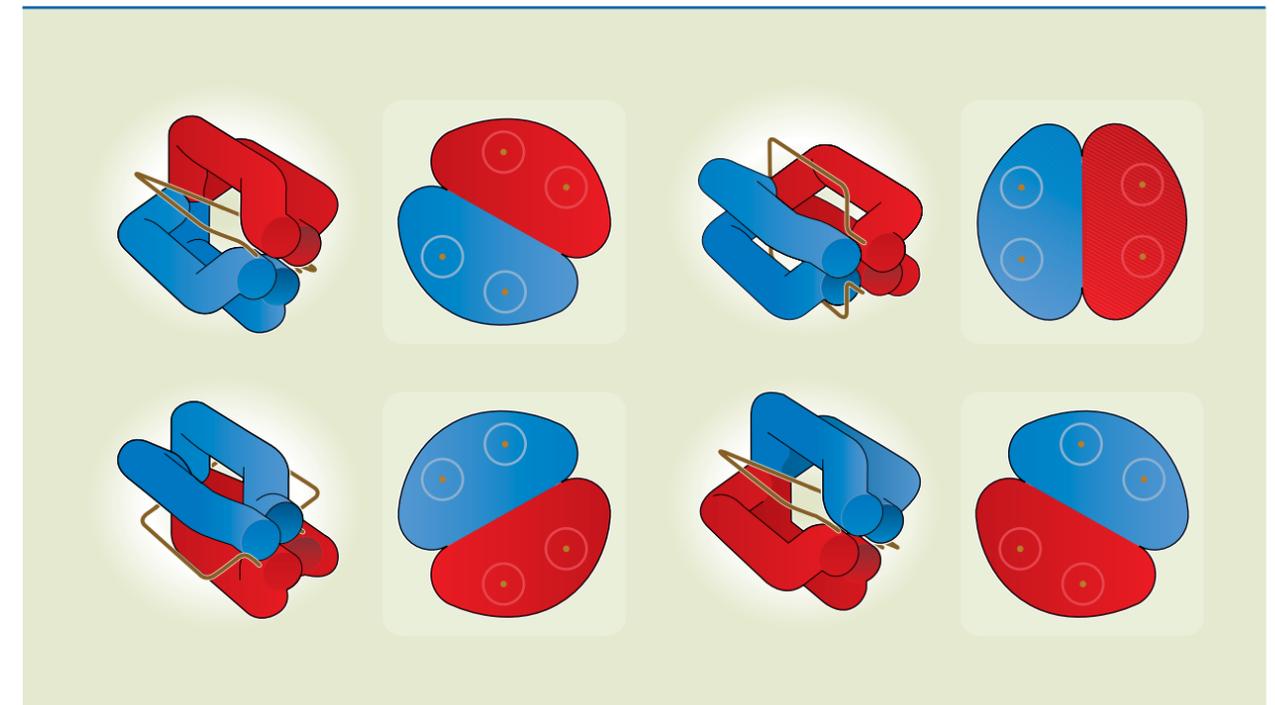
A figura 4.21 apresenta detalhes do posicionamento dos enrolamentos e a defasagem de 120° entre as correntes que circulam em suas bobinas em um campo magnético girante.



Como se observa nas figuras 4.21a e 4.21b, as correntes que serão fornecidas ao motor trifásico são equilibradas (mesma intensidade) e simétricas (defasadas de 120°). A figura 4.21c mostra os enrolamentos do motor trifásico, espaçados fisicamente de 120° . Cada um desses enrolamentos receberá uma corrente elétrica do sistema trifásico. O detalhe é que, como as correntes estão defasadas de 120° e os enrolamentos também, em cada um dos enrolamentos surgirá um campo magnético variável e, se os analisarmos a cada fração de segundo, ou seja, a cada 60° , veremos que sempre dois enrolamentos estarão com campo magnético, e o terceiro não. Nessas condições, olhando com atenção o sentido do fluxo magnético em cada instante, perceberemos que a variação do campo magnético nas

bobinas resulta em um grande campo magnético que “gira” a certa velocidade, denominada síncrona. Assim, como mostra a figura 4.22, quando se inverte o sentido da corrente em dois dos enrolamentos, o campo magnético resultante vai “girar” para o outro lado.

Figura 4.22
Campo magnético girante.



A ABNT estabelece as seguintes normas básicas para os fabricantes de motores:

- NBR 5383 – Prescreve como determinar as características das máquinas de indução.
- NBR 5432 – Define a padronização para os motores de indução.
- NBR 7094 – Fixa as especificações dos motores de indução.

De acordo com a NBR 5410, os motores de aplicação normal acionam cargas industriais de até 200 cv. No setor residencial ou comercial, a aplicação normal pode considerar motores de até 2 cv.

Além das normas brasileiras, as normas de instituições como DIN, NEMA e IEC também podem ser aplicadas, dependendo da finalidade de uso.

4.5 Motores assíncronos

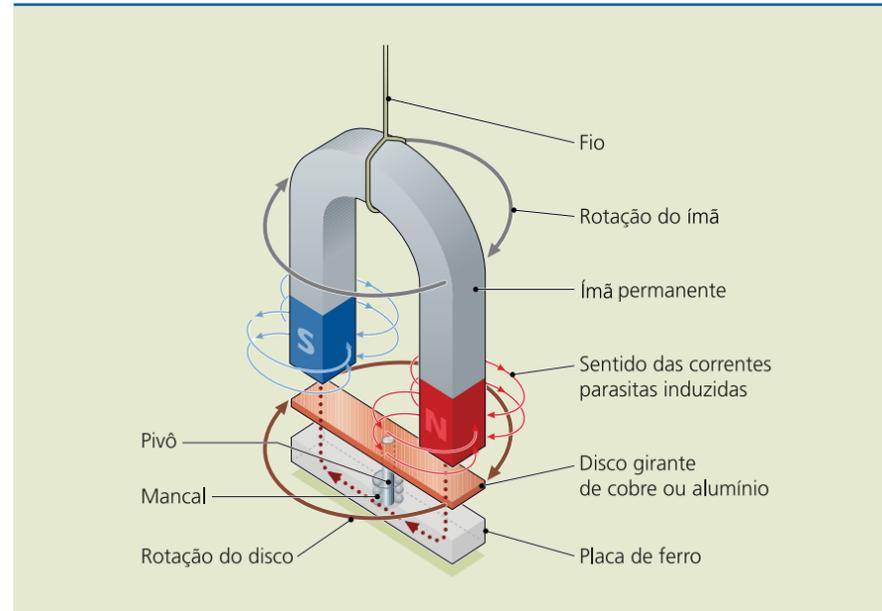
Se o rotor for inserido no meio de um campo magnético girante, ele será induzido por causa da variação de fluxo magnético; um campo magnético se manifestará no rotor, fazendo-o girar ao tentar acompanhar o campo do estator. Os motores que funcionam segundo o princípio da indução são classificados como motores assíncronos, pois o rotor gira a uma velocidade menor do que a síncrona.



4.5.1 Princípio de funcionamento

O motor assíncrono funciona por indução pelo campo magnético girante. Vamos fazer uma analogia para compreender melhor a diferença entre as velocidades síncrona e assíncrona.

Figura 4.23
Princípio do motor de indução.



A figura 4.23 apresenta uma montagem que explica o princípio do motor de indução. Um ímã em forma de ferradura está suspenso por um fio sobre um disco de cobre ou alumínio, que, por sua vez, está sobre uma placa de ferro. A função dessa placa é fechar o circuito magnético, completando o percurso do fluxo magnético proveniente do ímã permanente. A função do mancal e do pivô é garantir que o disco possa girar livremente.

Se o ímã começar a girar, seu campo magnético também vai girar. Essa movimentação induzirá no disco correntes parasitas (fenômeno de ação geradora), que produzem um campo magnético induzido que se opõe ao movimento do ímã (lei de Lenz). Pode-se dizer que o campo magnético das correntes parasitas produz um polo sul no disco, próximo ao polo norte do ímã, e um polo norte no disco próximo ao polo sul do ímã. Com isso, é estabelecida uma atração entre o disco e o ímã. Como o ímã está em movimento, o disco também entra em movimento (ação motora), tentando acompanhar a rotação do ímã permanente. No entanto, o disco não se movimenta com a mesma velocidade do ímã, pois, se isso acontecesse, seria como se o disco estivesse parado em relação ao ímã, não formando correntes parasitas nem o torque no disco.

A velocidade síncrona de um motor de indução em rpm é:

$$N_s = \frac{120 \times f}{p} \quad (4.1)$$

em que:

- f é a frequência do motor, cuja unidade é o hertz (Hz);
- p , o número de polos do motor.

A diferença entre as velocidades síncrona e assíncrona chama-se escorregamento, dado por:

$$s = \frac{(N_s - N_r) \cdot 100}{N_s} \quad (4.2)$$

em que N_r é a velocidade assíncrona (do rotor) em rpm.

4.5.2 Componentes de um motor de indução

A figura 4.24 mostra um motor TFVE e suas partes internas. A sigla TFVE designa motores elétricos totalmente fechados, com a ventilação fornecida externamente.

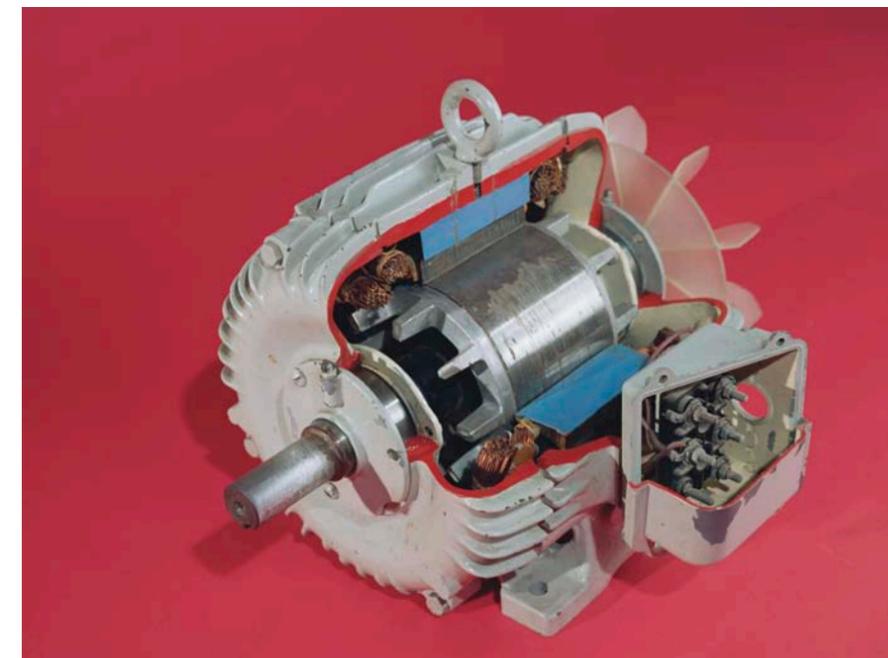


Figura 4.24
Interior de um motor de indução.

Os principais componentes desse motor são:

- Tampa defletora

Possui ranhuras que permitem a passagem do ar que vem do ventilador. Também evita que agentes externos como poeiras e outros corpos entrem em contato com o ventilador e com demais partes internas do motor.



- Ventilador

Está acoplado ao eixo rotor; sua função é refrigerar as partes internas do motor.

- Tampas dianteira e traseira

Servem para vedar o motor e para assentar o rolamento de sustentação dianteiro do eixo do motor.

- Caixa de ligação

Armazena os fios da alimentação elétrica dos terminais do enrolamento do estator. Pode ser montada na lateral – para motores com carcaça de ferro fundido – ou na parte superior do motor – para motores com carcaça de alumínio injetado. Dependendo do número de polos e da tensão desejada (220, 380 ou 440 V), os motores de indução podem possuir três, seis, nove ou doze terminais.

- Carcaça aletada

O invólucro do motor protege e veda o elemento estrutural, para receber o calor produzido internamente. As aletas auxiliam na dissipação do calor, uma vez que estão em contato com a tampa defletora.

- Núcleo do estator

Concentra e fornece o caminho para o fluxo magnético. Por ser laminado, diminui as perdas por correntes parasitas. Não é diferente no caso do enrolamento do estator, em que o núcleo é feito de lâminas de aço.

- Enrolamento do estator

Gera o campo magnético rotativo, ao receber, por exemplo, corrente elétrica trifásica. Os grupos de bobinas são isolados eletricamente e separados fisicamente em 120° um dos outros. Os motores TFVE podem ser fabricados com dois, quatro, seis ou oito polos.

- Rotor

Faz parte do núcleo do motor trifásico. Diferentemente do enrolamento do estator, que é composto por grupos de bobinas, o enrolamento do rotor (conhecido como gaiola) é constituído por barras de cobre ou alumínio, sem conexão elétrica com o meio externo. Nesse modelo de rotor, cada par de barras opostas forma uma única espira de uma bobina. O conjunto de barras é fundido no rotor de aço laminado, e elas são curto-circuitadas em suas extremidades por anéis aletados. O campo magnético girante proveniente do enrolamento do estator induz tensão elétrica no rotor, fazendo com que uma corrente induzida de curto-circuito circule pelas barras. Assim, manifesta-se um campo magnético que, ao tentar acompanhar a rotação do campo girante, leva o rotor a girar.

Existe outro tipo de rotor cujo enrolamento é semelhante ao do estator, conhecido como rotor bobinado. O acesso a esse enrolamento se dá por três terminais em contato com escovas fixas presentes em três anéis solidários ao eixo do motor.

4.5.3 Circuito equivalente de um motor de indução

No capítulo 1, na seção referente a transformadores, foi utilizado um circuito elétrico equivalente para verificar como o transformador se comporta em situações extremas (ensaio a vazio e em curto), a fim de determinar as perdas no ferro (perdas magnéticas) e as perdas no cobre (efeito Joule), para saber qual é o rendimento de um transformador real.

Em um motor de indução por circuito equivalente, é possível verificar parâmetros como corrente no estator, conjugado, potência mecânica etc. por meio de variações de carga, frequência e tensão. Como os enrolamentos trifásicos do motor são semelhantes, eles podem ser considerados uma carga trifásica equilibrada, bastando, então, analisar uma das fases do motor, considerando o rotor bloqueado, conforme a figura 4.25, em que:

- U_1 é a tensão aplicada por fase ao estator (V);
- R_1 , a resistência do enrolamento por fase do estator (Ω);
- XL_1 , a reatância indutiva por fase devido à dispersão do fluxo no estator (H);
- e_1 , a tensão induzida por fase no estator (V);
- I_1 , a corrente por fase no estator (A);
- e_2 , a tensão induzida por fase no rotor (V);
- R_2 , a resistência por fase do rotor (Ω);
- XL_{2r} , a reatância indutiva por fase devido à dispersão do fluxo do rotor (H);
- $\left[\frac{R_2}{s} \right]$ é a carga de caráter resistivo que varia com o escorregamento (Ω);
- I_2 é a corrente por fase no rotor (A).

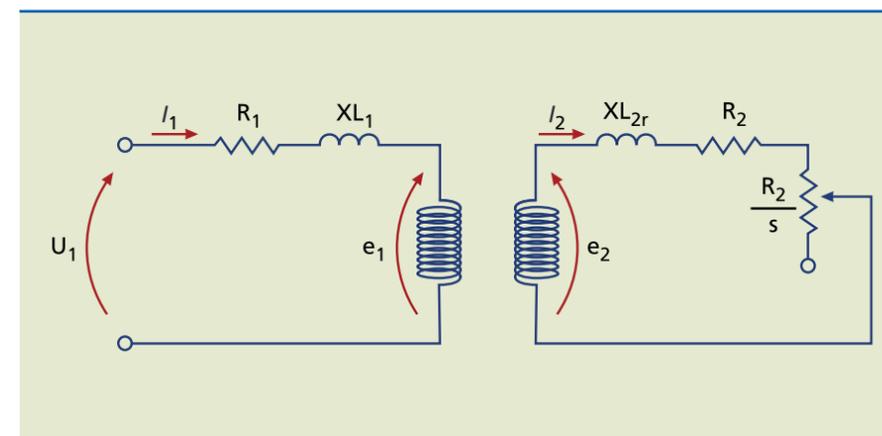


Figura 4.25

Circuito equivalente de uma das fases do motor.

Pelo desenho do circuito equivalente apresentado na figura 4.25, nota-se que o estator está sendo comparado ao primário de um transformador, enquanto o



rotor é o secundário. Assim, a corrente I_2 pode ser determinada pelas seguintes expressões:

$$I_2 = \frac{s \cdot e_2}{\sqrt{R_2^2 + (s \cdot XL_{2r})^2}} \text{ ou } I_2 = \frac{e_2}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + XL_{2r}^2}} \quad (4.3)$$

Analisando essas equações, é possível observar que a tensão induzida e a reatância indutiva do rotor variam de acordo com o escorregamento. Se o rotor girasse na velocidade síncrona, o escorregamento seria igual a zero; se o rotor estivesse bloqueado, seria igual a um. Na prática, o escorregamento dos motores de indução está entre 1% e 8%.

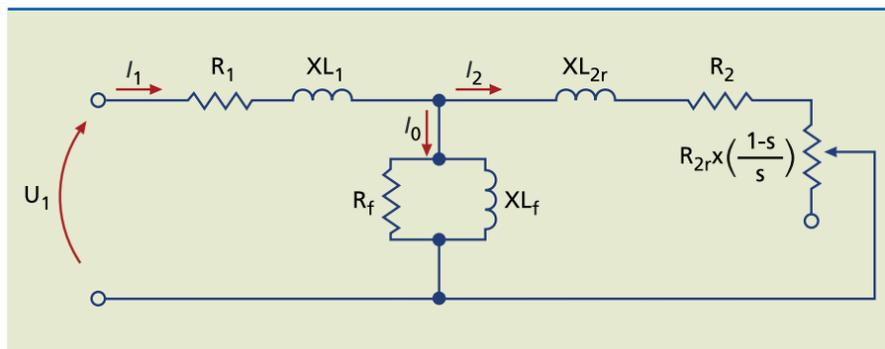
A frequência do rotor (f_2) vale:

$$f_2 = s \cdot f_1 \quad (4.4)$$

em que f_1 é a frequência do estator.

Os parâmetros do rotor podem ser refletidos no estator, como mostra a figura 4.26, em que:

Figura 4.26
Circuito equivalente refletido no estator de uma das fases do motor.



- R_f são as perdas no ferro (Ω);
- XL_f , as perdas referentes à magnetização (H);
- R_{2r} , as perdas por efeito Joule do rotor (Ω);
- I_0 é a corrente a vazio do motor (A);
- o produto $\left[R_{2r} \cdot \left(\frac{1-s}{s} \right) \right]$ representa as perdas mecânicas do rotor.

As perdas mecânicas ocorrem nos rolamentos do rotor e no sistema de ventilação. Então, a potência desenvolvida na carga, que varia com o escorregamento, vale:

$$\frac{R_{2r}}{s} = R_{2r} + R_{2r} \cdot \left(\frac{1-s}{s} \right) \quad (4.5)$$

Para efetuar uma análise do motor de indução em duas situações extremas (a vazio e rotor bloqueado), o circuito equivalente pode ser simplificado conforme a figura 4.27, em que:

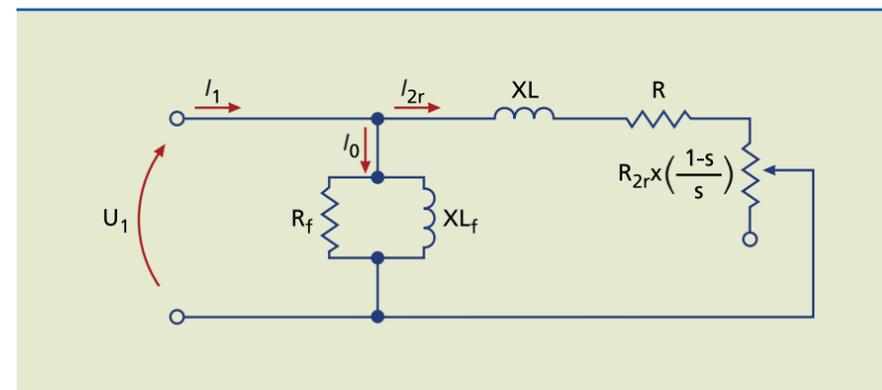


Figura 4.27
Circuito equivalente simplificado de uma das fases do motor.

em que:

- R é a resistência global do motor (Ω);
- XL a reatância de dispersão global do motor (H).

Os parâmetros citados (resistência global do motor e reatância de dispersão global do motor) são assim calculados:

$$R = R_1 + R_{2r} \text{ e } XL = XL_1 + XL_{2r} \quad (4.6)$$

Um ensaio a vazio de um motor, em que se aplica sua tensão nominal, significa que não há carga mecânica sobre o eixo. O escorregamento tenderia a zero e os valores das impedâncias R e XL seriam tão altos que tenderiam a um circuito aberto. Assim, com aparelhos de medição elétrica, mediríamos a tensão, a corrente, as potências ativa e reativa desenvolvidas, determinando:

$$R_f = \frac{U_1^2}{P_v} \text{ e } XL_f = \frac{U_1^2}{Q_v} \quad (4.7)$$

em que:

- P_v é a potência ativa medida a vazio (W);
- Q_v é a potência reativa medida a vazio (Var).

Vale salientar que, nesse caso, R_f representaria todas as perdas no ferro, inclusive as perdas mecânicas relativas à ventilação e ao atrito do rolamento, e XL_f , todo o efeito de magnetização do núcleo do motor.

Um ensaio com rotor bloqueado, em que está circulando a corrente nominal do motor, significa que o eixo não gira. O escorregamento tenderia a um e os valores das impedâncias R e XL seriam menores do que os do eixo central. Nesse



caso, as perdas no ferro e as da magnetização seriam desprezíveis, e as geradas pela rotação não existiriam, uma vez que o eixo está bloqueado. Assim:

$$R = \frac{P_B}{I_1^2} \text{ e } XL = \frac{Q_B}{I_1^2} \quad (4.8)$$

em que:

- P_B é a potência ativa medida com rotor bloqueado (W);
- Q_B , a potência reativa medida com rotor bloqueado (Var).

Vale salientar ainda a determinação de R_{2r} :

$$R_{2r} = R - R_1 \quad (4.9)$$

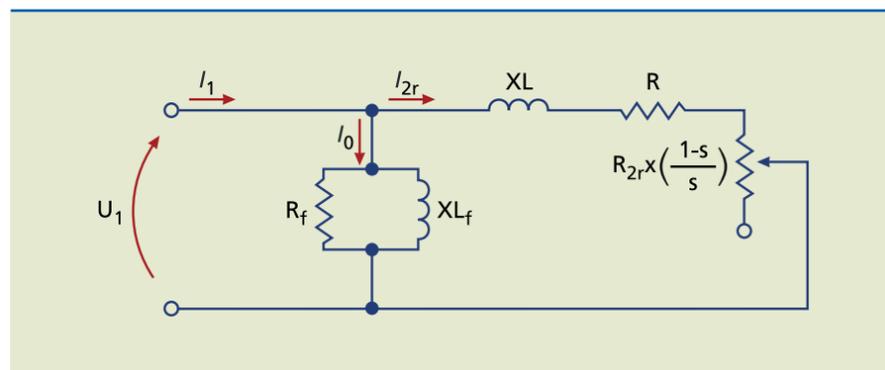
4.5.4 Perdas e rendimento

As perdas em um motor de indução já foram demonstradas na seção anterior.

Voltando ao circuito equivalente do motor, podemos efetuar deduções mostradas na figura 4.28.

Figura 4.28

Circuito equivalente aproximado.



$$I_1 = I_0 + I_{2r} \quad (4.10)$$

considerando que:

$$I_0 = \frac{U_1}{R_f} - j \frac{U_1}{XL_f} \text{ e } I_{2r} = \frac{U_1}{\sqrt{\left[R + R_{2r} \cdot \left(\frac{1-s}{s} \right) \right]^2 + XL^2}}$$

Como a análise é feita por fase, as potências totais desenvolvidas, que dependem dos valores de linha, são:

$$P = 3 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi \text{ e } P_M = C \cdot \omega \quad (4.11)$$

em que:

- P é a potência elétrica útil total (W);
- $\cos \varphi$, o fator de potência do motor;
- C é o conjugado (torque) do motor (Nm);
- ω é a velocidade angular da rotação (rad/s).

O rendimento de um motor é determinado por meio da relação entre a potência mecânica que ele fornece e a potência elétrica que consome:

$$\eta = \frac{P_M}{P} \quad (4.12)$$

4.5.5 Curva característica de um motor de indução

Lembrando que o produto $\left[R_{2r} \cdot \left(\frac{1-s}{s} \right) \right]$ representa as perdas mecânicas do

rotor, temos que $P_M = 3 \cdot R_{2r} \cdot \left(\frac{1-s}{s} \right) \cdot I_{2r}^2$.

Como a velocidade angular do rotor em relação à velocidade síncrona angular vale $\omega = \omega_s \cdot (1 - s)$, o conjugado do motor pode ser calculado da seguinte maneira:

$$C = \frac{3 \cdot R_{2r} \cdot I_{2r}^2}{\omega_s \cdot s} \quad (4.13)$$

O conjugado é um parâmetro muito importante, utilizado para analisar o comportamento do motor de indução, como podemos observar no gráfico da figura 4.29.

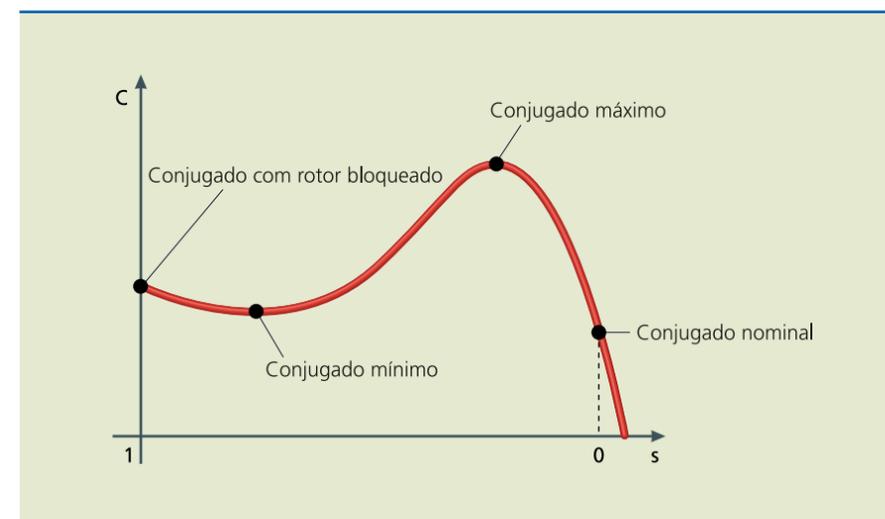


Figura 4.29

Curva conjugado · escorregamento com terminologia da NBR 7094.



O conjugado de partida ou com rotor bloqueado é o valor mínimo de torque que o motor desenvolverá em condição de repouso, considerando que a tensão e a frequência aplicadas são as nominais. O conjugado mínimo é o menor valor de torque que o motor desenvolverá durante o repouso até a rotação em que o torque máximo acontece. Já o conjugado máximo é o maior valor de torque que o motor desenvolverá, desde que a tensão e a frequência aplicadas sejam nominais e que não exista queda acentuada na rotação. Finalmente, o conjugado nominal é o torque necessário para produzir a potência nominal à rotação nominal. Na unidade do Sistema Internacional (em Nm), o conjugado nominal vale:

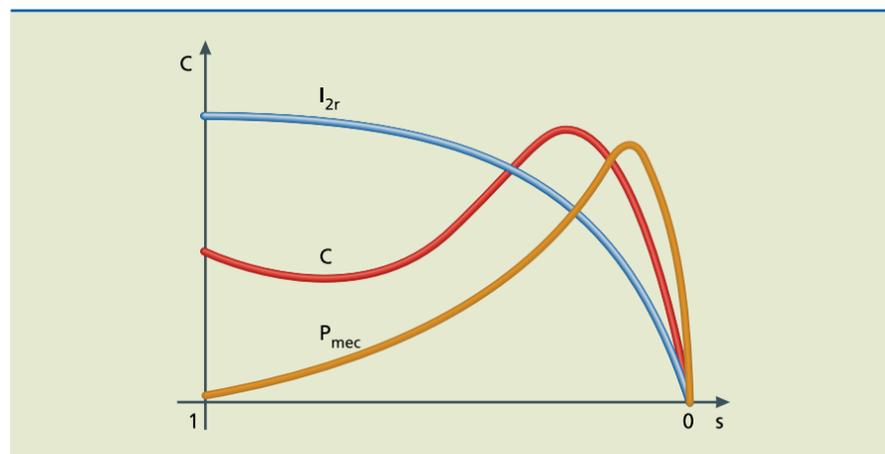
$$C = \frac{P \cdot 7022}{N_r} \quad (4.14)$$

em que:

- P é a potência desenvolvida no motor, em cavalo-vapor (CV);
- N_r é a rotação do rotor (nominal), em rpm.

A corrente refletida I_{2r} e a potência mecânica também podem ser representadas graficamente (figura 4.30).

Figura 4.30
Curva conjugado, corrente e potência mecânica • escorregamento.



Vale salientar que, nas análises anteriores, a tensão e a frequência do motor foram consideradas constantes; dessa maneira, o conjugado do motor é uma função quadrática da tensão elétrica.

A NBR 7094 estabelece basicamente três tipos de motores, de acordo com os valores necessários de torque, escorregamento e corrente de partida:

Categoria D – Possuem torque e escorregamento altos na partida, porém com corrente de intensidade normal. São utilizados em aplicações em que existem picos de cargas, como prensas, e torques elevados com limite de corrente, como elevadores.

Categoria H – Possuem torque alto na partida, porém com corrente normal e baixo escorregamento. São utilizados em aplicações em que se necessita de torques elevados de partida, como transportadoras e britadeiras.

Categoria N – Possuem torque nominal na partida, com corrente também nominal e baixo escorregamento. São os mais utilizados em acionamento de ventiladores, máquinas universais, bombas hidráulicas etc.

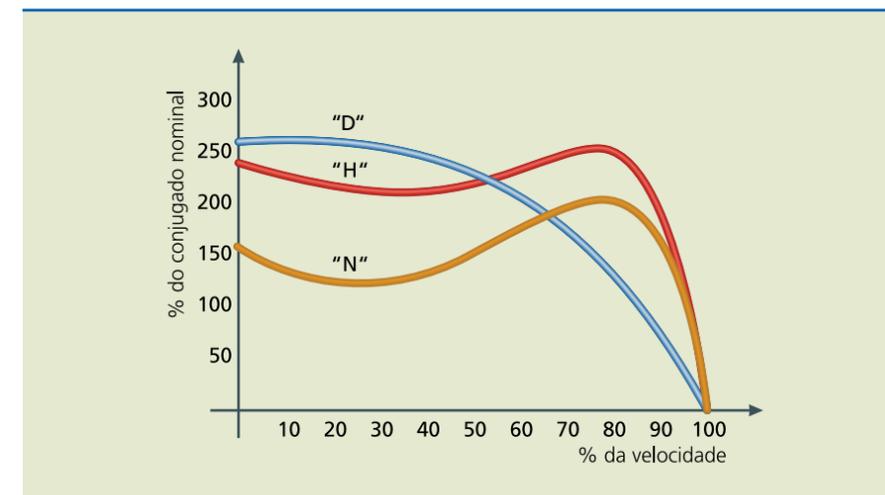


Figura 4.31
Curva conjugado • escorregamento das categorias D, H e N.

Além das normas nacionais da ABNT, a classificação dos motores trifásicos pode seguir normas internacionais, especialmente a National Electrical Manufacturer's Association (NEMA), cujas categorias são indicadas a seguir, com as correspondentes curvas conjugado • escorregamento representados na figura 4.32.

Categoria A – É um motor de indução normal para uso em velocidade constante; possui um conjugado médio, com corrente de partida alta. Não é recomendado para partida direta de motores de potência elevada.

Categoria B – É um motor de utilização geral, pois tem as características da categoria A, mas com a vantagem de possuir corrente de partida menor. É usado em motores de potência mais elevada.

Categoria C – É um motor que possui o dobro do conjugado das categorias anteriores, acelerando rapidamente. No entanto, sob condições de partidas sucessivas, ele tende a se aquecer em demasia. É recomendado para cargas instantâneas elevadas com pouca inércia.

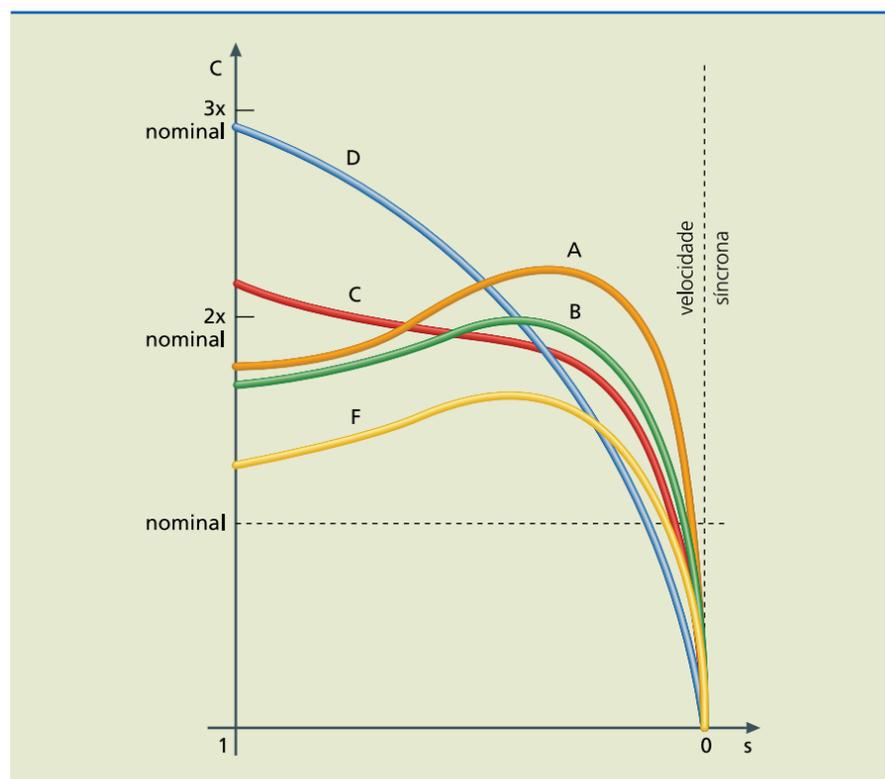
Categoria D – É um motor de alto conjugado, projetado para partidas mais pesadas, mas não frequentes, como uma guilhotina.

Categoria F – É um motor de baixo conjugado e possui baixa corrente de partida, em comparação com as categorias anteriores. Apesar de possuir baixa regulação de velocidade, baixa capacidade de sobrecarga e baixo rendimento, pode substituir os motores da categoria B, principalmente em potências elevadas.



Figura 4.32

Curva conjugado · escorregamento das categorias A, B, C, D e F para a norma NEMA.



Além dos parâmetros discutidos nos parágrafos anteriores, devemos conhecer também mais três parâmetros importantes sobre os motores elétricos: a corrente de partida, a classe de isolamento e o fator de serviço.

A corrente de partida pode ser compreendida como a situação em que o motor sai da condição de repouso ou ainda se encontra com o rotor bloqueado e há uma elevação da corrente elétrica, na ordem de cinco a seis vezes seu valor nominal. Essa é a corrente de partida.

A classe de isolamento diz respeito à temperatura de trabalho que os enrolamentos do motor podem suportar sem comprometer sua vida útil. A NBR 7034 estabelece cinco classes de isolamento – A, E, B, F e H, dentre as quais as mais utilizadas para motores normais são as classes B e F –, definidas pela temperatura máxima que o material pode suportar continuamente, sem que afete sua vida útil:

- Classe A, que suporta até 105 °C.
- Classe E, que suporta até 120 °C.
- Classe B, que suporta até 130 °C.
- Classe F, que suporta até 155 °C.
- Classe H, que suporta até 180 °C.

O fator de serviço (FS) é um indicador que, em situações desfavoráveis, mostra qual é a sobrecarga máxima aplicada continuamente que um motor pode suportar, sem prejuízo do isolamento do motor. Esse valor, que nos motores normais

vai de 1,0 a 1,25 (ou seja, aumento máximo de até 25%), deve ser multiplicado pela potência nominal.

Os motores elétricos trifásicos devem possuir dispositivos de proteção para evitar falhas na operação. Esses dispositivos protegem o motor de:

- sobretensões, que poderiam prejudicar o isolamento do enrolamento, causando curtos-circuitos;
- subtensões, pois, à medida que a tensão diminui, a corrente aumenta, ocasionando a queima dos enrolamentos;
- desbalanceamento de tensão (quando as tensões não possuem mais o mesmo valor), pois um desbalanceamento de 5% proporciona aumento de 25% em sobrecarga, o que se traduz em elevação da corrente elétrica;
- falta de fase, pois, quando uma das correntes trifásicas deixa de circular no motor, as outras praticamente dobram de valor.

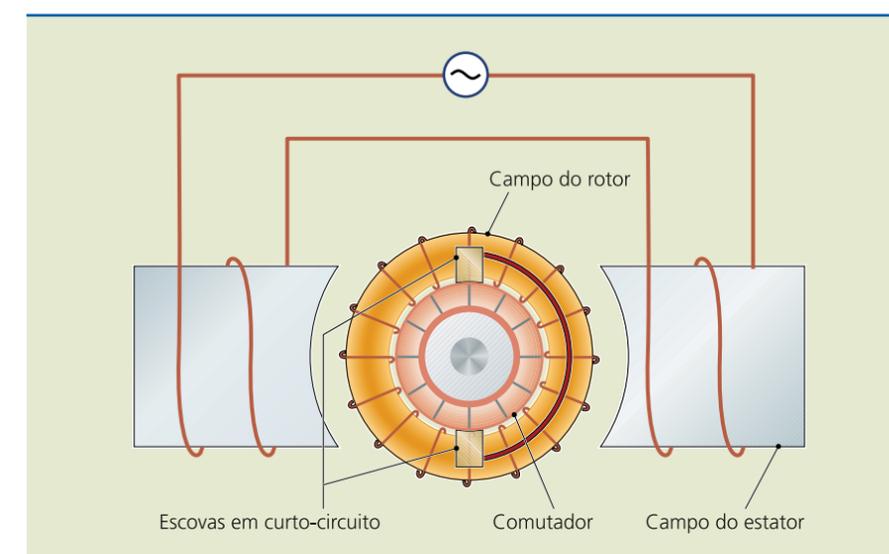
4.6 Motores monofásicos

Os motores monofásicos são utilizados em instalações industriais e residenciais, onde existe apenas uma alimentação elétrica alternada monofásica. Eles são classificados em motor comutador, de indução e síncrono.

4.6.1 Motor comutador

Possui o rotor bobinado, equipado com comutador e escovas. Existem dois tipos de motor comutador: o motor de repulsão e o motor série.

No motor de repulsão (figura 4.33) as escovas estão curto-circuitadas. Dessa maneira, por ação da indução eletromagnética, o campo do estator produz uma corrente no enrolamento do rotor, que, por sua vez, gera um campo magnético cujos polos dependem da posição das escovas. A interação dos campos provoca a manifestação da força magnética, fazendo o rotor girar.

**Figura 4.33**

Motor de repulsão.



Como esse tipo de motor possui elevado conjugado de partida e altas velocidades com cargas leves, é utilizado em aplicações com partida com carga pesada.

Os motores série CA são parecidos com os CC, porém apresentam comportamento diferenciado. Por exemplo, se um motor série CC fosse ligado em uma fonte CA, haveria grande faiscamento nas escovas e baixo consumo de corrente, por causa da alta impedância do enrolamento em série, além de redução do rendimento e queda do fator de potência.

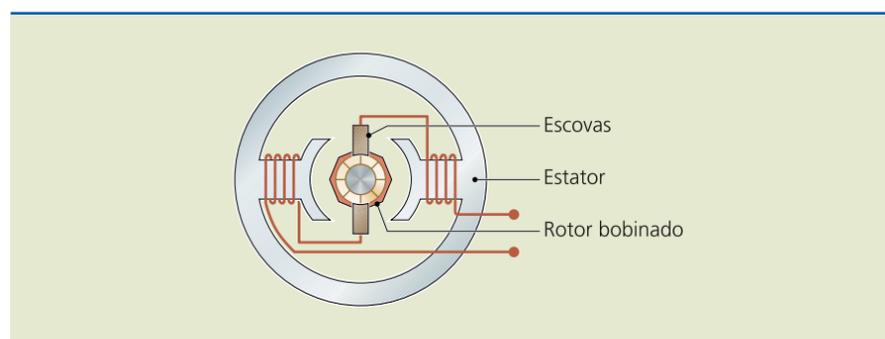
Para ligar um motor série CC em uma fonte CA, seriam necessárias algumas modificações:

- Construção do campo série com o menor número possível de espiras, para reduzir as perdas magnéticas.
- Acréscimo de uma resistência em série com as ligações do rotor ao comutador, para reduzir a corrente e, conseqüentemente, o faiscamento das escovas.
- Utilização de enrolamentos compensadores, para reduzir a reação do rotor por causa do aumento do número de condutores, realizado para compensar a diminuição de fluxo magnético.

Os motores série CA possuem alta eficiência em aplicações que tenham baixa frequência, principalmente em locomotivas elétricas, guindastes e elevadores.

Outro tipo de motor comutador é o universal (figura 4.34). Trata-se de um motor CC do tipo série, com o estator e o rotor feitos de chapas laminadas para operar em CA, a fim de reduzir as perdas magnéticas. Por apresentar tais características, esse motor pode funcionar tanto em corrente contínua como em corrente alternada.

Figura 4.34
Motor série.



4.6.2 Motor de indução

O motor de indução monofásico não possui o campo magnético girante característico do motor trifásico; assim, ele não possui torque de partida. A explicação para sua partida é que, ao aplicar uma tensão alternada no estator, surge um campo magnético estacionário (não gira) que inverte de sentido

continuamente. A inversão do campo no estator induz uma tensão no rotor, que se alinha com o campo do estator, porém sem conjugado de partida. Desse modo, é necessário um dispositivo auxiliar de partida para que a força magnética gerada entre os campos do estator e do rotor inicie a rotação e mantenha sua velocidade constante.

O motor de fase dividida baseia-se em um princípio simples, que pode ser explicado da seguinte maneira: ao aplicarmos uma alimentação monofásica CA em dois enrolamentos em paralelo, porém defasados de 90°, denominados principal e de partida, o campo magnético que se estabelece produz um conjugado de partida suficiente para fazer o rotor se movimentar. Esse tipo de motor é utilizado em máquinas com torque baixo, como máquinas de lavar roupa.

Quando, no motor de fase dividida, colocamos um capacitor em série com o enrolamento de partida, a defasagem entre a tensão de alimentação e a corrente do enrolamento de partida é alterada, podendo chegar próximo de 90°, resultando em uma elevação do torque. Esse tipo de motor é denominado motor com capacitor de partida.

Além do princípio da fase dividida, existe outro princípio de partida, chamado de polo sombreado, fendido ou ranhurado (figura 4.35). Nessa configuração, uma bobina curto-circuitada, denominada bobina de sombreadamento, é instalada em torno de uma parte de cada polo ou ranhura do motor.

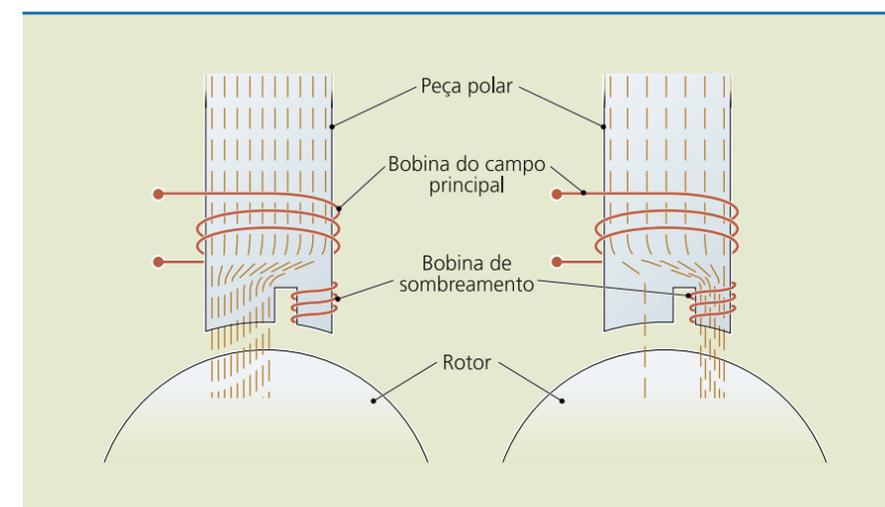


Figura 4.35
Comportamento do campo magnético em um motor de polo ranhurado.

Nessas condições, quando a intensidade do campo principal aumenta, uma corrente induzida se estabelece na bobina curto-circuitada, cujo campo se opõe (lei de Lenz) ao campo principal, fazendo com que este se concentre no lado oposto. Quando o campo principal diminui de intensidade, o campo da bobina sombreada também diminui, unindo-se ao campo principal, pois o sentido do campo da bobina curto-circuitada também inverte (lei de Lenz). A bobina de sombreadamento sofre pequeno desvio em relação ao campo principal, fazendo com que um pequeno conjugado de partida se manifeste. Esse método de partida é utilizado em motores como pequenos ventiladores, máquinas de cortar frios e relógios.

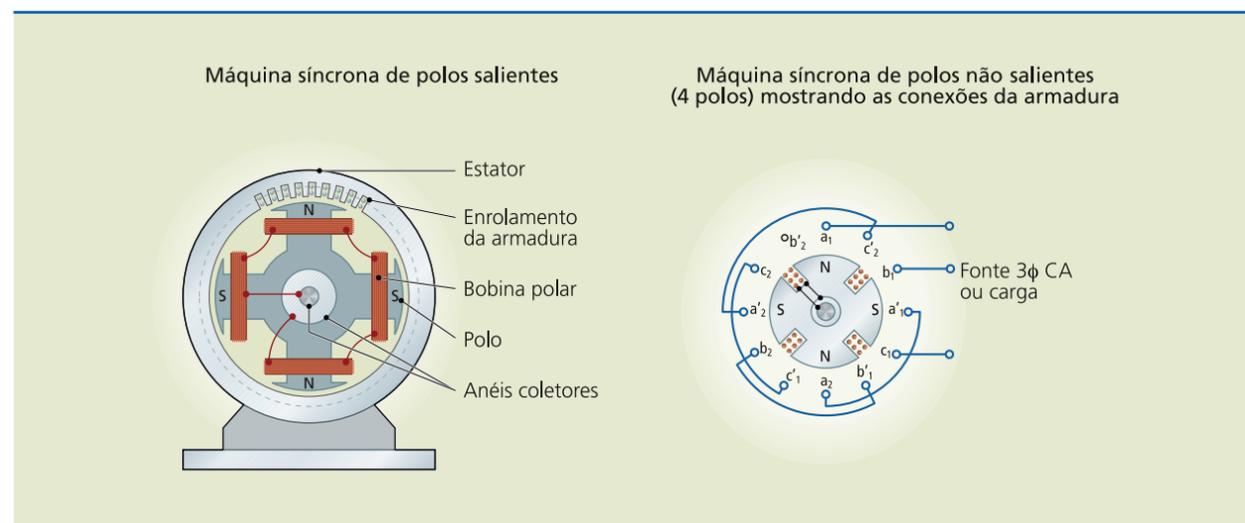


Há também o motor de indução com partida por repulsão, que possui os enrolamentos conectados a um comutador em contato direto com as escovas de partida. Na partida, esse motor se comporta como um motor de repulsão, porém, quando a velocidade do rotor se aproxima da máxima, um dispositivo curto-circuita os segmentos do comutador, fazendo com que ele se comporte como motor de indução.

4.6.3 Motor síncrono

O motor síncrono CA é um motor de velocidade constante que pode ser utilizado na correção de fator de potência, além de fornecer torque à carga que ele mesmo aciona (figura 4.36). Seu rendimento é maior, comparado aos motores de indução de mesma potência.

Figura 4.36
Máquina síncrona de campo móvel.



Esse motor entra em funcionamento quando o enrolamento de campo recebe tensão elétrica contínua por meio de dois anéis coletores e o enrolamento da armadura está conectado à rede trifásica ou a uma carga. O enrolamento de campo pode ser ligado a uma fonte de tensão alternada, monofásica ou trifásica, porém funcionará como motor síncrono, cujo rotor girará na mesma velocidade do estator, ou seja, em velocidade síncrona.

O motor síncrono não possui conjugado de partida, devendo ser acelerado por um meio externo e então conectado à linha. Ele apresenta uma característica própria relacionada à estabilização do sincronismo, que pode ser observada quando se eleva a intensidade da corrente de campo e uma corrente sincronizante instantânea se estabelece, produzindo uma potência sincronizante. Essa potência sincronizante faz com que máquinas que fornecem potência se atrasem até a potência de sincronismo e máquinas que consomem potência se adiantem até o sincronismo. Como uma máquina de natureza CA não possui velocidade constante em um ciclo de rotação, a condição descrita não se estabiliza; ao contrário, essa oscilação periódica continua a aumentar – é como se a máquina estivesse tentando alcançar a velocidade síncrona estável e não conseguisse.

Para eliminar a busca de sincronismo e possibilitar um conjugado de partida, os polos do rotor possuem barras curto-circuitadas em cada extremidade por meio de anéis, conhecidas como enrolamentos amortecedores (figura 4.37).

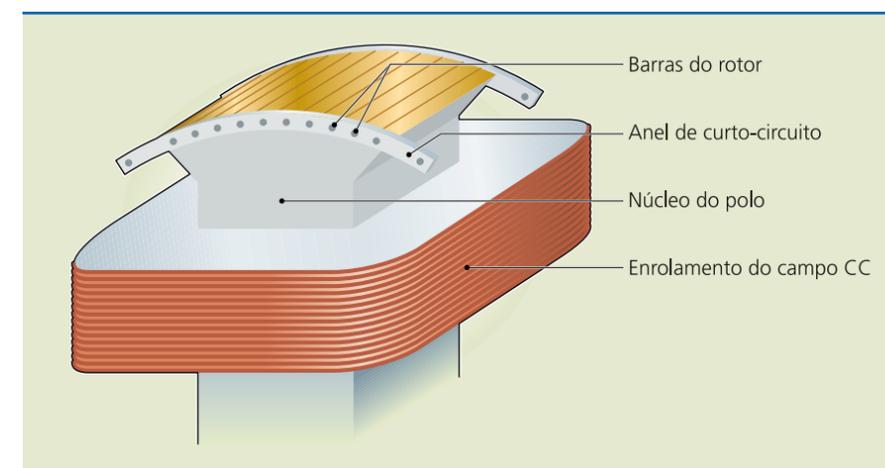


Figura 4.37
Enrolamento amortecedor em um polo de um motor síncrono.

A ação dos enrolamentos amortecedores pode ser entendida analisando a seguinte situação: quando uma corrente alternada é aplicada no enrolamento do estator, induz-se uma corrente na bobina da armadura. Os polos desse campo são submetidos a uma força, que coloca em movimento o rotor. Como a frequência inverte o sentido da corrente no estator, os polos magnéticos do rotor recebem uma força contrária, tendendo a parar o rotor. No entanto, se um meio externo fizer com que o rotor se movimente em uma velocidade muito próxima à síncrona, surgirá um conjugado que manterá o rotor em movimento, até que um polo magnético do rotor fique em sincronismo com um polo magnético oposto no estator. Nessas condições, o rotor girará na velocidade síncrona, mesmo com aplicação de carga no eixo do motor.

O meio externo a que se faz referência é justamente o enrolamento amortecedor, o qual possibilitará que o motor síncrono seja acelerado e entre em sincronismo. O enrolamento de campo CC é curto-circuitado quando se aplica a tensão alternada no estator, acelerando o motor a vazio como se fosse um motor de indução. Depois aplica-se uma tensão contínua no enrolamento de campo, para finalmente ajustar a corrente contínua, de maneira que seja mínima.



Capítulo 5

Dispositivos e acionamentos elétricos

Os dispositivos e acionamentos elétricos são utilizados em manobra, no acionamento e na proteção de equipamentos industriais quando o controle de acionar e desligar a carga não é suficiente. Eles podem ser instalados para proteger os equipamentos em relação ao circuito de alimentação e também criar uma “lógica de contato” ou de intertravamento, bloqueando manobras que não poderiam ser executadas simultaneamente.

As orientações encontradas neste capítulo foram elaboradas com base nas seguintes normas técnicas:

- IEC 60947-1 – Equipamentos de manobra e de proteção em baixa tensão: especificações.
- IEC 60947-2 – Disjuntores.
- IEC 60947-3 – Seccionadores e seccionadores fusível.
- IEC 60947-4 – Contatores de potência, relés de sobrecarga e conjuntos de partida.
- IEC 60947-5 – Contatores auxiliares, botões de comando e auxiliares de comando.
- IEC 60947-7 – Conectores e equipamentos auxiliares.
- IEC 60269-1 – Fusíveis para baixa tensão.
- IEC 60439-1 – Conjuntos de manobra e comando em baixa tensão.
- NBR 5410 – Instalações elétricas de baixa tensão.
- Normas IEC, DIN, NBR – Símbolos gráficos.

Essa área de estudo utiliza alguns termos específicos, que podem ser assim resumidos:

- **Capacidade de interrupção** – Valor de corrente presumida que o dispositivo é capaz de interromper, sob dada tensão e em condições prescritas de emprego e funcionamento.
- **Categoria de emprego** – Classificação dos dispositivos de comando de cargas de acordo com as finalidades para as quais são previstos.
- **Corrente de curto-circuito** – Sobrecorrente que resulta de uma falha, de impedância insignificante entre condutores energizados que apresentam diferença de potencial em funcionamento normal.

- **Corrente nominal** – Corrente de operação de um circuito, determinada pelas condições de emprego, em função da qual são escolhidos os diversos dispositivos.
- **Corrente de partida** – Valor eficaz da corrente absorvida pelo motor durante a partida.
- **Sobrecarga** – Quando é ultrapassado o valor da corrente nominal de um equipamento elétrico, por exemplo: excesso de carga no eixo do motor ou defeito mecânico no motor ou acoplamentos.
- **Seletividade** – Operação conjunta dos dispositivos de proteção que atuam sobre os de manobra ligados em série para a interrupção escalonada de correntes anormais, como curto-circuito. O dispositivo de proteção deve interromper a parte do circuito fase imediatamente anterior à falha. Os demais dispositivos de manobra têm de permanecer ligados, a não ser que o dispositivo anterior tenha falhado, e assim sucessivamente.

5.1 Dispositivos elétricos

Os dispositivos elétricos podem criar um campo eletromagnético no momento da energização de sua bobina, por isso são conhecidos como chaves eletromagnéticas. Eles são utilizados para abrir ou fechar contatos.

Existem diferentes tipos de dispositivos elétricos que servem para comandar, regular e proteger os motores elétricos e constituem os elementos de potência das instalações elétricas industriais. Alguns são manuais (chave de potência) e outros automáticos (contatores e relés).

Normalmente, os dispositivos utilizados em baixa tensão podem ser classificados como de seccionamento ou de proteção, conforme a figura 5.1.

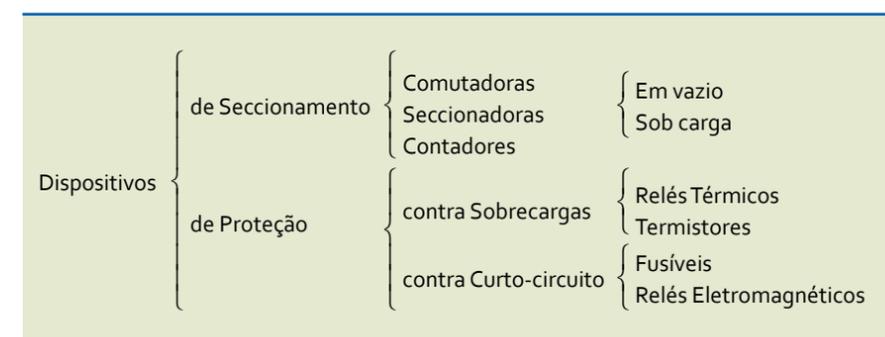


Figura 5.1
Classificação dos dispositivos elétricos.

5.2 Dispositivos de manobra

Os dispositivos de manobra servem para ligar e desligar os dispositivos elétricos de potência. Os principais são:

- **Botões** – Instalados nos circuitos com a função de ligar e desligar, ou seja, possibilitam o acionamento ou a interrupção da corrente de comando. São encontrados em diversos tipos e tamanhos, de acordo com sua utilização, por exemplo: acionadores simples, de emergência etc.



- **Botões** – Elementos de controle manual para o comando de máquinas em geral. Atuam no circuito de comando ligando e desligando o equipamento com comando via contadores.
- **Chave seccionadora** – Tipo de dispositivo mecânico de conexão de abrir e fechar um circuito. Como é uma chave de acionamento e manobra, é capaz de suportar correntes de curto-circuito por determinado tempo. As seccionadoras são identificadas pela corrente e tensão nominal e podem ser definidas quanto a seu acionamento. São divididas em quatro categorias, como mostra a tabela 5.1.

Tabela 5.1
Categorias de utilização de chaves.

Corrente alternada	Acionamento
AC20	Em vazio
AC21	Carga resistiva
AC22	Carga mista (resistiva e indutiva)
AC23	Carga altamente indutiva

- **Interruptor** – Chave seca de baixa tensão com construção e características elétricas adequadas à manobra de circuitos.

5.3 Dispositivos de acionamento

O **contator** é um dispositivo capaz de realizar um acionamento mecânico por meio de um sinal elétrico. Ao energizar sua bobina mediante uma tensão elétrica, seus contatos são acionados.

Há dois tipos de contadores:

- **Contator de potência** – Liga e desliga o motor e outras cargas elétricas.
- **Contator auxiliar** – Liga e desliga circuitos de comando, sinalização, controle, interface com processadores eletrônicos etc.

No contator de potência, os contatos principais são identificados com números unitários de 1 a 6. Esses contatos suportam correntes elevadas, que dependem da potência que o motor acionará, e são sempre do tipo NA (normalmente aberto). Há também os contatos auxiliares, que são utilizados no acionamento de eletroímãs (bobinas), chaves magnéticas, lâmpadas de sinalização ou alarmes sonoros. Esses contatos podem ser do tipo NA ou NF (normalmente fechado).

Os contadores apresentam a identificação de seus terminais e relés associados, informando sua posição e a função de cada terminal.

Observe na figura 5.2 a representação do contator. As bobinas são identificadas de forma alfanumérica (A1 e A2), de acordo com a norma IEC 947-4.

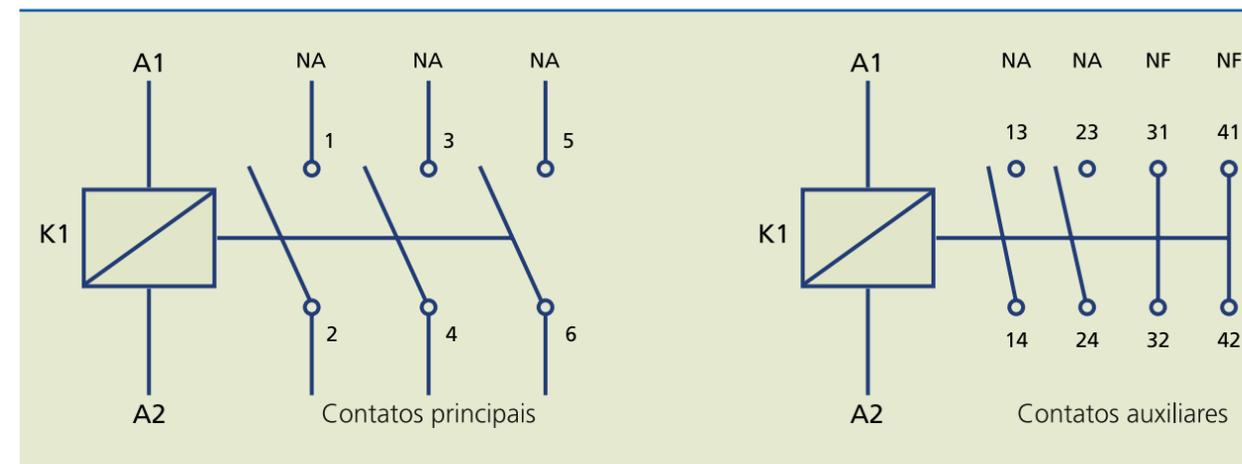


Figura 5.2

Representação do contator de acordo com a norma IEC 947-4.

Segundo a mesma norma, o circuito principal deve ser identificado por números unitários e por um sistema alfanumérico. Por exemplo, na figura 5.3, os terminais 1L1, 3L2 e 5L3 recebem os fios da rede elétrica, e nos terminais 2T1, 4T2 e 6T3 está ligada a carga.

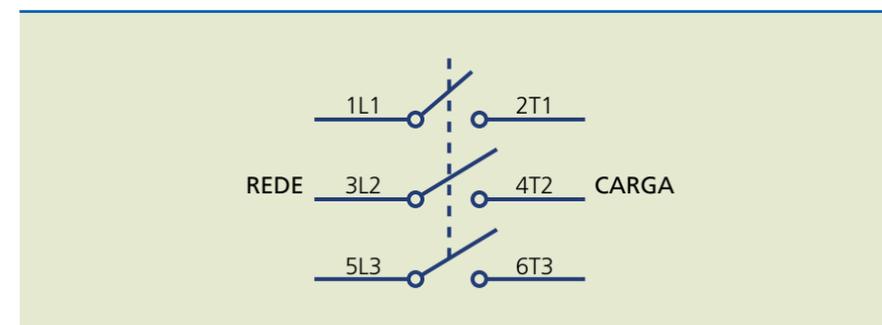


Figura 5.3

Terminais do circuito principal.

Além da codificação normal de sequenciamento e função dos contatos auxiliares, existe uma nomenclatura da terminação, que depende de sua disposição mecânica, conforme descrito a seguir:

- **Terminação “E”** – Destinada à disposição preferencial, essa terminação mostra que, na sequência de dois contatos, sendo 1NA + 1NF, o NA vem sempre em primeiro lugar, seguido do NF. Já nas sequências com número de contatos superior a dois, um contato NA inicia a sequência, seguido de todos os NF e, depois, dos contatos NA restantes. Assim, acrescenta-se à especificação do contator a terminação “E”.
- **Terminação “Z”** – Existem situações em que as características construtivas do contator não permitem a disposição preferencial “E”. Nesses casos, opta-se pela variante “Z”, que orienta para qualquer sequência que tenha em primeiro lugar todos os contatos NA, seguidos de todos os NF.

Os **terminais dos circuitos auxiliares de contadores** devem ser marcados ou identificados nos diagramas por meio de figura com dois números (figuras 5.4 e 5.5):



- **Unidade** – Representa a função do contato. Os números de função 1, 2 são próprios de contatos normalmente fechados e 3, 4 próprios de contatos normalmente abertos. Os traços antes dos números indicam a sequência. Os números de função 5, 6 são próprios de contatos NF retardados na abertura e 7, 8 de contatos NA adiantados no fechamento.
- **Dezena** – Representa a sequência de numeração. Os terminais pertencentes a um mesmo elemento de contato têm de ser marcados com o mesmo número de sequência. Logo, todos os contatos de mesma função devem ter número de sequência diferente.

Figura 5.4

Sequência e função dos contatos auxiliares.

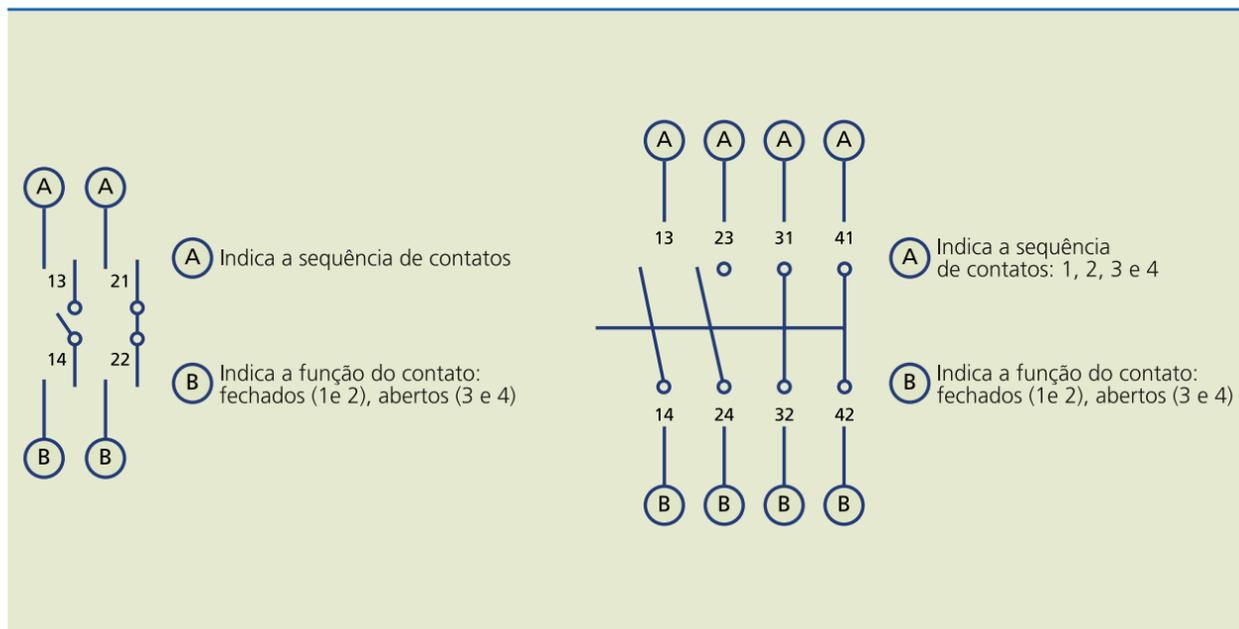
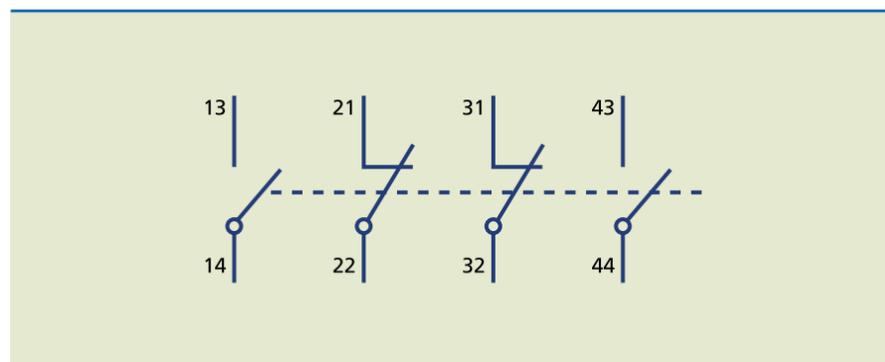


Figura 5.5

Número de sequência dos contatos auxiliares.



O **relé** é um dispositivo comutador eletromecânico acionado por um eletroímã, utilizado no acionamento de cargas de alta tensão e/ou alta corrente por meio de um circuito de baixa tensão. É formado por um eletroímã acoplado a uma armadura móvel que tem por finalidade abrir ou fechar contatos. Pode ser acionado com controles que fornecem baixas correntes. Desse modo, com apenas um circuito bem simples, podem-se controlar máquinas robustas, como as encontradas em instalações industriais.

5.4 Dispositivos de proteção

Durante a partida, os motores elétricos apresentam intensidade de corrente superior à corrente de funcionamento normal com carga. Por mais que tenham sido projetados para suportá-la, poderia ocorrer sobrecarga no circuito de alimentação do motor. Para proteger o circuito do motor em sobrecarga ou curto-circuito, são utilizados dispositivos de seccionamento e proteção.

O **disjuntor** é um dispositivo de manobra e de proteção capaz de estabelecer, conduzir e interromper correntes em condições normais do circuito. Além disso, pode estabelecer e conduzir por tempo especificado e interromper correntes de curto-circuito.

O **disjuntor-motor** é um dispositivo que assegura o comando e a proteção do motor. É basicamente composto de disparadores térmicos e magnéticos que atuam na partida do motor elétrico contra:

- queima por variação de tensão e corrente na rede;
- elevação de temperatura do motor e dos condutores;
- sobrecargas.

O uso do disjuntor associado ao contator possibilita que a ligação do motor seja feita a distância. Nessa associação disjuntor-contator, ambos exercem a função de proteção.

A finalidade dos **fusíveis** é proteger os sistemas elétricos contra curto-circuito. Na proteção de circuitos de motores, são usados os da classe funcional (gL), ou seja, com função de “proteção geral”. Sua interrupção é de efeito retardado (gG – para aplicação geral e com capacidade de interrupção em toda zona tempo-corrente), pois os motores, por serem cargas indutivas, solicitam corrente superior à nominal no instante da partida. Os fusíveis de efeito retardado mais usuais são os tipos NH e *Diazed* retardado.

Os **relés bimetálicos**, também denominados relés de sobrecarga, são usados para proteger equipamentos elétricos de uma possível sobrecarga, interrompendo o circuito acima do valor nominal de corrente. Nesses relés pode-se selecionar qualquer valor de corrente, pois sua corrente de atuação é ajustável em uma faixa.

O **relé de falta de fase** é constituído de um componente eletroeletrônico que monitora a presença ou ausência das três fases. Caso falte uma fase, o relé evita que o circuito funcione. Alguns modelos monitoram a presença do neutro, motivo pelo qual são denominados relés de falta de fase e neutro. Esses dispositivos são utilizados na proteção de equipamentos, principalmente motores, contra avarias provenientes da permanência da alimentação com falta de fase. O motor fica monitorado por meio de um dos contatos NA do relé: enquanto as três fases estão presentes, o relé permanece ligado; quando faltar alguma fase, a chave se abre, desligando o motor.



5.5 Simbologia

A simbologia é utilizada para representar no desenho ou no esquema elétrico os dispositivos e os componentes físicos. Os contatos dos dispositivos elétricos devem ser representados nos circuitos na condição normalmente aberto (contatos NA).

Nos diagramas de circuitos de comandos eletromecânicos, devemos padronizar os símbolos gráficos usados para representar os dispositivos, bem como a relação entre eles. O significado e a simbologia têm de estar de acordo com as abreviaturas das principais normas nacionais e internacionais adotadas na construção e instalação de componentes. As normas utilizadas para a simbologia são:

- NBR 5037 – Símbolos gráficos de eletricidade: fusíveis, centelhadores e para-raios.
- NBR 5272 – Símbolos gráficos de eletricidade: dispositivos de partida.
- NBR 5274 – Símbolos gráficos de eletricidade: contatos, chaves, interruptores, dispositivos de alarme e de sinalização.
- NBR 5446 – Símbolos de relação usados na confecção de esquemas.

Segundo essas normas, os dispositivos elétricos, como contatores, fusíveis, transformadores e outros componentes, devem ser identificados por letra maiúscula seguida do número do setor de referência, como exemplifica a tabela 5.2.

Tabela 5.2
Alguns símbolos literais.

Símbolo	Componente	Exemplos
F	Dispositivos de proteção	Fusíveis, para-raios, disparadores, relés
H	Dispositivos de sinalização	Indicadores acústicos e ópticos
K	Contatores	Contatores de potência e auxiliares
M	Motores	–
Q	Dispositivos de manobra para circuitos de potência	Disjuntores, seccionadores, interruptores
S	Dispositivos de manobra, seletos auxiliares	Dispositivos e botões de comando, de posição (fim de curso) e seletos
T	Transformadores	Transformadores de distribuição de potência, de potencial, de corrente, autotransformadores

Os dispositivos podem ser representados por símbolos específicos, conforme padronização das normas NBR, DIN e IEC. A tabela 5.3 apresenta alguns exemplos.

Símbolo	Descrição	Símbolo	Descrição
	Botoeira NA		Botoeira NF
	Botoeira NA com retorno por mola		Botoeira NF com retorno por mola
	Contatos tripolares NA, ex: contatores de potência		Fusível
	Acionamento eletromagnético, ex: bobina do contador		Contato normalmente aberto (NA)
	Relé térmico		Contato normalmente fechado (NF)
	Disjuntor, com elementos térmicos e magnéticos, proteção contra correntes de curto e sobrecarga		Acionamento temporizado na ligação
	Disjuntor com elemento magnético, proteção contra corrente de curto-circuito		Lâmpada / sinalização
	Transformador trifásico		Motor trifásico

Tabela 5.3
Alguns símbolos de dispositivos.

5.6 Comandos elétricos

As manobras de intertravamento ou sequenciais podem ser feitas pela combinação de contatos elétricos e dispositivos eletromecânicos, que, trabalhando em conjunto, são capazes de implementar funções lógicas a serem realizadas em determinado processo. Essa associação de dispositivos elétricos e eletromecânicos deu origem aos chamados painéis (ou quadros) de comandos elétricos, que são montados em caixas metálicas.

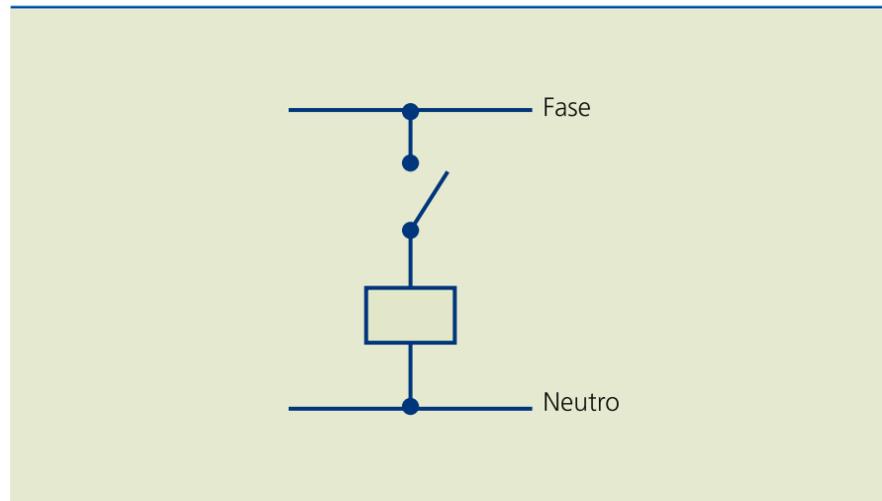


5.6.1 Funções lógicas

Para montar um painel de comando, é fundamental conhecer as funções lógicas básicas dos principais dispositivos de acionamento. São elas:

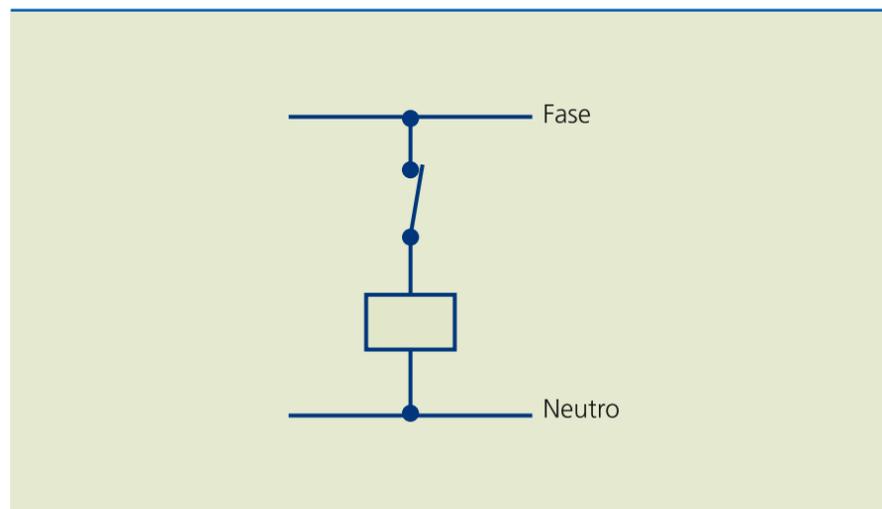
Função normal – O circuito utiliza contato para estabelecer uma relação lógica muito simples. Caso o contato NA seja acionado, a carga será acionada; caso o contato não seja acionado, a carga será desligada (figura 5.6).

Figura 5.6
Função normal.



Função inversora – Do ponto de vista lógico, o circuito realiza uma “inversão” do estado lógico de sua entrada; portanto, o estado lógico da saída é invertido em relação à entrada (figura 5.7).

Figura 5.7
Função inversora.



Função “e” – Essa função envolve no mínimo duas entradas, relacionando-as logicamente de maneira que uma “e” outra sejam acionadas simultaneamente para que a saída esteja ligada. Em um circuito, ela é representada por dois contatos em série, como mostra a figura 5.8.

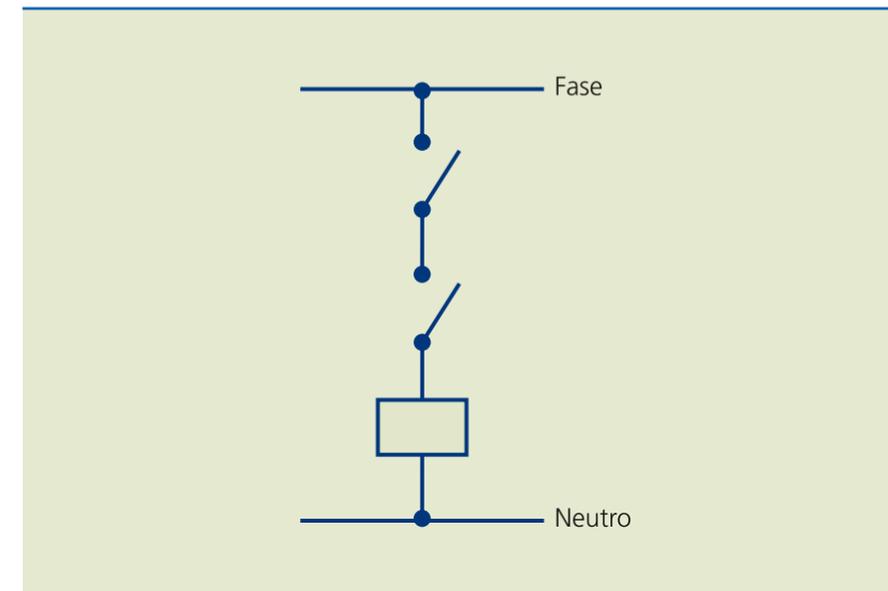
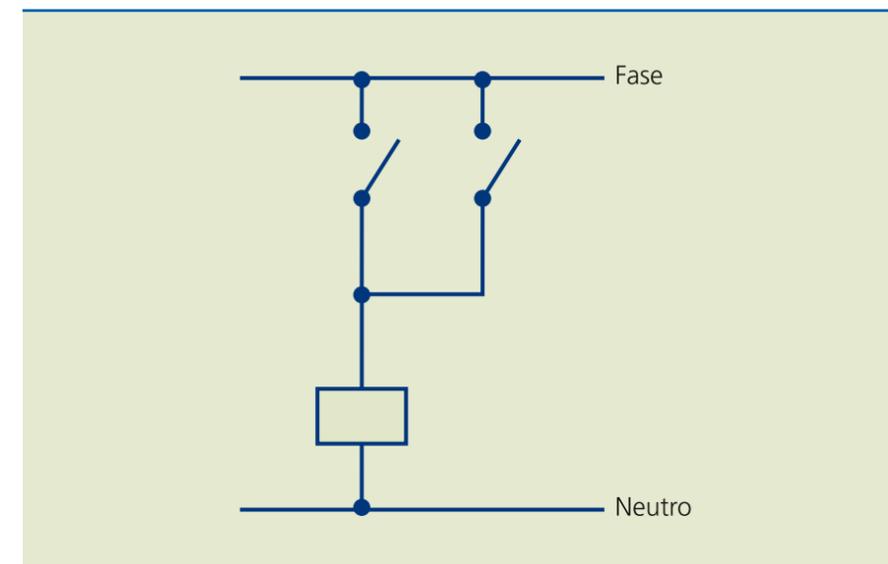


Figura 5.8
Função “e”.

Função “ou” – Colocando os contatos em paralelo, implementa-se a função lógica “ou”. Para isso, basta que um contato “ou” outro seja acionado, como no circuito da figura 5.9.

Figura 5.9
Função “ou”.



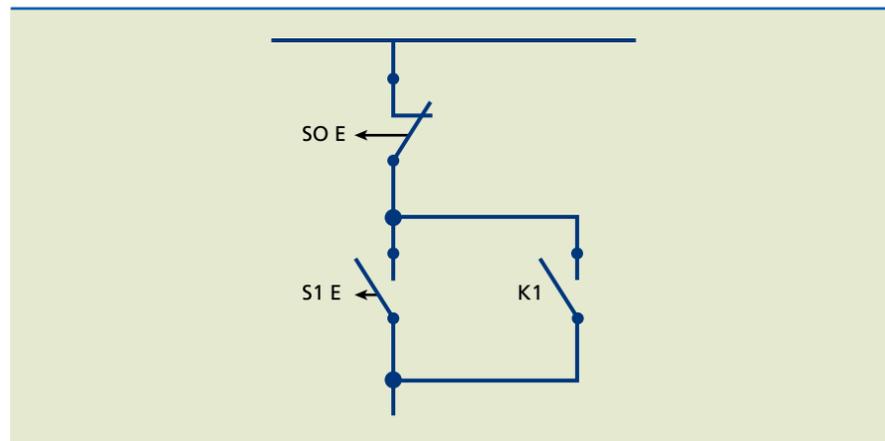
5.6.2 Formas de atuação dos contatos

É necessário conhecer os componentes básicos dos comandos e também sua finalidade para ler e compreender a representação gráfica de um circuito elétrico. Alguns desses elementos são:

Contato de selo – Mantém a corrente circulando pelo contator, mesmo depois de o operador ter retirado o dedo da botoeira. O contato de selo é sempre ligado em paralelo com o contato de fechamento da botoeira (figura 5.10).

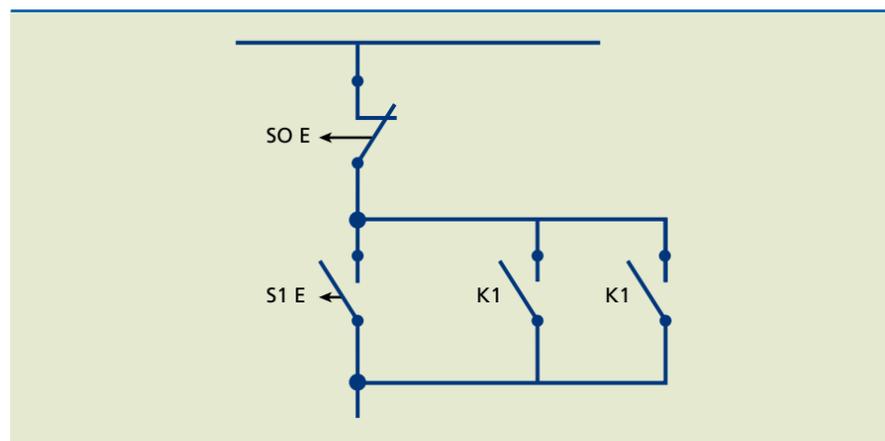


Figura 5.10
Contato de selo.



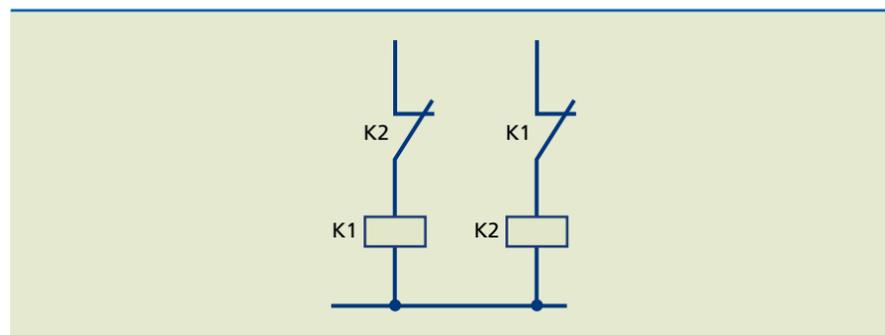
Contato de selo com dois contatos – Para segurança no sistema, podem-se utilizar dois contatos de selo (figura 5.11).

Figura 5.11
Contato de selo com dois contatos.



Intertravamento – É usado quando em algumas manobras o funcionamento simultâneo de dois ou mais contadores é indesejável. Nesse caso, os contatos devem ficar antes da alimentação da bobina dos contadores (figura 5.12).

Figura 5.12
Intertravamento.



Intertravamento com dois contatos – Quando cargas com altas correntes são acionadas, utilizam-se dois contatos de intertravamento, ligados em série, elevando a segurança do sistema (figura 5.13).

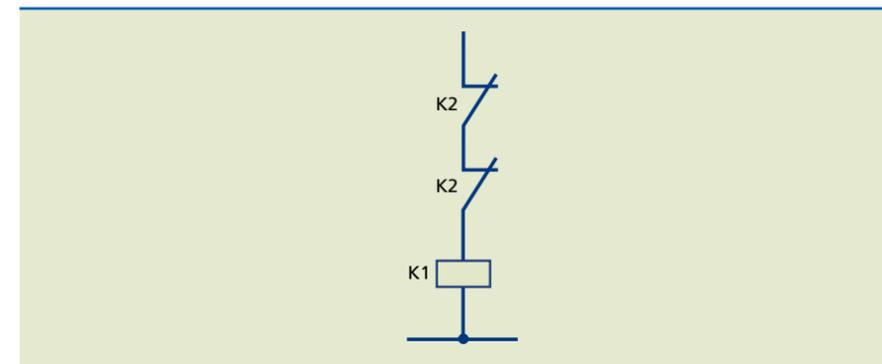
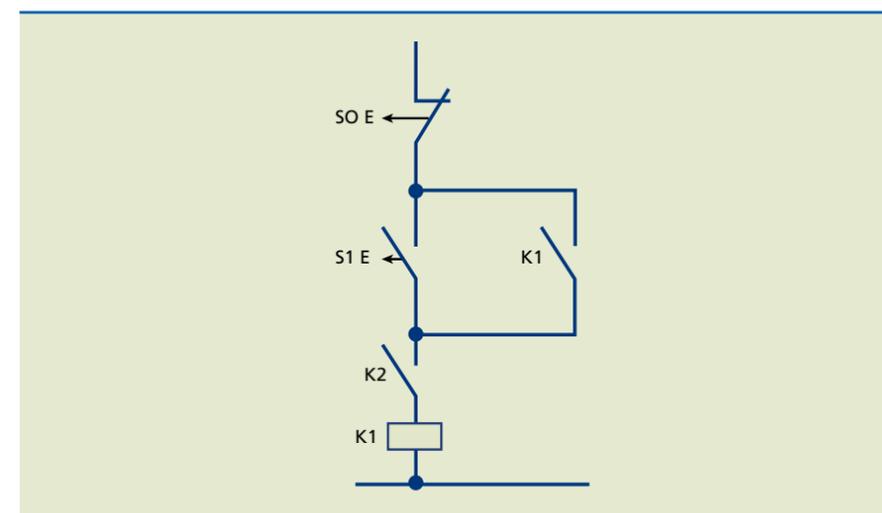


Figura 5.13
Intertravamento com dois contatos.

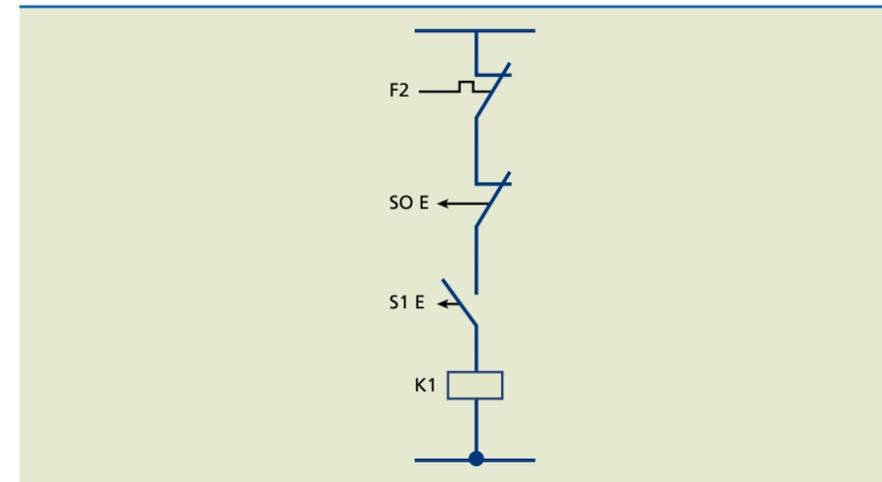
Ligação condicionada – Condiciona-se o funcionamento do contator K1 ao contator K2, colocando um contato NA do contator K2 antes do contator K1, o que significa que K1 pode ser operado apenas quando K2 estiver fechado (figura 5.14).

Figura 5.14
Ligação condicionada.



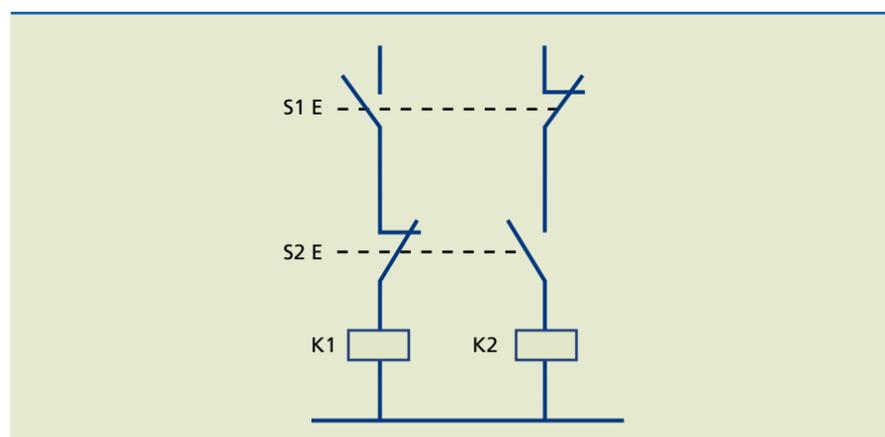
Proteção do sistema – Os relés de proteção contra sobrecarga devem estar sempre em série com as botoeiras de desligamento (figura 5.15).

Figura 5.15
Proteção do sistema.



Intertravamento com botoeiras – Não se recomenda esse tipo de ação em motores com cargas pesadas. Para representação do intertravamento com botoeiras, sugere-se que uma das botoeiras venha indicada com seus contatos invertidos (figura 5.16).

Figura 5.16
Intertravamento com botoeiras.



5.6.3 Diagramação de circuitos de comando

Do ponto de vista de diagramação, os circuitos destinados a acionamentos elétricos classificam-se em:

- **Circuito de força ou de potência** – É responsável por estabelecer a alimentação, ou seja, a conexão dos terminais da carga à rede elétrica. Fazem parte desse circuito os dispositivos de manobra e de proteção e a carga elétrica do circuito.
- **Circuito de comando** – É responsável por comandar o circuito de força, determinando quando a carga será ligada ou desligada. Mostra as bobinas dos contatores e seus contatos interligados seguindo a lógica de contato. Trata-se de um circuito de baixa potência, destinado a implementar a lógica do acionamento.

5.7 Partida de motores elétricos

Entre os diferentes modelos de motores elétricos, os mais utilizados são os trifásicos com rotor de gaiola. Por isso, vamos analisar aqui os circuitos elétricos utilizados na partida desses motores.

A partida de um motor trifásico com rotor de gaiola deve ser direta por meio de um contator. O uso de contatores fornece elevado conjugado de partida e máxima aceleração. Contudo, se a corrente de partida do motor apresentar valor entre seis e sete vezes maior que o da corrente nominal e não for possível partida direta, pode-se usar um sistema de partida indireta para reduzir o valor da corrente. Os sistemas de partida indireta que utilizam tensão reduzida são:

- chave estrela-triângulo;
- chave compensadora ou autotrafo;
- chave de partida estática ou *soft-start*;
- inversor de frequência.

Esses sistemas de partida indireta serão explicados com mais detalhes na próxima seção.

As partidas sucessivas em intervalos muito reduzidos e o elevado valor da corrente de partida nos motores de indução podem ocasionar aumento excessivo de temperatura nos enrolamentos, danificando-os ou reduzindo sua vida útil. Para garantir condições seguras de partida, a norma NBR 7094 estabelece um regime de partida mínimo que os motores devem ser capazes de realizar:

- Duas partidas sucessivas, a primeira delas feita com o motor frio, isto é, com os enrolamentos à temperatura ambiente, e a segunda logo a seguir, porém depois de o motor ter desacelerado até o repouso. Essa condição simula o caso em que a primeira partida do motor é abortada, por exemplo, pelo desligamento da proteção, permitindo uma segunda tentativa logo a seguir.
- Uma partida com o motor quente, ou seja, com os enrolamentos à temperatura de regime. Essa condição simula o desligamento acidental do motor em funcionamento normal, por exemplo, por falta de energia na rede, permitindo retomar o funcionamento logo após o restabelecimento da energia.

5.7.1 Métodos de partida

Os motores são comandados por chaves de partida. As mais empregadas são:

- Partida direta/reversora – Acionamento de pequenos motores (figura 5.17).
- Partida estrela-triângulo – Acionamento de grandes motores sem carga (figura 5.17).
- Partida compensadora – Acionamento de grandes motores com carga.
- Partida com *soft-starter* – Acionamento de grandes motores com carga (figura 5.17).
- Partida com inversor de frequência – Acionamento de pequenos e grandes motores.

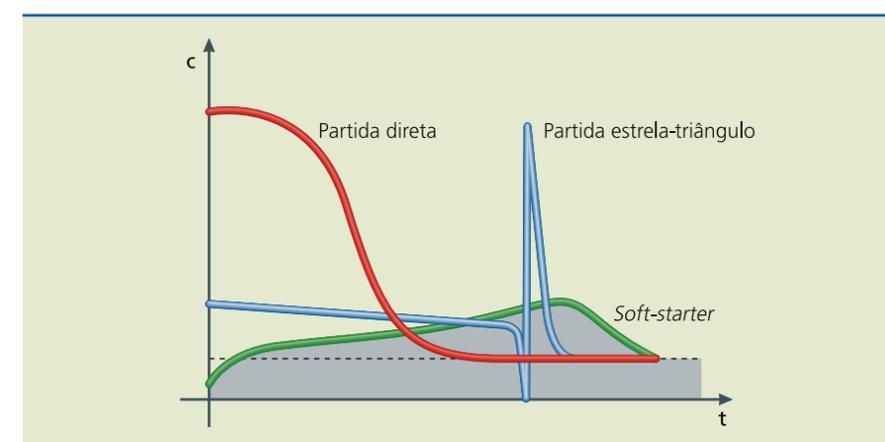


Figura 5.17
Curva de corrente · tempo em diversos tipos de partida.

Todas as chaves de partida possuem um circuito principal e um de comando, com as seguintes funções:



- **Circuito principal ou de força** – É responsável pela alimentação do motor.
- **Circuito de comando** – É responsável por comandar o circuito de força, determinando quando o motor será ligado ou desligado.

As chaves de partida são compostas por:

- **Dispositivos de proteção** – Fusível, relé térmico e disjuntor motor.
- **Dispositivos de comando** – Botão, contator e temporizador.

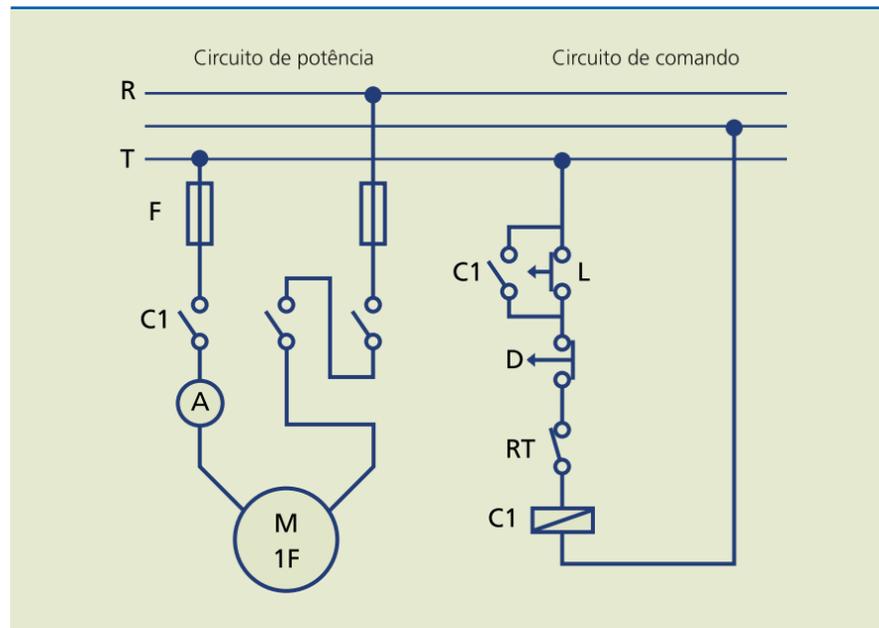
5.7.2 Tipos de partida: circuitos de comando e força

A seguir apresenta-se o desenho de sistemas ou chaves de partida para motores elétricos, incluindo o circuito funcional de comando e o circuito multifilar de força.

Chave de partida de um motor monofásico

Figura 5.18

Chave de partida de um motor monofásico.



Chave de partida direta de um motor trifásico

Nesses dois métodos de partida, os motores podem ser acionados diretamente, desde que se satisfaçam as seguintes condições:

- A corrente nominal da rede é tão elevada que a corrente de partida do motor não se torna relevante.
- A corrente de partida do motor é de baixo valor, porque sua potência é pequena.
- A partida do motor é feita em vazio ou com mínima carga, o que reduz a corrente de partida. É permitida a partida direta de motores trifásicos de até 5 cv em 220 V e de 7,5 cv em 380 V pelas concessionárias de fornecimento de energia elétrica.

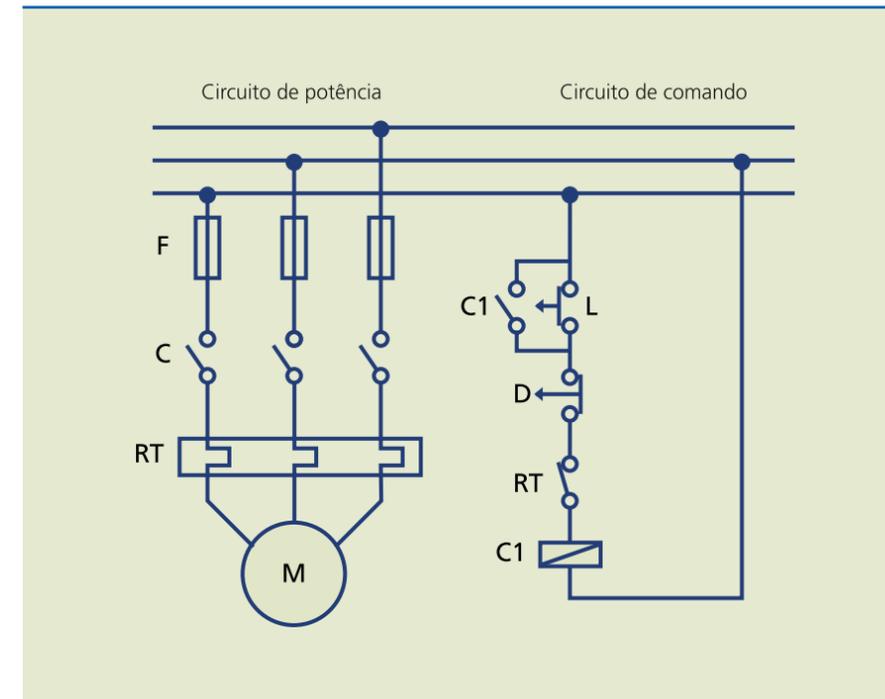


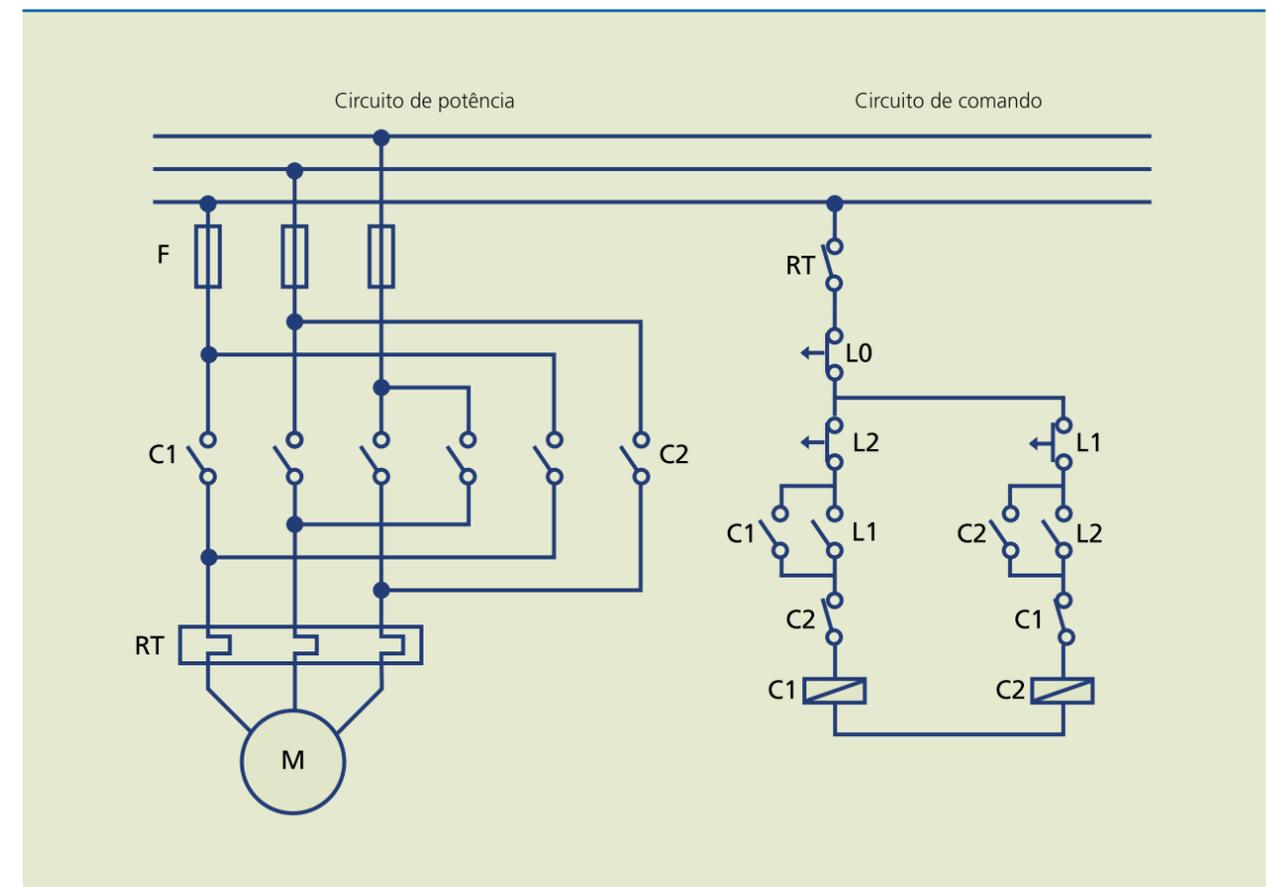
Figura 5.19

Chave de partida direta de um motor trifásico.

Chave de partida de um motor trifásico, com reversão

Figura 5.20

Chave de partida de um motor trifásico, com reversão.



Chave de partida de um motor trifásico, com sistema estrela-triângulo

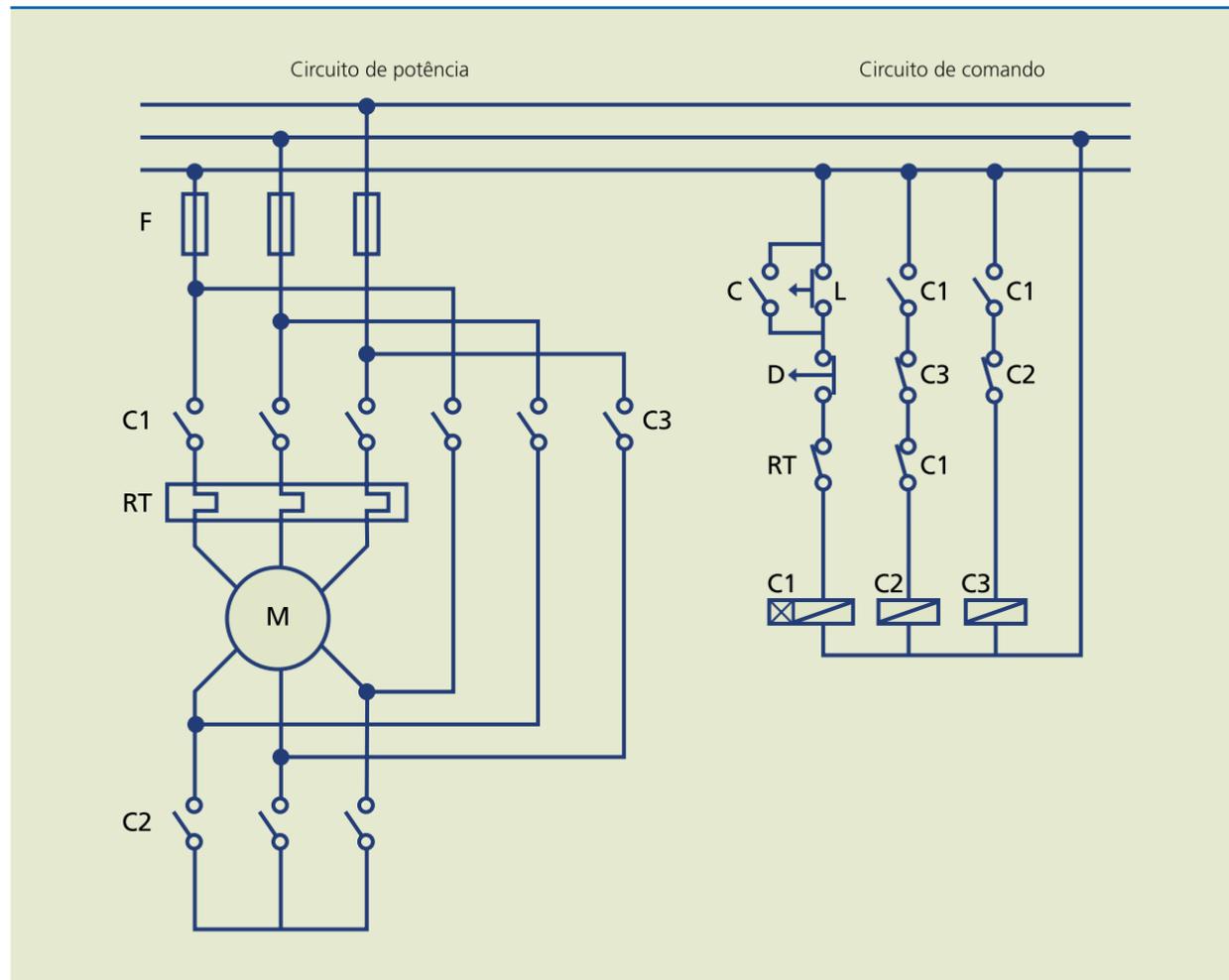


Figura 5.21

Chave de partida de um motor trifásico, com sistema estrela-triângulo.

A chave estrela-triângulo é um dispositivo que durante a partida mantém em ligação estrela as três fases do motor até atingir uma rotação próxima de 90% da nominal, passando a ligação para triângulo. Isso significa que a tensão por fase, na ligação estrela, será três vezes menor que a tensão de alimentação, fazendo com que a corrente de linha diminua três vezes, assim como seu conjugado motor.

Para utilizar essa chave de partida, é fundamental que o motor tenha:

- possibilidade de ligação em dupla tensão, tais como 220/380 V, 380/660 V, 440/760 V, a menor tensão coincidindo com a tensão de linha da rede;
- no mínimo seis terminais.

Nessa partida, as bobinas do motor recebem apenas 58% da tensão que deveriam receber. Tal método consiste na alimentação do motor com redução de tensão nas bobinas durante a partida.

Vantagens

- Custo reduzido.
- Número ilimitado de manobras.
- Componentes ocupam pouco espaço.
- Corrente de partida fica reduzida para aproximadamente um terço da nominal.

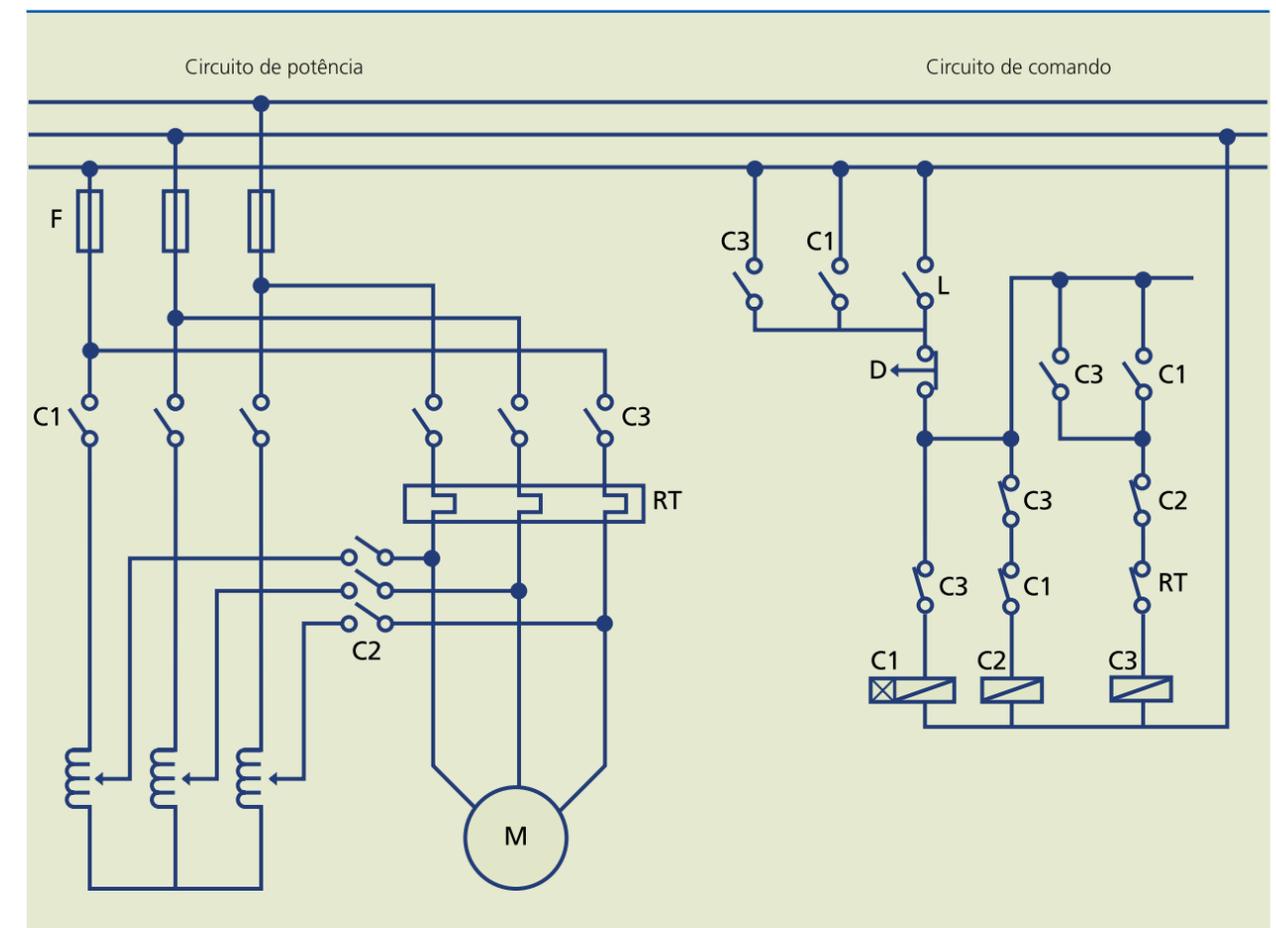
Desvantagens

- A chave só pode ser aplicada em motores com no mínimo seis terminais acessíveis.
- A tensão de linha da rede deve coincidir com a tensão da ligação triângulo do motor.
- Reduzindo a corrente de partida em um terço, reduz-se também o momento de partida em um terço.
- Se o motor não atingir 90% da velocidade nominal no momento da troca de ligação, o pico de corrente na comutação será quase como se fosse uma partida direta.

Figura 5.22

Partida por chave compensadora.

Partida por chave compensadora



Esse método consiste no uso de um autotransformador e sua ligação é feita em série com as bobinas. Ele diminui a corrente absorvida da linha por causa da queda de tensão e, conseqüentemente, a corrente sofre redução proporcional a esta.

Apesar de apresentar alto custo inicial, esse método permite um ajuste simples da corrente, bastando mudar a tensão fornecida ao motor por meio dos *taps* ou regulador do autotransformador. Normalmente, o autotransformador de partida vem equipado com *taps* ou bornes de 65% e 80%. A redução da corrente de partida depende do *tap* em que estiver ligado o autotransformador. É utilizada em motores que partem com carga, porém o conjugado resistente de partida da carga deve ser inferior à metade do conjugado de partida do motor; além disso, pode ser de tensão única, com apenas três terminais. Em geral, esse tipo de partida é empregado em motores de potência elevada, acionando cargas com alto índice de atrito.

Vantagens

- A passagem da derivação de tensão reduzida para a tensão de suprimento não ocasiona elevação da corrente, pois, durante a comutação, o autotransformador comporta-se como reatância, impedindo sua elevação.
- A variação gradativa dos *taps*.

Desvantagens

- Custo mais elevado que o da chave Y- Δ .
- Chave volumosa e pesada.

Comparativo entre as chaves estrela-triângulo e compensadora

Tabela 5.4
Comparativo entre chaves.

Estrela-triângulo	Compensadora
Custo menor	Custo maior
Menores dimensões	Tipo de chave com maiores dimensões
Deve partir praticamente a vazio	Admite partidas com carga, pois pode variar o <i>tap</i> conforme exigência da carga, como ex. as partidas longas
A corrente de partida é reduzida para 33%	A corrente de partida é reduzida para 64% no <i>tap</i> de 80% e 42% no <i>tap</i> de 65%

A tabela 5.5 mostra as chaves que podem ser utilizadas para a respectiva execução dos enrolamentos, número de cabos e tensão de linha da rede.

Motor			Tipo de chave de partida		
Execução dos enrolamentos	Número de cabos	Tensão de linha	Direta	Estrela-triângulo	Compensadora
220	3	220	X		X
380	3	380	X		X
440	3	440	X		X
220/380	6	220	X	X	X
		380	X		X
220/440	6	220	X		X
		440	X		X
380/660	6	380	X	X	X
380/760	6	380	X		X
440/760	6	440	X	X	X
220/380/440/660	9/12	220	X	X	X
		380	X	X	X
		440	X		X
220/380/440/760	9/12	220	X	X	X
		380	X		X
		440	X	X	X

Tabela 5.5

Chaves utilizadas para execução dos enrolamentos, número de cabos e tensão de linha na rede.

5.8 Chaves de partida de motores tipo *soft-starter*

Soft-starters são chaves de partida estática destinadas à aceleração, desaceleração e proteção de motores de indução trifásicos. São utilizadas em substituição aos métodos de partida estrela-triângulo, chave compensadora ou partida direta, sendo recomendadas basicamente em partidas de motores de indução CA tipo gaiola.

Vantagens

- Limitam a corrente de partida.
- Evitam picos de corrente.
- Protegem e proporcionam paradas suaves.
- Contribuem para a redução dos esforços no motor durante a partida.
- Aumentam a vida útil do motor e das partes mecânicas da máquina.
- Permitem economia de energia.



O controle da tensão aplicada no motor permite obter partidas e paradas suaves, ou seja, com o ajuste adequado das variáveis ou o ajuste do ângulo de disparo dos tiristores, o torque produzido é ajustado à necessidade da carga, garantindo que a corrente solicitada, sem mudanças de frequência, seja a mínima necessária (figura 5.23).

Figura 5.23

Esquema genérico de um *soft-starter* implementado com seis tiristores para acionar um motor de indução trifásico.

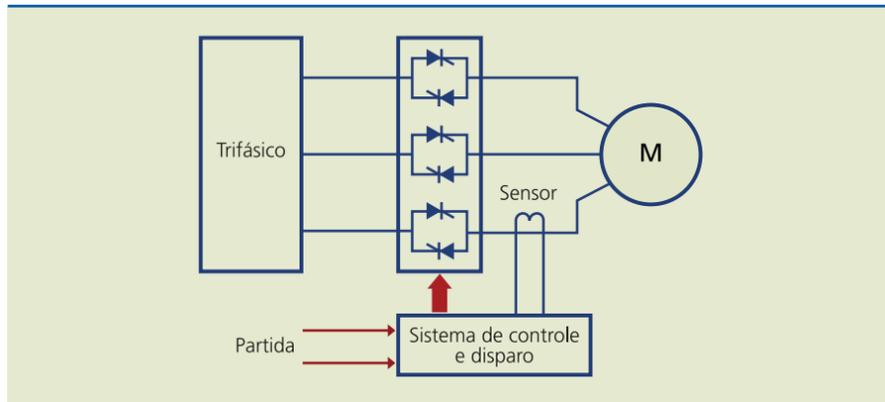
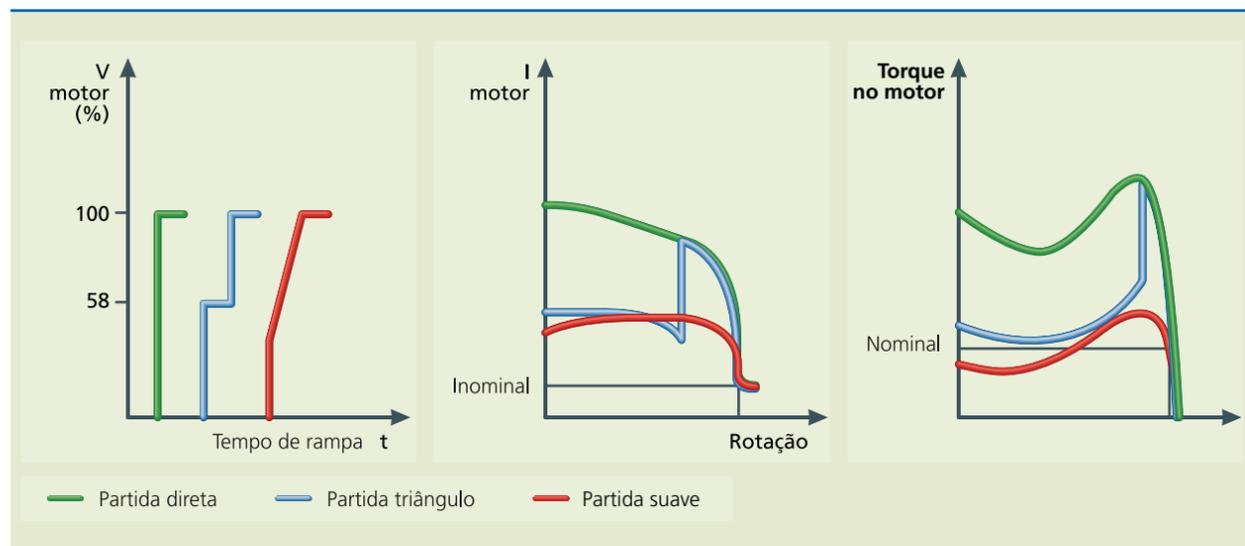


Figura 5.24

Perfis comparativos de chaves de partidas.

A figura 5.24 mostra um gráfico comparativo das tensões, correntes e torques no motor para os tipos de partidas examinados.



5.8.1 Princípio de funcionamento

As chaves de partida são baseadas em componentes chamados tiristores (SCR). A tensão na partida é reduzida por meio do ângulo de condução dos tiristores, diminuindo os picos de corrente gerados pela inércia da carga mecânica. O *soft-starter* controla a potência do motor, sem alterar sua frequência. Isso é realizado pelo controle de disparo dos SCR, que atua em dois pontos:

- Controle por tensão zero.
- Controle de corrente zero.

O circuito de controle deve temporizar os pulsos de disparo a partir do último valor de zero da forma de onda, tanto da tensão como da corrente. O sensor pode ser instalado em uma única fase e, nesse caso, o sistema mede somente o ponto de cruzamento de uma fase ou um para cada fase.

O funcionamento do *soft-starter* se dá por meio do comando, microprocessado, que controla os tiristores e ajusta a tensão enviada ao estator do motor. Dessa maneira, é possível suavizar o acionamento dos altos conjugados de aceleração do motor de indução e proteger a rede elétrica das correntes de partida elevadas.

Para que a partida do motor ocorra de modo suave, deve-se parametrizar a tensão inicial (V_p) de modo que ela assumo o menor valor possível e seja suficiente para iniciar o movimento da carga. A partir desse ponto, a tensão sobe linearmente segundo um tempo também parametrizado (t_r) até atingir o valor nominal (figura 5.25).

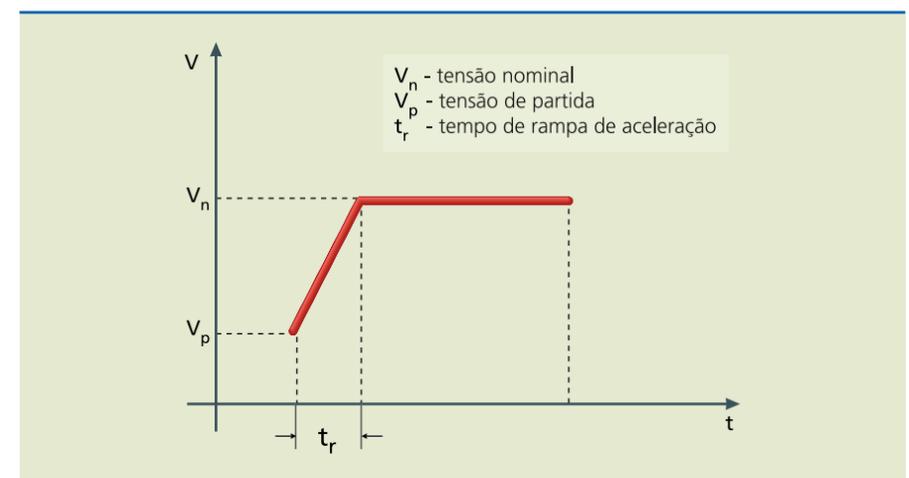


Figura 5.25

Curva de aceleração de um motor de indução usando *soft-starter*.

Na frenagem, a tensão é reduzida instantaneamente a um valor ajustável (V_t), que deve ser parametrizado no nível em que o motor inicia a redução da rotação. Assim, a tensão diminui linearmente (rampa ajustável, t_r) até a tensão final (V_z), quando o motor para de girar. Nesse instante, a tensão é desligada, conforme mostra a figura 5.26.

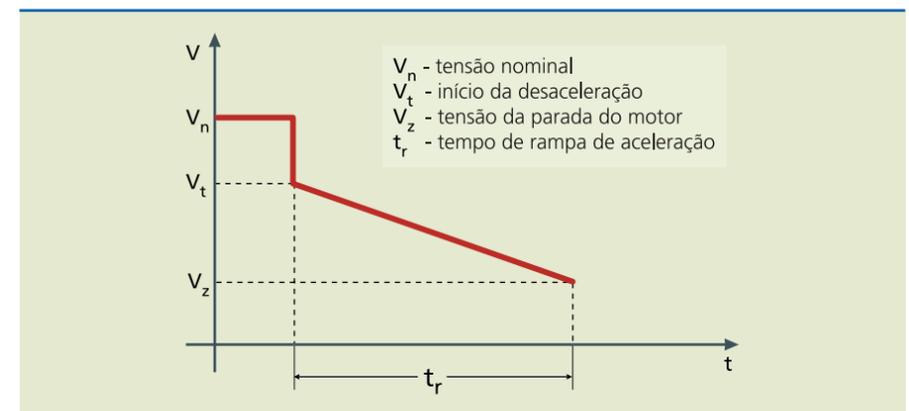


Figura 5.26

Curva de desaceleração de um motor de indução usando *soft-starter*.

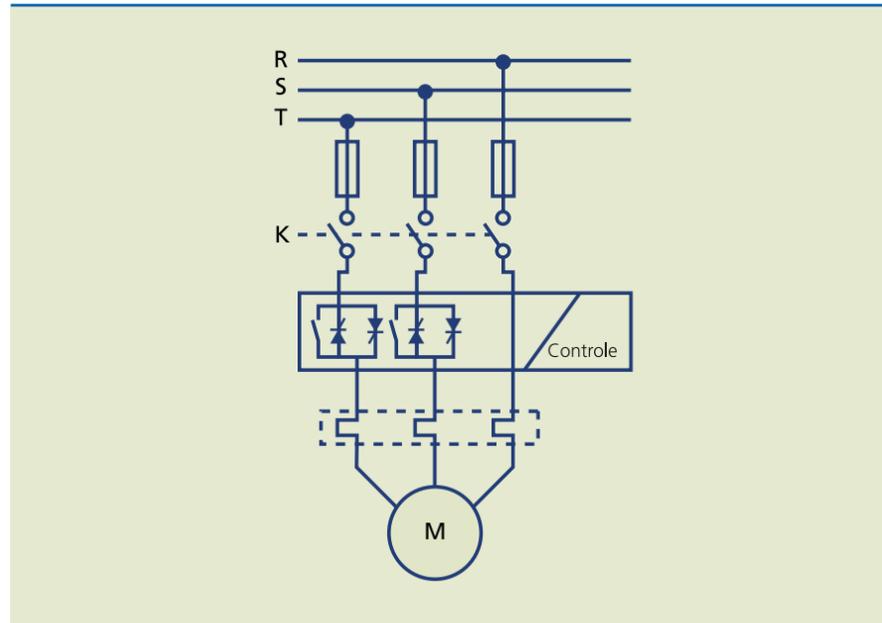


O *soft-starter* também possui circuitos de controle da corrente. Nesse dispositivo, pode-se fixar o valor da corrente por determinado tempo, permitindo que cargas de alta inércia sejam aceleradas com a menor corrente possível, além de limitar a corrente máxima nas partidas de motores em fontes limitadas (barramento não infinito).

Alguns fabricantes projetam seus *soft-starters* para controlar apenas duas fases, utilizando a terceira como referência. Essa técnica, ilustrada na figura 5.27, simplifica o circuito de controle e reduz o custo do dispositivo.

Figura 5.27

Soft-starter com apenas duas fases controladas.



5.8.2 Sequência de funcionamento do *soft-starter*

Ligando o tiristor

a) Terminais:

- Ânodo
- Cátodo
- Gate

b) Tiristor ligado: condução entre ânodo e cátodo.

c) Comportamento: similar a um diodo em condução direta.

d) Método de acionamento: aplicação de pulso no *gate*, positivo em relação ao cátodo.

e) Manutenção: o tiristor permanecerá ligado enquanto a corrente entre ânodo e cátodo for maior que a corrente de manutenção do dispositivo.

Desligamento do tiristor

a) Ocorre quando:

- Não há pulso de disparo presente no *gate*.
- A corrente entre ânodo e cátodo é menor que a de manutenção do dispositivo (na faixa de alguns miliamperes).

b) Corrente alternada: a cada semiciclo o tiristor desliga quando $I_{ak} = 0$.

c) Cargas reativas (indutivas e capacitivas):

- Quando a tensão passa por 0, a corrente não está em 0.
- Desligamento: sempre na passagem da corrente por 0.

Variação do ângulo de disparo.

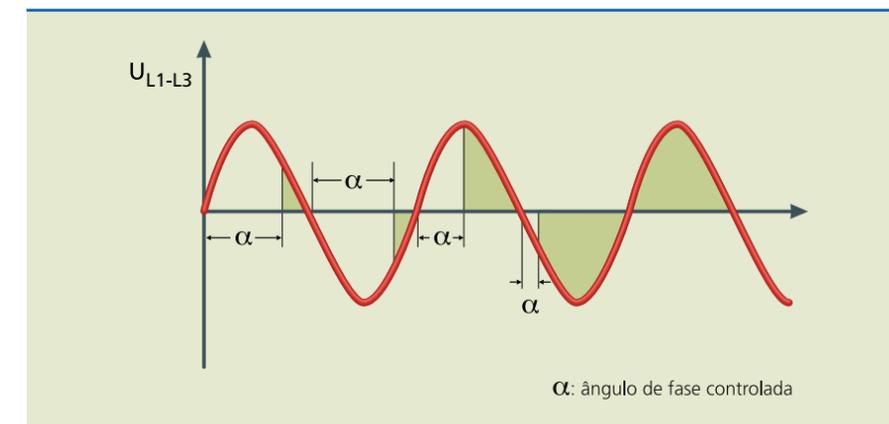


Figura 5.28

Varição do ângulo de disparo.

Partidas em rampa ou curva

Parâmetros da partida:

- Tensão inicial.
- Tempo de aceleração.
- Perfil de variação da tensão.

Ao término do tempo de aceleração: alimentação do motor com tensão plena.

Partidas em limitação de corrente

Durante a partida:

- Corrente do motor mantida constante ($K \times I_{nominal}$).
- Proteção durante a partida: limitação de tempo.

Parâmetros:

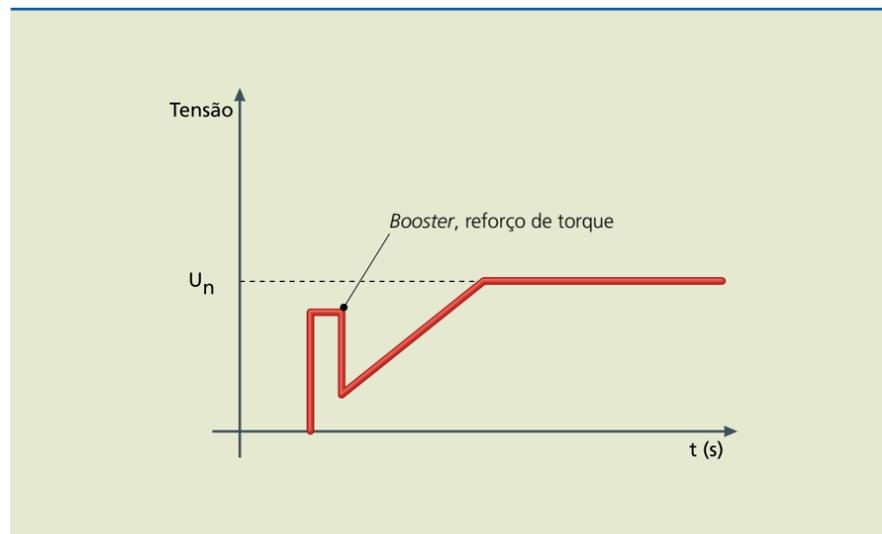
- $I_{nominal}$ do motor.
- $I_{partida}$ desejada ou múltiplo de $I_{nominal}$.
- Tempo máximo de partida: conforme o tempo máximo de rotor bloqueado suportado pelo motor.



Pulso de tensão na partida

Pulso de tensão (*kick-start*)

Figura 5.29
Pulso de tensão.



Permite um pulso inicial de tensão que, aplicado no motor, proporciona um reforço de torque na partida, necessário para a partida de cargas com elevado atrito estático.

Algumas características e vantagens das chaves *soft-starters*

- Ajuste da tensão de partida por um tempo predefinido.
- Partida com tensão reduzida.
- Pulso de tensão na partida para cargas com alto conjugado de partida.
- Redução rápida de tensão a um nível ajustável (redução de choques hidráulicos em sistemas de bombeamento).
- Proteção contra falta de fase, sobrecorrente, subcorrente etc.
- Não altera as conexões do bobinado do motor.

Desvantagens da aplicação de chaves *soft-starters*

- Dissipação de potência:
 - Geram aquecimento por efeito Joule nos tiristores.
 - Exigem métodos eficientes de ventilação forçada.
 - Solução: contator *by-pass*.
- Sensibilidade a surtos de tensão: semicondutores e eletrônica.
- Possibilidade de geração de interferência eletromagnética.
- Produção de distúrbios harmônicos, principalmente durante a partida.
- Necessidade de proteção especial no alimentador: fusíveis de atuação ultrarrápida.
- Pouca resistência a curtos-circuitos na carga acionada.

5.8.3 Recursos de um *soft-starter*

Os *soft-starters* existentes no mercado são equipados com interfaces homem-máquina ou painel de LED para informar o *status* do sistema. Quanto aos recursos que um *soft-starter* deve ter, os mais importantes são:

- Proteção do motor.
- Sensibilidade à sequência de fase.
- Plug-in*.
- Circuitos de economia de energia.

A **proteção do motor** baseia-se na curva típica, que, conforme mostra a figura 5.30, determina interrupções e bloqueios em caso de falta de fase ou falha do tiristor. Normalmente, esses equipamentos também possuem relés eletrônicos de sobrecarga. Durante o tempo de operação (t_p), um relé eletrônico de carga entra em operação quando necessário.

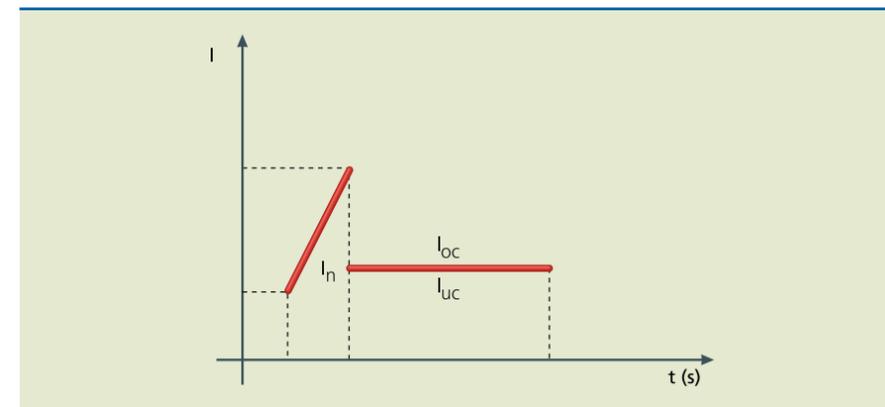
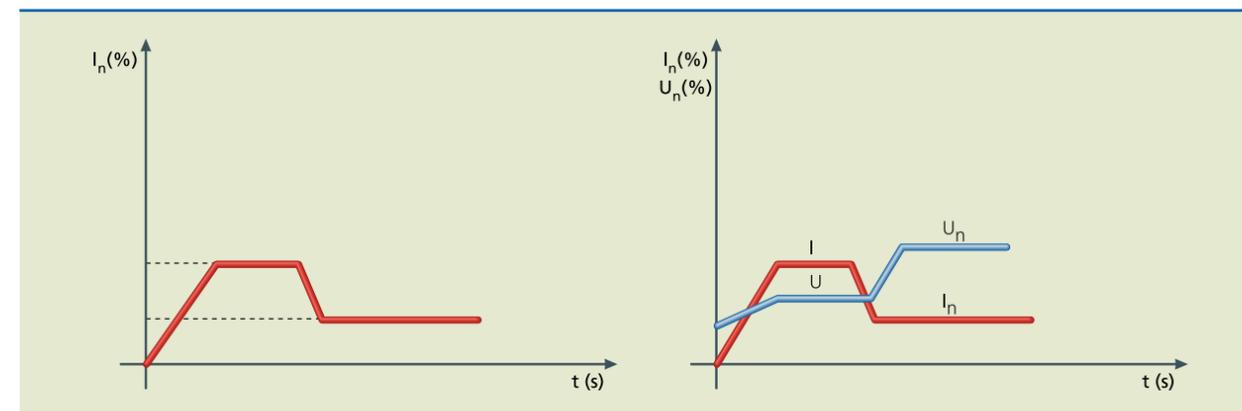


Figura 5.30
Curva típica de sobrecorrente de um *soft-starter*.

O dispositivo pode ser configurado para dar proteção tanto para sobrecorrentes (I_{oc}) como para subcorrentes (I_{uc}). Para partidas de motores, utilizam-se, se possível, chaves *soft-starters* que permitam o ajuste do torque do motor às necessidades do torque da carga, de modo que a corrente absorvida será a mínima necessária para acelerar a carga. A figura 5.31 apresenta a limitação de corrente quando se emprega *soft-starter*.

Figura 5.31
Limitação de corrente em um *soft-starter*.



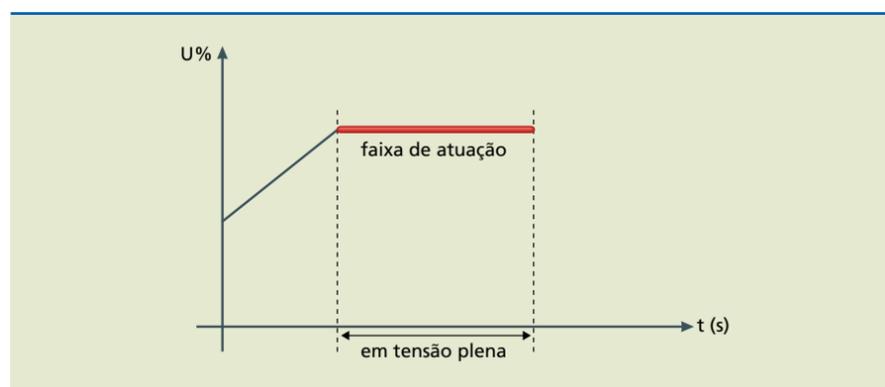
Os *soft-starters* podem ser configurados para operar apenas se a sequência de fase estiver correta (**sensibilidade à sequência de fase**). Esse recurso assegura a proteção, principalmente mecânica, para cargas que não podem girar em sentido contrário (bombas, por exemplo). Quando houver necessidade de reversão, é possível fazê-la com contatores externos ao *soft-starter*.

O *plug-in* é um conjunto de facilidades que podem ser disponibilizadas no *soft-starter* por meio de um módulo extra ou de parâmetros como relé eletrônico, frenagem CC ou AC, dupla rampa de aceleração para motores de duas velocidades e realimentação de velocidade para aceleração independente das flutuações de carga.

A maioria dos *soft-starters* modernos tem um circuito de **economia de energia** (figura 5.32). Essa facilidade reduz a tensão aplicada para motores a vazio, diminuindo as perdas no entreferro, que são a maior parcela de perda nos motores com baixas cargas. Economia significativa pode ser obtida para motores que operam com cargas de até 50% da potência do motor. Entretanto, essa função gera correntes harmônicas indesejáveis na rede, devido à abertura do ângulo de condução para diminuição da tensão.

Figura 5.32

Economia de energia usando um *soft-starter*.



Cabe lembrar, entretanto, que o *soft-starter* não melhora o fator de potência e também gera harmônicas, como qualquer outro dispositivo de acionamento estático.

5.8.4 Instalação de *soft-starters*

Alguns cuidados devem ser tomados na instalação de um *soft-starter*:

- Os *soft-starters* podem ser fixados na chapa de montagem por quatro parafusos da mesma forma que contatores convencionais. Eles devem ser usados em instalação protegida de intempéries, sendo relativamente imunes ao ambiente agressivo, já que a única parte móvel é representada, nos modelos maiores, pelos ventiladores.
- Os *soft-starters* muito grandes, que utilizam tiristores de discos, devem também ser relativamente protegidos de pó condutor ou que com acúmulo de umidade se torne capaz conduzir eletricidade.

- Os *soft-starters* com ou sem ventilador incorporado geram calor. Dessa maneira, é importante evitar o acúmulo de calor, para não elevar a temperatura interna do painel, fazendo com que a proteção de temperatura seja acionada. É preciso, portanto, utilizar ventiladores com filtro de poeira e venezianas no painel. O ventilador tem de ser adequado para garantir o fluxo do ar do painel e manter as temperaturas de operação apropriadas.
- Deve-se evitar enfileirar demais os *soft-starters*, de modo que o ar mais aquecido que sai de um seja o ar que vai ser sugado pelo ventilador do outro.
- Os *soft-starters* a partir de 75 A possuem ventilador incorporado. Os ventiladores ligam somente quando a temperatura do dissipador atinge 50 °C. Caso a temperatura do dissipador ultrapasse 80 °C, a saída de potência será bloqueada, voltando a funcionar apenas quando a temperatura atingir valores determinados.

5.8.5 Limitações no uso de *soft-starters*

Existem algumas limitações e fatores críticos na utilização de *soft-starters*:

- Refrigeração – O dispositivo deve sempre ser instalado verticalmente, com a ventilação para cima. A perda de calor aproximada é de 3,6 W/A de corrente circulante.
- Tipo de motor – Não deve ser usado para partida de motores em anel.
- Fator de potência – Não se devem colocar capacitores na saída do *soft-starter* a fim de corrigir o fator de potência.
- Torque alto em velocidade zero – Elevadores e guindastes necessitam de torque máximo, à velocidade zero, no instante da partida. Nesse caso, a utilização do *soft-starter* não é aconselhável.

Qualquer chave *soft-starter* deve ser protegida por fusíveis ultrarrápidos, levando em conta que o valor $i^2 \cdot t$ dos fusíveis deve ser 20% menor que o dos tiristores.

5.9 Inversores de frequência

Consistem em dispositivos eletrônicos mais completos, capazes de gerar tensão e frequência trifásicas ajustáveis, com a finalidade de controlar a velocidade de um motor de indução trifásico. São utilizados na partida, frenagem, proteção e variação da velocidade dos motores.

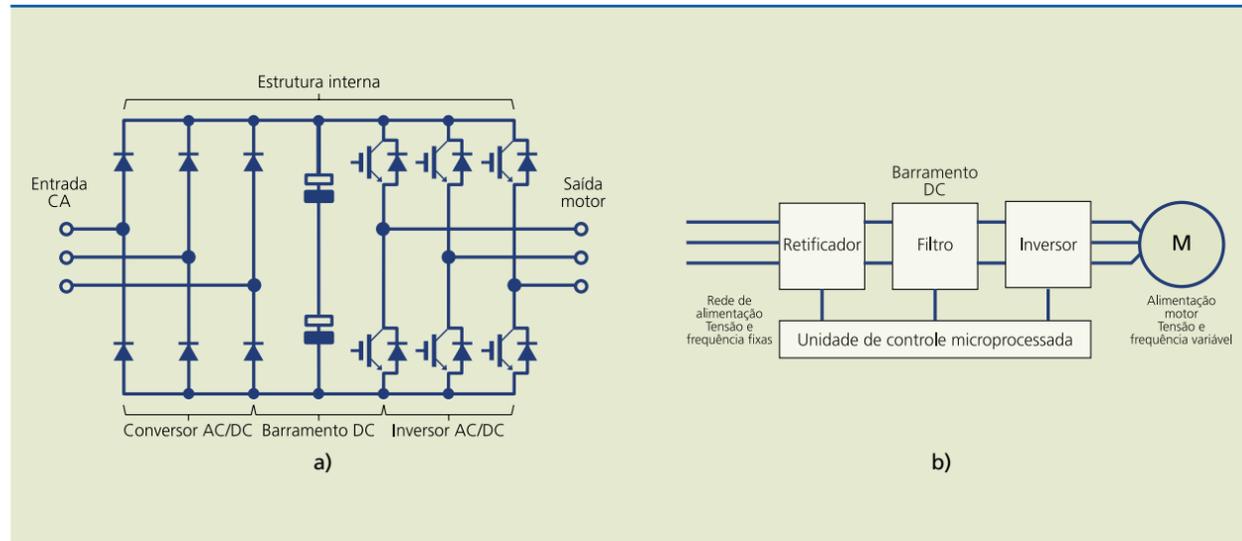
Sua grande vantagem é que, além de gerarem economia de energia, também reduzem o custo de instalação do sistema. Os inversores variam a velocidade dos motores de acordo com a maior ou menor necessidade de vazão, pressão ou temperatura de cada zona de controle; quando diminuem a velocidade, proporcionam grande economia de energia. Outra vantagem é a possibilidade de redução dos custos de manutenção. Os inversores permitem que os motores sejam acionados suavemente; com isso, reduz-se a quebra de elementos de transmissão como correntes e rodas dentadas, ocorrências frequentes em razão do esforço adicional provocado pelos motores com partida direta.



5.9.1 Princípio de funcionamento

Figura 5.33

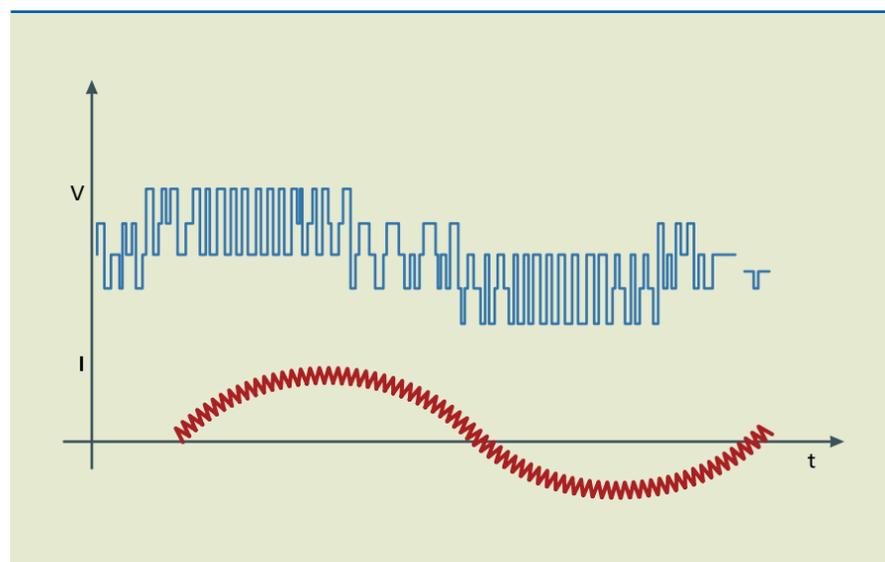
Inversor de frequência:
(a) estrutura interna e
(b) diagrama de blocos.



O inversor é composto por seis chaves, implementadas com dispositivos semicondutores denominados transistores de potência. Dependendo da combinação dessas chaves (aberta e fechada), podem-se obter na saída do inversor formas de onda diferentes (figura 5.34).

Figura 5.34

Formas de onda na saída do inversor:



5.9.2 Partes de um inversor de frequência

A figura 5.35 mostra as partes de um inversor de frequência.

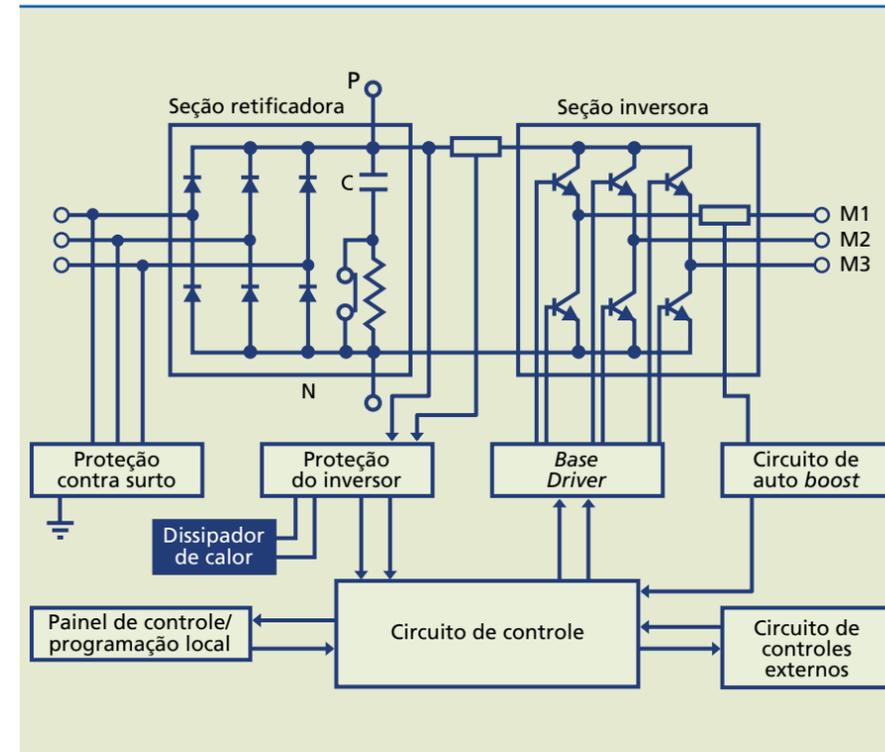


Figura 5.35

Partes de um inversor.

Seção retificadora (converter section) – Os seis diodos retificadores situados no circuito de entrada do inversor retificam a tensão trifásica da rede de entrada (L1, L2 e L3). A tensão DC resultante é filtrada pelo capacitor C e utilizada como entrada para a seção inversora.

Seção inversora (inverter section) – Na seção inversora, a tensão retificada DC é novamente convertida em trifásica AC. Os transistores chaveiam várias vezes por ciclo, produzindo um trem de pulsos com largura variável senoidalmente (**PWM**). Esse valor de saída de tensão pulsada, ao ser aplicado em um motor (carga indutiva), vai gerar uma forma de onda de corrente bem próxima da senoidal pelo enrolamento do motor. A figura 5.36 mostra as formas de onda para as fases M1 e M2 (duas das três que serão aplicadas no motor).

PWM é a sigla inglesa para modulação por largura de pulso.

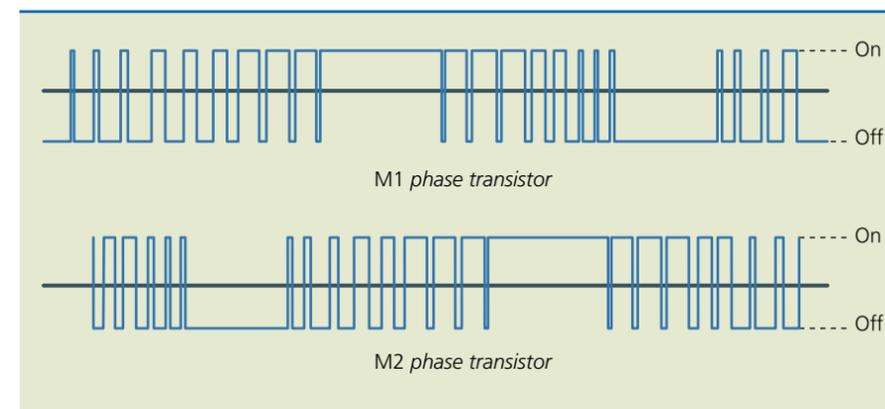


Figura 5.36

Formas de onda para as fases M1 e M2.

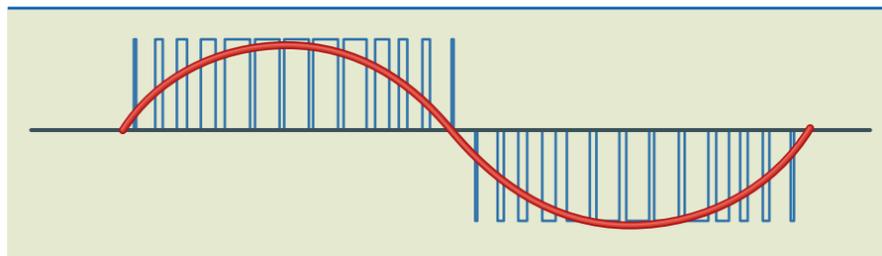


Sigla inglesa para transistor bipolar de porta isolada.

Circuito de controle (*control circuit*) – Os pulsos gerados pelo circuito de controle são enviados para as bases dos transistores de chaveamento por meio do circuito de *base driver*. Esses sinais pulsantes provocarão o chaveamento dos transistores de potência da seção inversora. Nos inversores mais modernos, a configuração é a mesma, com a diferença de que são utilizados **IGBTs** em vez de transistores bipolares. A forma de onda 3 ilustrada na figura 5.37 é a somatória lógica das fases de saída M1 e M2.

Figura 5.37

Somatória lógica entre fases de saída M1 e M2.



Pode-se observar que o valor médio da tensão aplicada se aproxima da senoidal, provocando uma corrente senoidal pelo enrolamento do motor.

Proteção contra surto (*surge protection*) – Tem a função de absorver surtos (picos) de tensão transitórios que podem chegar até o inversor pela rede de alimentação. Essa proteção é instalada nas três fases de entrada.

Proteções do inversor (*inverter protection*) – Esse circuito monitora as condições da tensão e da corrente presentes no circuito intermediário, ou seja, o que sai do retificador e vai para o inversor. Se os valores de corrente ou tensão ultrapassarem níveis predeterminados, esse circuito envia um sinal para o circuito de controle (*control circuit*), que atua de maneira a proteger o circuito do inversor, normalmente desarmando-o e sinalizando a condição.

Base driver – Essa seção amplifica e isola os sinais que são gerados pelo circuito de controle (*control circuit*), fazendo com que os transistores operem de acordo com o esquema de chaveamento apropriado.

Circuito de auto boost (*auto boost circuit*) – Detecta as condições de carga do motor e determina o nível de tensão ideal para que o motor consiga entregar à carga o torque exigido.

Painel de controle/programação local (*local control/programming panel*) – Esse painel fornece um meio prático e rápido para programar a operação do inversor. Ele também indica as condições de operação do inversor, como tensão, corrente, velocidade e frequência, além de sinalizar códigos de falha, como sobretensão, subtensão, sobrecarga, motor travado, sobretemperatura no dissipador etc.

Circuito de controles externos (*external I/O*) – Fornece ao circuito de controle uma forma de comunicar-se com o restante da máquina, tanto recebendo quanto fornecendo sinais, como velocidade desejada, sentido de rotação, aceleração, desaceleração, partida, parada, frenagem etc.

Circuito de controle (*control circuit*) – É o “cérebro” do inversor, já que é o responsável por receber todas as informações relativas ao funcionamento interno do dispositivo, assim como as informações externas, e produzir todos os sinais necessários para gerar os pulsos de disparo na etapa de potência.

O funcionamento do inversor pode ser resumido pelos seguintes passos:

1. O inversor recebe a referência de velocidade e comandos de operação da interface de controle local ou por meio de sinais externos. Esses comandos são utilizados para determinar a frequência e a tensão de saída, além do sentido de rotação do motor.
2. O circuito gera comandos (pulsos) que são injetados no circuito de *base driver*, que os isola e amplifica, inserindo-os na etapa de potência.
3. Após a análise dos sinais recebidos dos demais circuitos, o inversor gera sinais de saída para a interface de controle local e para os circuitos de controle externo, para indicar, normalmente, as condições de funcionamento, além das condições de falha.
4. Caso o circuito receba algum sinal de funcionamento anormal do circuito de proteção do inversor, ele imediatamente deixa de emitir pulsos de disparo, desarmando o inversor e sinalizando a situação por meio da interface de controle local e dos circuitos de controle externo.

Se a frequência da tensão de saída no inversor variar, a velocidade de rotação do motor será alterada na mesma proporção. Normalmente, a faixa de variação de frequência dos inversores fica entre 0,5 e 400 Hz. A função do inversor de frequência, entretanto, não é apenas controlar a velocidade de um motor AC. Ele precisa manter o torque (conjugado) constante para não provocar mudanças na rotação quando o motor estiver com carga.

Acompanhando a curva da figura 5.38, o valor de V/f pode ser programado (parametrizado) em um inversor, e dependerá da aplicação.

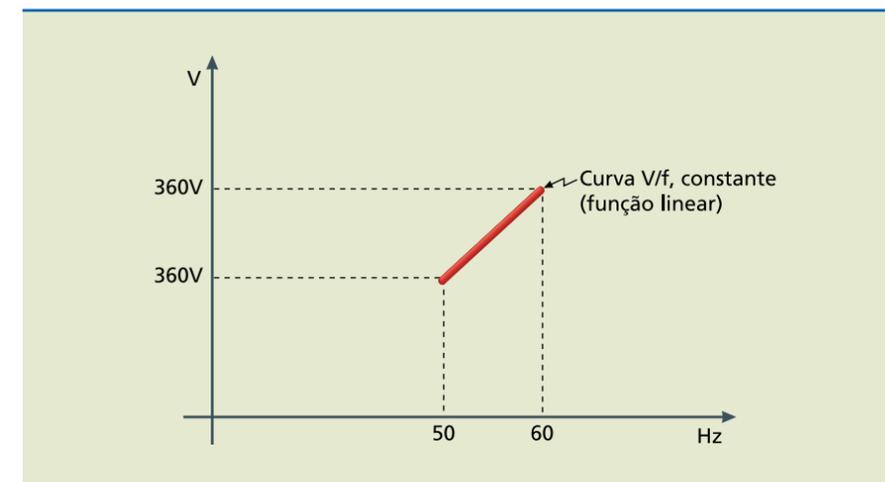


Figura 5.38

Curva de $V \cdot f$.



Em situações nas quais o inversor necessita de torque elevado, porém não consegue atingir alta velocidade, atribui-se a ele o maior valor de V/f que o equipamento puder fornecer, garantindo que tenha melhor rendimento em baixas velocidades, além de torque elevado. Já nos casos em que o inversor precisa operar em altas rotações e com torque baixo, parametriza-se um valor de V/f menor e encontra-se o melhor rendimento para a situação.

O inversor altera a tensão oriunda do barramento DC por meio da modulação por largura de pulso (PWM). A unidade lógica, além de distribuir os pulsos aos IGBTs, controla o tempo em que cada IGBT permanece ligado (ciclo de trabalho), conforme as seguintes relações:

- Quando V tem de aumentar, os pulsos são “alargados” (maior tempo em 0 N).
- Quando V tem de diminuir, os pulsos são “estreitados”.

Dessa maneira, a tensão eficaz entregue ao motor pode ser controlada. A frequência de PWM também pode ser parametrizada, encontrando-se, geralmente, entre 2,5 e 16 kHz. Na medida do possível, devemos deixá-la próxima do limite inferior, pois assim diminuimos as interferências eletromagnéticas geradas pelo sistema (EMI).

5.9.3 Inversores escalar e vetorial

Os inversores podem ser classificados em dois tipos: inversor escalares e inversor vetorial. Ambos possuem a mesma estrutura de funcionamento, diferenciando-se apenas no modo como o torque é controlado.

No inversor escalar, a curva V/f é fixada (parametrizada) tomando como base o tipo de regime de trabalho em que o inversor vai operar. Existe, porém, uma condição problemática, que é justamente o ponto crítico de qualquer sistema de acionamento AC: as baixas rotações. O sistema AC não consegue torque satisfatório em velocidades baixas, devido ao próprio rendimento do motor AC.

Para compensar esse fenômeno, desenvolveu-se o inversor de frequência vetorial, que, apesar de ser muito mais caro e complexo que o escalar, não funciona com uma curva V/f prefixada (parametrizada). Na verdade, ele varia tensão e frequência, de modo a otimizar o torque para qualquer condição de rotação (baixa ou alta). É como se a cada milissegundo uma nova curva V/f fosse parametrizada para cada nova situação. O inversor vetorial controla V/f por meio das correntes de magnetização e rotórica do motor. Normalmente, um tacômetro ou um *encoder* são utilizados como sensores de velocidade, formando uma “malha fechada” de controle de velocidade. Existem, porém, inversores vetoriais *sensorless*, que não utilizam sensores de velocidade externos.

5.9.4 Instalação do inversor

Antes de instalarmos o inversor, temos de ficar atentos à identificação em seus terminais de entrada e saída. Os terminais R, S e T (ou L1, L2 e L3) referem-se à entrada trifásica da rede elétrica. Para pequenas potências, é comum

encontrarmos inversores com a entrada monofásica (porém a saída continua sendo trifásica). Para diferenciarmos a entrada da rede para a saída do motor, devemos identificar as letras U, V e W, normalmente indicadas como saída do motor.

Além da identificação dos terminais de entrada e saída, precisamos observar a identificação dos bornes de comando. Como cada fabricante possui a própria configuração, é necessário consultar o manual do respectivo fabricante (figura 5.39). De qualquer maneira, os principais bornes são as entradas (analógicas ou digitais) e as saídas (em geral digitais).

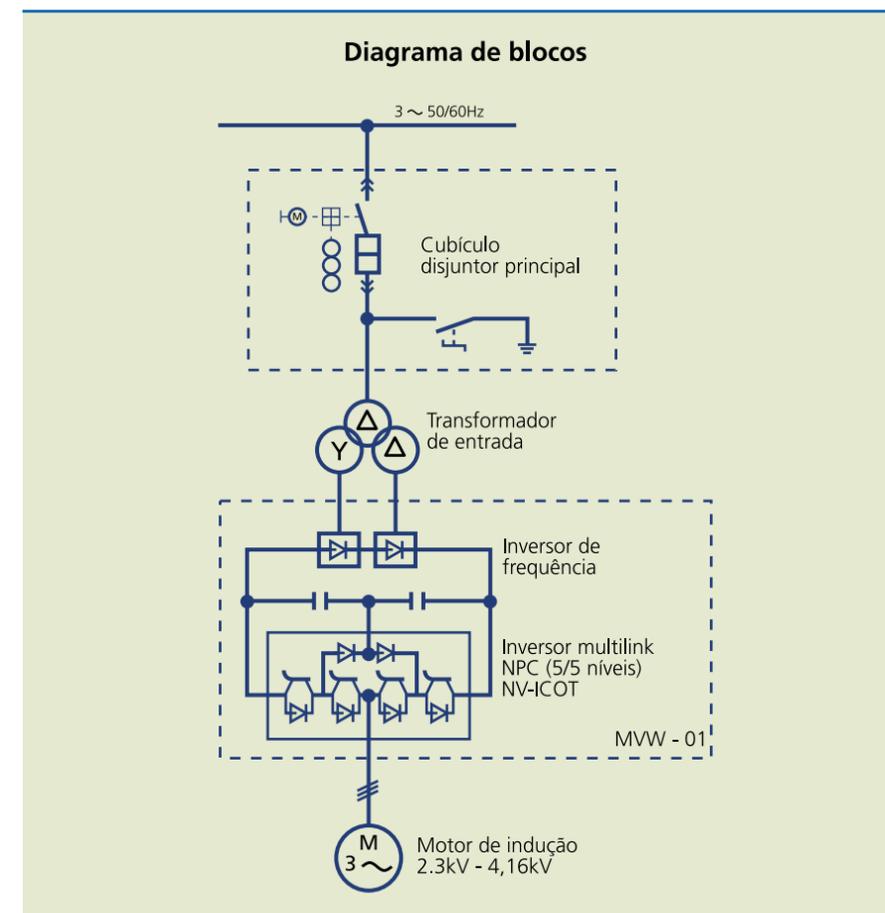


Figura 5.39

Diagrama de blocos de instalação do inversor.

5.9.5 Parametrização

Para que o inversor funcione corretamente, devemos “informar” em que condições de trabalho ele vai operar. Essa tarefa é justamente a parametrização do inversor. Quanto maior for o número de recursos que o inversor oferecer, mais parâmetros estarão disponíveis. Um mesmo parâmetro muda de posição de fabricante para fabricante e, por isso, recomenda-se seguir os passos indicados no manual para parametrizar o dispositivo. Os principais parâmetros de um inversor são descritos a seguir.

Liberação de alteração de parâmetros – É uma proteção para impedir que alguém, inadvertidamente, altere algum parâmetro da máquina.



Tensão nominal do motor – Existe na maioria dos inversores comerciais e serve para informar ao inversor em qual tensão nominal o motor vai operar – por exemplo, um motor operando em tensão nominal 220 VCA.

Corrente nominal do motor – Estabelece o valor de corrente que será utilizado nos cálculos realizados pelo inversor, para, por exemplo, protegê-lo de sobrecargas.

Frequência mínima de saída – Determina a velocidade mínima do motor. Pode variar de 0 a 650 Hz, porém deve ser sempre menor que a frequência máxima.

Frequência máxima de saída – Determina a velocidade máxima do motor. Pode variar de 0 a 650 Hz, porém deve ser sempre maior que a frequência mínima.

Frequência de JOG (impulso) – É um recurso que faz o motor girar com velocidade baixa. Isso facilita o posicionamento de peças antes de a máquina funcionar em regime normal.

Tempo de partida (rampa de aceleração) – Indica em quanto tempo se deseja que o motor chegue à velocidade programada, a partir do repouso. Esse parâmetro varia de acordo com o fabricante. Sua definição deve levar em conta o regime de trabalho do motor, pois, se o motor estiver conectado mecanicamente a cargas pesadas, uma partida muito rápida poderá “desarmar” disjuntores de proteção do sistema. Isso ocorrerá porque o pico de corrente, necessário para vencer a inércia do motor, será muito alto. Portanto, o tempo de partida tem de respeitar a massa da carga e o limite de corrente do inversor.

Tempo de parada (rampa de desaceleração) – É utilizado quando o inversor produz uma parada gradativa do motor. Esse parâmetro permite variar o tempo, de acordo com o fabricante, e, como o anterior, deve levar em consideração a massa (inércia) da carga acoplada.

Tipo de referência de entrada – Informa ao inversor se vamos controlar a velocidade do motor pela entrada digital ou analógica. No caso de controle analógico, devemos consultar o manual do fabricante, pois a velocidade será proporcional à tensão analógica de entrada e ignoraremos a entrada digital. Se o parâmetro estiver na outra posição, a velocidade será controlada por um sinal digital (na entrada digital), e o sinal analógico não terá influência.

Frequência de chaveamento PWM – Determina a frequência de PWM do inversor. Quanto menor for essa frequência, menores serão as perdas no motor e as interferências eletromagnéticas (EMI). O único inconveniente de frequências baixas (2 ou 4 kHz) é a geração de ruídos sonoros. Portanto, devemos fazer uma boa análise das condições gerais do ambiente de trabalho antes de decidirmos qual será o melhor valor.

Esses parâmetros são suficientes para acionar qualquer máquina, porém, para parametrizar um inversor corretamente, é preciso consultar o manual do fabricante.

5.9.6 Dimensionamento

O dimensionamento do inversor é feito pela determinação de sua **capacidade** e de seu **tipo**.

Para definirmos o “tamanho” do inversor, precisamos saber a corrente do motor e a carga que ele acionará. Normalmente, escolhe-se um inversor com capacidade de corrente igual ou superior à corrente nominal do motor. A tensão do inversor e do motor tem de ser igual à tensão da rede de alimentação.

A maioria dos inversores utilizados são do tipo escalar. Só se utiliza o tipo vetorial em duas ocasiões: extrema precisão de rotação ou torque elevado para rotação baixa ou zero (por exemplo, guindastes, pontes rolantes, elevadores etc.).

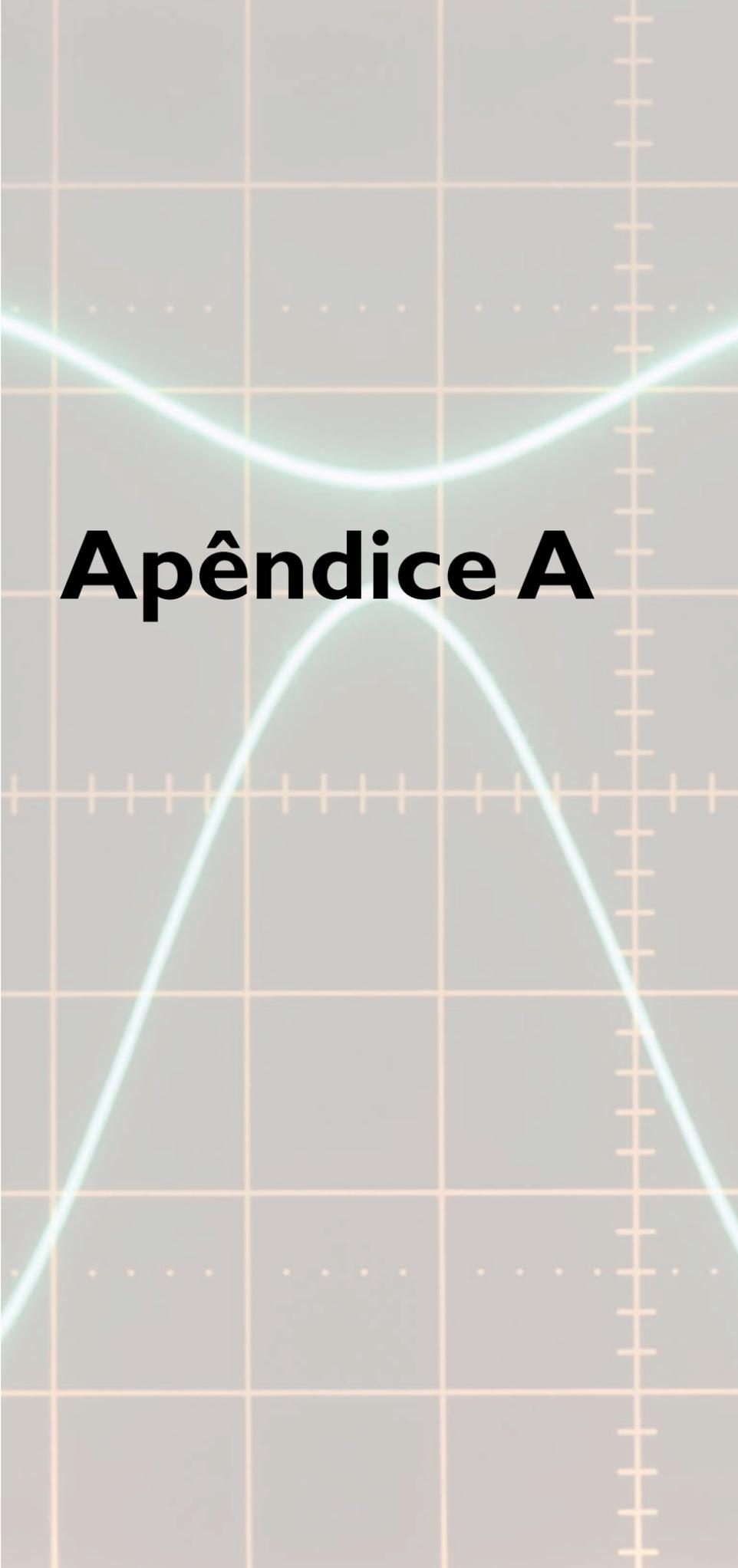
Quando os ensaios indicam um possível defeito no inversor de frequência, devemos realizar as seguintes ações, para um diagnóstico correto:

- Calcular a frequência de saída do inversor para cada rotação (a frequência de saída é diferente da frequência de rotação), definida pela fórmula:

$$\text{Rotação síncrona} = (60 \cdot f_{\text{rede}}) / n^{\circ} \text{ par de polos} \quad (5.1)$$

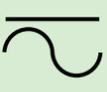
- Verificar se as vibrações cessam após o corte do fornecimento de energia elétrica.
- Realizar *check* elétrico.





Apêndice A

Símbolos literais para identificação de componentes em esquemas elétricos conforme IEC 113-2		
Símbolo	Componente	Exemplos
A	Conjuntos e subconjuntos	Equipam, laser e maser. Combinações diversas
B	Transdutores	Sensores termoeletrônicos, células termoeletrônicas, células fotoelétricas, transdutores a cristal, microfones fonocaptadores, gravadores de disco
C	Capacitores	
D	Elementos binários, dispositivos de temporização, dispositivos de memória	Elementos combinados, mono e bi estáveis, registradores, gravadores de fita ou de disco
E	Componentes diversos	Dispositivos de iluminação, de aquecimento etc.
F	Dispositivos de proteção	Fusíveis, para-raios, disparadores, relés
G	Geradores, fontes de alimentação	Geradores rotativos, alternadores, conversores de frequência, <i>soft-starter</i> , baterias, osciladores
H	Dispositivos de sinalização	Indicadores acústicos e ópticos
K	Contatores	Contatores de potência e auxiliares
L	Indutores	Bobinas de indução e de bloqueio
M	Motores	
N	Amplificadores, reguladores	Componentes analógicos, amplificadores de inversão, magnéticos, operacionais, por válvulas, transistores
P	Instrumentos de medição e de ensaio	Instrumntos indicadores, amplificadores e integradores, geradores de sinal, relógios
Q	Dispositivos de manobra para circuitos de potência	Disjuntores, seccionadores, interruptores
R	Resistores	Reostatos, potenciômetros, termistores, resistores em derivação, derivadores
S	Dispositivos de manobra para circuitos de potência	Dispositivos e botões de comando e de posição (fim de curso) e seletores
T	Transformadores	Transformadores de distribuição, de potência, de potencial, de corrente, autotransformadores
U	Moduladores, conversores	Discriminadores, demoduladores, codificadores transmissores telegráficos
V	Válvulas eletrônicas, semicondutores	Válvulas, válvulas sob pressão, diodos, transmissores, tiristores
W	Antenas, guias de transmissão e de onda	<i>Jampers</i> , cabos, barras coletoras, acopladores dipolos, antenas parabólicas
X	Terminais, tomadas e plugues	Blocos de conectores e terminais, jaques
Y	Dispositivos mecânicos operados mecanicamente	Freios, embreagens, válvulas pneumáticas
Z	Cargas corretivas, transformadores diferenciais. Equalizadores, limitadores	Rede de balanceamento de cabos, filtros a cristal

Símbolos gráficos					
Significado	ABNT	DIN	ANSI	JIS	IDC
Grandezas eletrônicas fundamentais					
Corrente contínua			DC		
Corrente alternada			AC		
Corrente contínua e alternada					
Exemplo de corrente alternada monofásica, 60Hz	1 - 60Hz	1 - 60Hz	1 Phase 2 Wire - 60Hz	1 - 60Hz	1 - 60Hz
Exemplo de corrente alternada trifásica, 3 condutores, 60Hz, tensão de 220V	3 - 60Hz 220V	3 - 60Hz 220V	3 Phase - Wire 60 Cycle - 220V	3 - 60Hz - 220V (3P 3W 220V - 60Hz)	3 - 60Hz - 220V
Exemplo de corrente alternada trifásica, com neutro, 4 condutores, 60Hz, tensão de 380V	3 - 60Hz 380V	3 - 60Hz 380V	3 Phase - Wire 60 Cycle - 380V	3 - 60Hz - 380V 3 + M = 60Hz 380V (3P 4W 380V 60Hz)	3W - 60Hz 380V
Exemplo de corrente contínua, 2 condutores, tensão de 220V	2 - 220V	2 - 220V	2 Wire DC, 220V	2 - 220V (2W, 220V)	2 - 220V
Exemplo de corrente contínua, 2 condutores e neutro, tensão de 110V	2W - 110V	2W - 110V	3 Wire DC, 110V	2N - 110V (3W, DC, 110V)	2N - 110V



Significado	ABNT	DIM	ANSI	JIS	IEC
Símbolos de uso geral					
Terra					
Massa					
Polaridade positiva					
Polaridade negativa					
Tensão perigosa					
Ligação delta ou triângulo					
Ligação Y ou estrela					
Ligação estrela com neutro acessível					
Ligação ziguezague					
Ligação em V ou triângulo aberto					

Significado	ABNT	DIM	ANSI	JIS	IEC
Contatos e peças de contato com comandos diversos					
Fechador (normalmente aberto)					
Abridor (normalmente fechado)					
Comutador					
Comutador sem interrupção					
Temporizador: no fechado na abertura na abertura no fechamento					
Fechador de comando manual					
Abridor com comando por excêntrico					
Fechador com comando por bobina					
Fechador com comando por mecanismo					
Abridor com comando por pressão					
Fechador com comando por temperatura					



Significado	ABNT	DIM	ANSI	JIS	IEC
Elemento de comando					
Comando manual, sem indicação de sentido					
Comando por pé					
Comando por excêntrico					
Comando por meio de êmbulo (ar comprimido, p. ex.)					
Comando por energia mecânica					
Comando por motor					
Sentido de deslocamento do comando para a esquerda, cessada à força externa. Nota: para a direita, inverter a seta					
Comando com travamento 1 - Travado 2 - Livre					
Comando engastado					
Dispositivo temporizado com operação à direita					
Comando desacoplado no caso com acionamento manual					
Comando acoplado no caso com acionamento manual					
Fecho mecânico					
Fecho mecânico com disparador auxiliar					

Significado	ABNT	DIM	ANSI	JIS	IEC
Dispositivos de comando e de proteção					
Tomada e plugue					
Fusível					
Fusível com indicação do lado ligado à rede após a ruptura					
Seccionador - Fusível tripolar					
Lâmina ou barra de conexão, reversora					
Seccionador tripolar					
Interruptor tripolar (sob carga)					
Disjuntor					
Seccionador - Disjuntor					
Contatos com relé térmico contatos auxiliares					
Disjuntor tripolar com relés eletromagnéticos com contatos auxiliares					



Significado	ABNT	DIM	ANSI	JIS	IEC
Motores e geradores					
Motor, símbolo geral					
Gerador, símbolo geral					
Motor de corrente contínua					
Gerador de corrente contínua					
Motor de corrente alternada monofásica					
Motor de corrente alternada trifásica					
Motor de indução trifásica					
Motor de indução trifásica com representação de ambas as extremidades de cada enrolamento do estator					
Gerador síncrono trifásico ligado em estrela					
Gerador síncrono trifásico de ímã permanente					
Gerador síncrono monofásico de ímã permanente					
Gerador de corrente contínua com enrolamentos de compensação e inversão polar					

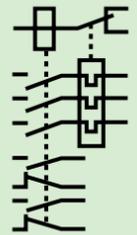
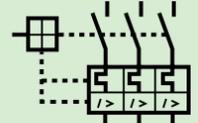
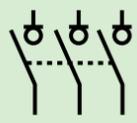
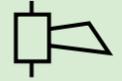
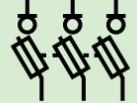
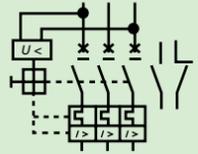
Significado	ABNT	DIM	ANSI	JIS	IEC
Transformadores					
Transformador com dois enrolamentos					
Transformador com três enrolamentos					
Autotransformador					
Bobina de reatância					
Transformador de corrente					
Transformador de potencial					
Transformador de corrente capacitivo					
Transformador com três enrolamentos, um de serviço e dois de controle					
Transformador de dois enrolamentos, com diversas derivações (taps) em um dos enrolamentos (com variação em escalões)					
Transformador de dois enrolamentos com variação contínua da tensão					
Gerador síncrono monofásico de ímã permanente					
Gerador de corrente contínua com enrolamentos de compensação e inversão polar					
Nota 1:			A ABNT recomenda para transformadores de rede o uso do símbolo simplificado, formado de dois círculos que se cortam, especialmente na representação unifilar. Os traços inclinados que cortam a linha vertical, indicam o número de fases.		
Nota 2:			Simplificação análoga é normalizada para transformadores de corrente e de potencial.		



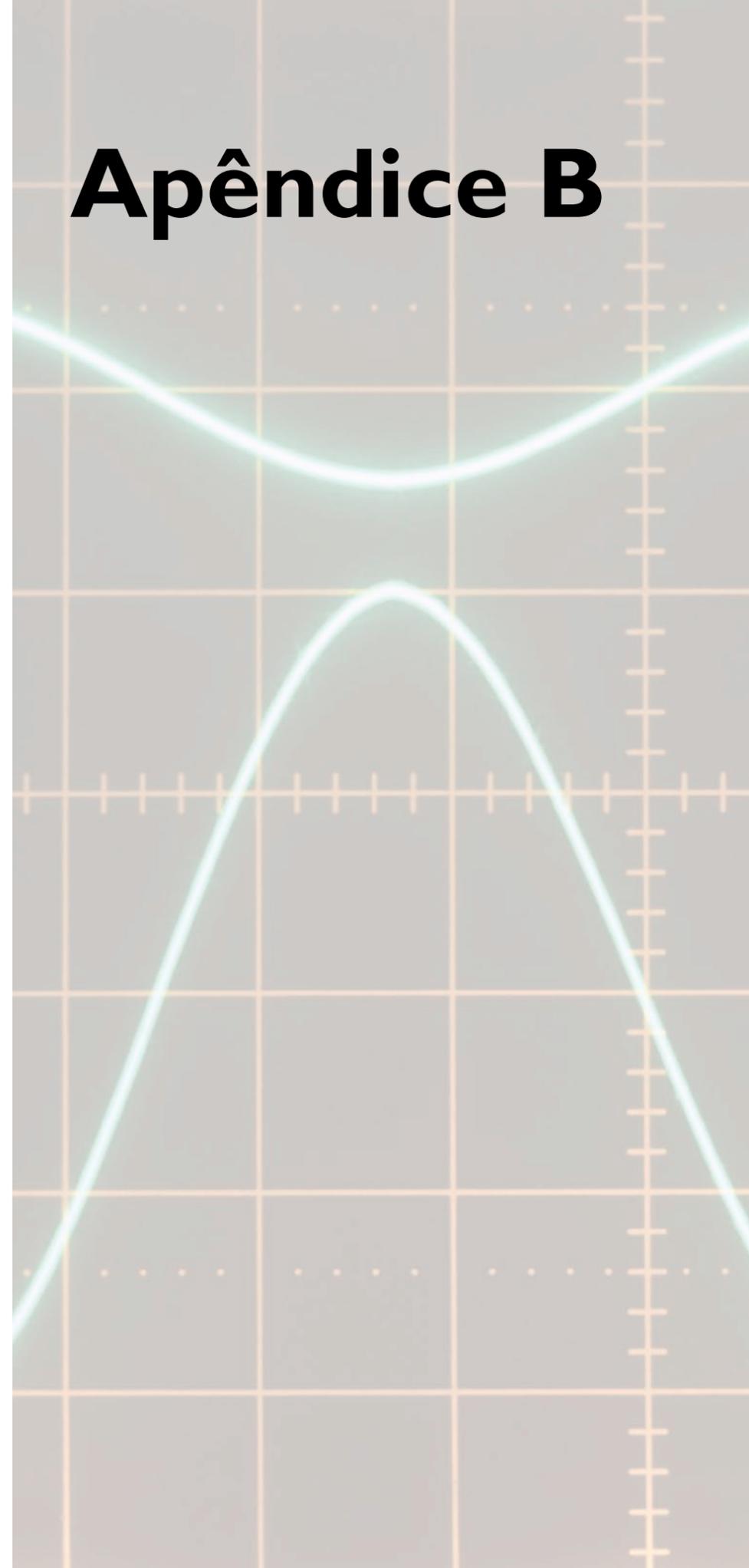
Significado	Símbolo
Dispositivos de partida	
Dispositivo de partida. Símbolo geral	
Dispositivo de partida variável continuamente	
Dispositivo de semi automático. Nota: sendo o símbolo de dimensões reduzidas, que não permita traçar as hachuras, estas poderão ser substituídas por partes cheias	
Dispositivo de partida estrela-triângulo	
Dispositivo de partida com autotransformador	
Motor trifásico de indução com dois dispositivos de partida: 1. Reversão por contator 2. Automático com reostato	

Símbolos gráficos conforme NBR, IEC e DIN			
Símbolo	Descrição	Símbolo	Descrição
	Acionamento por energia mecânica acumulada		Acionamento eletromagnético (ex.: bobina de contator)
	Acionamento por motor		Acionamento magnético duplo (ex.: bobina com duplo enrolamento)
	Acionamento com bloqueio mecânico		Acionamento temporizado no desligamento (ex.: relé de tempo temporizado no desligamento)
	Acionamento com bloqueio mecânico		Acionamento temporizado na ligação (ex.: relé de tempo temporizado na ligação)
	Acionamento com posição fixa		Acionamento temporizado na ligação e no desligamento (ex.: relé de tempo temporizado na ligação e desligamento)
	Acionamento temporizado		Dispositivo de proteção contra surtos (DPS)
	Acoplamento mecânico desacoplado		Sensor
	Acoplamento mecânico acoplado		Transformador e transformador de potencial para medição
	Acionamento manual (ex.: seccionador e comutador)		Auto transformador
	Acionamento por impulso (ex.: botão e comando)		Transformador de corrente para medição
	Acionamento por bloqueio mecânico de múltiplas posições (ex.: comutador de 4 posições)		Motor trifásico
	Acionamento mecânico (ex.: chave fim de curso)		Tiristor



Símbolos gráficos conforme NBR, IEC e DIN			
Símbolo	Descrição	Símbolo	Descrição
	Diodo Zener		Sirene
	Inversor de frequência		Lâmpadas / sinalização
	Conversor		Contator e relé de sobrecarga com contator auxiliar
	Pilha (unidade de energia)		Disjuntor com relés disparadores de sobrecarga e curto-circuito
 ou 	Bateria (várias unidades de energia)		Seccionador sob carga
	Buzina		Seccionador-fusível sob carga
	Campainha		Disjuntor com relés disparadores de sobrecarga, curto-circuito e subtensão

Apêndice B



Influências externas determinantes

No quadro da proteção contra choques elétricos, as seguintes condições de influências externas são determinantes:

BA = Competência das pessoas.

BB = Resistência elétrica do corpo humano.

BC = Contato das pessoas com potencial da terra.

Competência das pessoas			
Código	Classificação	Características	Aplicações e exemplos
BA1	Comuns	Pessoas inadvertidas	—
BA2	Crianças	Crianças em locais a elas destinados ⁽¹⁾	Creches, escolas
BA3	Incapacitadas	Pessoas que não dispõem de completa capacidade física ou intelectual (idosos, doentes)	Casas de repouso, unidades de saúde
BA4	Advertidas	Pessoas suficientemente informadas ou supervisionadas por pessoas qualificadas, de tal forma que lhes permite evitar os perigos da eletricidade (pessoal de manutenção e/ou operação)	Locais de serviço elétrico
BA5	Qualificadas	Pessoas com conhecimento técnico ou experiência que lhes permite evitar os perigos da eletricidade (engenheiros e técnicos)	Locais de serviço elétrico fechados

⁽¹⁾ Esta classificação não se aplica necessariamente a locais de habitação.
Fonte: NBR 5410:2004

Resistência elétrica do corpo humano

Código	Classificação	Características	Aplicações e exemplos
BB1	Alta	Condições secas	Circunstâncias nas quais a pele está seca (nenhuma umidade, inclusive suor)
BB2	Normal	Condições úmidas	Passagem da corrente elétrica de uma mão à outra ou de uma mão a um pé, com pele úmida de suor, sendo a superfície de contato significativa
BB3	Baixa	Condições molhadas	Passagem da corrente elétrica entre as duas mãos e os dois pés, estando as pessoas com os pés molhados ao ponto de se poder desprezar a resistência da pele e dos pés
BB4	Muito baixa	Condições inversas	Pessoas imersas na água, por exemplo em banheiras ou piscinas

Fonte: NBR 5410:2004



Contato das pessoas com o potencial da terra			
Código	Classificação	Características	Aplicações e exemplos
BC1	Nulo	Locais não condutivos	Locais cujo piso e paredes sejam isolantes e que não possuam nenhum elemento condutivo
BC2	Raro	Em condições habituais, as pessoas não estão em contato com elementos condutivos ou postadas sobre superfícies condutivas	Locais cujo piso e paredes sejam isolantes, com elementos condutivos em pequena quantidade ou de pequenas dimensões e de tal forma a probabilidade de contato possa ser desprezada
BC3	Frequente	Pessoas em contato com elementos condutivos ou postadas sobre superfícies condutivas	Locais cujo piso e paredes sejam condutivos ou que possuam elementos condutivos em quantidade ou de dimensões consideráveis
BC4	Contínuo	Pessoas em contato permanente com paredes metálicas e com pequena possibilidade de interromper o contato	Locais com caldeiras ou vasos metálicos, cujas dimensões sejam tais que as pessoas que neles penetrem estejam continuamente em contato com as paredes. A redução da liberdade de movimentos das pessoas pode, por um lado, impedi-las de romper voluntariamente o contato e por outro aumentar os riscos de contato involuntário

Fonte: NBR: 5410:2004

Situações 1, 2 e 3

Define-se em função das influências externas BB (Quadro 31) e BC (Quadro 32), as situações 1, 2 e 3 caracterizadas no Quadro 33. Para uma combinação de influências externas BB e BC, a situação a ser considerada é a mais severa ditada por qualquer das influências externas (BB ou BC) isoladamente.

Condição de influência externa	Situação
BB1, BB2	Situação 1
BC1, BC2, BC3	Situação 1
BB3	Situação 2
BC4	Situação 2
BB4	Situação 3

Notas

- Alguns exemplos de situação 2:
 - áreas externas (jardins, feiras etc.);
 - canteiro de obras;
 - estabelecimentos agropecuários;
 - áreas de acampamento e de estacionamento de veículos especiais e reboques;
 - dependências interiores molhadas em uso normal.
- Um exemplo de situação 3, que corresponde aos casos de corpo imerso, é o interior de banheiras e piscinas.

Fonte: NBR 5410





Referências

bibliográficas

- ALVARENGA, B.; MÁXIMO, A. *Curso de física*. Vol. 3. 3ª ed. São Paulo: Scipione, 2007.
- ANZENHOFER, K. et al. *Eletrotécnica para escolas profissionais*. 3ª ed. São Paulo: Mestre Jou, 1980.
- BENCHIMOL, A. *Uma breve história da eletrônica*. Rio de Janeiro: Interciência, 1995.
- BENTO, C. R. *Sistemas de controle*. São Paulo: Érica, 1989.
- BONACORSO, N. G.; NOLL, V. *Automação eletropneumática*. 4ª ed. São Paulo: Érica, 2000.
- CARVALHO, G. *Máquinas elétricas*. 2ª ed. revisada. São Paulo: Érica, 2008.
- CAVALCANTI, P. J. M. *Fundamentos de eletrotécnica*. 21ª ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 2001.
- CAVALIN, G.; CERVELIN, S. *Instalações elétricas prediais*. 18ª ed. São Paulo: Érica, 2008.
- CHIQUETO, M. J. *Física na escola de hoje*. Vol. 3. São Paulo: Scipione, 1987.
- COMO FUNCIONA: enciclopédia de ciência e técnica. São Paulo: Abril Cultural, 1974.
- COTRIM, A. A. M. B. *Instalações elétricas*. 4ª ed. São Paulo: Pearson-Makron Books, 2008.
- CREDER, H. *Instalações elétricas*. 15ª ed. revista e atualizada. Rio de Janeiro: LTC, 2007.
- EDMINISTER, J. A. *Eletromagnetismo*. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1980.
- ENCICLOPÉDIA ABRIL. Vol. 13. São Paulo: Abril Cultural, 1972.
- FEYNMAN, R. P.; LEIGHTON, R. B.; SANDS, M. *Lições de física*. Porto Alegre: Bookman, 2008.
- FILIPPO FILHO, G. *Motor de indução*. São Paulo: Érica, 2000.
- FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, C.; UMANS, S. D. *Máquinas elétricas*. 6ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.
- FRANCHI, C. M. *Acionamentos elétricos*. São Paulo: Érica, 2008.
- GOZZI, G. G. M. *Circuitos magnéticos*. São Paulo: Érica, 1996.



GUSSOW, M. *Eletricidade básica*. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1985.

JORDÃO, R. G. *Máquinas síncronas*. Rio de Janeiro: LTC; São Paulo: Edusp, 1980.

_____. *Transformadores*. São Paulo: Edgar Blücher, 2002.

KOSOW, I. L. *Máquinas elétricas e transformadores*. 7ª ed. Rio de Janeiro: Globo, 1987.

LIMA FILHO, D. L. *Projeto de instalações elétricas prediais*. São Paulo: Érica, 2008.

MARIANO, W. C. *Eletromagnetismo: fundamentos e aplicações*. São Paulo: Érica, 2003.

MARTIGNONI, A. *Eletrotécnica*. 8ª ed. Rio de Janeiro: Globo, 1973.

_____. *Máquinas de corrente alternada*. 4ª ed. Rio de Janeiro: Globo, 1982.

_____. *Máquinas elétricas de corrente contínua*. 2ª ed. Rio de Janeiro: Globo, 1977.

_____. *Transformadores*. Rio de Janeiro: Globo, 1973.

MARTINS, J. B. *A história da eletricidade*. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2007.

PAZOS, F. *Automação de sistemas e robótica*. Rio de Janeiro: Axcel Books, 2002.

RAMALHO, F. et al. *Os fundamentos da física*. Vol. 3. 2ª ed. São Paulo: Moderna, 1978.

SIMONE, G. A. *Transformadores: teoria e exercícios*. São Paulo: Érica, 1998.

TUDO: dicionário enciclopédico ilustrado. São Paulo: Abril Cultural, 1977.

WENTWORTH, S. M. *Eletromagnetismo aplicado*. Porto Alegre: Bookman, 2009.

YOUNG, H.; SEARS, F.; ZEMANSKY, M. W. *Física 3: eletricidade e magnetismo*. 2ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 1984.

Sites

Lista de Exercícios - Interferência: <<http://www.if.ufrgs.br/tex/fisica-4/lista1.htm>>. Acesso em: 29 jun. 2011.

Noções básicas sobre transformadores: <http://www.feiradeciencias.com.br/sala14/14_T01.asp>. Acesso em: 29 jun. 2011.

Máquinas elétricas: <http://www.feiradeciencias.com.br/sala13/13_T07.asp>. Acesso em: 29 jun. 2011.

Projeto Física e Cidadania: <<http://www.ufjf.br/fisicaecidadania/>>. Acesso em: 29 jun. 2011.

Força atrativa e força repulsiva: <<http://educacao.uol.com.br/fisica/condutores-retilineos-e-paralelos-regra-da-mao.jhtm>>. Acesso em: 29 jun. 2011.

BBC. “A ‘aurora boreal’ de Júpiter”: <http://www.bbc.co.uk/portuguese/noticias/2001/010412_jupiter.shtml>. Acesso em: 29 jun. 2011.

Instalações elétricas: <<http://www.instalacoeseltricas.com/teoria.asp?id=6>>.

Acesso em: 29 jun. 2011.

GTD – Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica:

<<http://www.dee.ufc.br/~rleao/GTD/1Introducao.pdf>>. Acesso em: 29 jun. 2011.

Atualidades:<http://guiadoestudante.abril.com.br/estude/simulados/simulado_403297.shtml>. Acesso em: 29 jun. 2011.

Normas da ABNT: <<http://www.abnt.org.br>>. Acesso em: 29 jun. 2011.

Elektor: <<http://www.elektor.com>>. Acesso em: 29 jun. 2011.

CPFL: <<http://www.cpfl.com.br>>. Acesso em: 29 jun. 2011.

Pirelli: <<http://www.pirelli.com.br/web/default.page>>. Acesso em: 29 jun. 2011.

Energibrás: <<http://www.energibras.com.br>>. Acesso em: 29 jun. 2011.

WEG: <<http://www.weg.net/br>>. Acesso em: 29 jun. 2011.

ANSI-J-STD 607-A - Normas para aterramento: <<http://www.ansi.org>>. Acesso em: 29 jun. 2011.

ANSI/TIA/EIA 570-A: <<http://www.ansi.org>>. Acesso em: 29 jun. 2011.

ANSI/TIA/EIA 606-A - Normas para administração da infraestrutura de telecomunicações em edifícios comerciais: <<http://www.ansi.org>>. Acesso em: 29 jun. 2011.

IEC 60947-1: Equipamentos de manobra e de proteção em baixa tensão – especificações - <<http://www.iec.ch>>. Acesso em: 29 jun. 2011.



IEC 60947-2: Disjuntores - <<http://www.iec.ch>>. Acesso em: 29 jun. 2011.

IEC 60947-3: Seccionadores e seccionadores fusível - <<http://www.iec.ch>>. Acesso em: 29 jun. 2011.

IEC 60947-4: Contatores de potência, relés de sobrecarga e conjuntos de partida - <<http://www.iec.ch>>. Acesso em: 29 jun. 2011.

IEC 60947-5: Contatores auxiliares, botões de comando e auxiliares de comando - <<http://www.iec.ch>>. Acesso em: 29 jun. 2011.

IEC 60947-7: Conectores e equipamentos auxiliares - <<http://www.iec.ch>>. Acesso em: 29 jun. 2011.

IEC 60269-1: Fusíveis para baixa tensão - <<http://www.iec.ch>>. Acesso em: 29 jun. 2011.

IEC 60439-1: Conjuntos de manobra e comando em baixa tensão

Símbolos gráficos (normas IEC, DIN, NBR) - <<http://www.iec.ch>>. Acesso em: 29 jun. 2011.

Motores elétricos – CTAI (Centro de Tecnologia em Automação e Informática): - <<http://www.ctai.senai.br>>. Acesso em: 29 jun. 2011.



CENTRO PAULA SOUZA DO GOVERNO DE SÃO PAULO





Excelência no ensino profissional

Administrador da maior rede estadual de educação profissional do país, o Centro Paula Souza tem papel de destaque entre as estratégias do Governo de São Paulo para promover o desenvolvimento econômico e a inclusão social no Estado, na medida em que capta as demandas das diferentes regiões paulistas. Suas Escolas Técnicas (Etecs) e Faculdades de Tecnologia (Fatecs) formam profissionais capacitados para atuar na gestão ou na linha de frente de operações nos diversos segmentos da economia.

Um indicador dessa competência é o índice de inserção dos profissionais no mercado de trabalho. Oito entre dez alunos formados pelas Etecs e Fatecs estão empregados um ano após concluírem o curso. Além da excelência, a instituição mantém o compromisso permanente de democratizar a educação gratuita e de qualidade. O Sistema de Pontuação Acrescida beneficia candidatos afrodescendentes e oriundos da Rede Pública. Mais de 70% dos aprovados nos processos seletivos das Etecs e Fatecs vêm do ensino público.

O Centro Paula Souza atua também na qualificação e requalificação de trabalhadores, por meio do Programa de Formação Inicial e Educação Continuada. E ainda oferece o Programa de Mestrado em Tecnologia, recomendado pela Capes e reconhecido pelo MEC, que tem como área de concentração a inovação tecnológica e o desenvolvimento sustentável.