



ACIONAMENTOS ELETRÔNICOS

Prof. Clovis Antonio Petry

1 Índice

Objetivo de aprendizagem 01 – Princípios de instalações elétricas	3
Objetivo de aprendizagem 02 – Elementos de instalações elétricas	35
Objetivo de aprendizagem 03 – Projeto de instalações elétricas	75
Objetivo de aprendizagem 04 – Revisão de eletromagnetismo	124
Objetivo de aprendizagem 05 – Transformadores	158
Objetivo de aprendizagem 06 – Princípios de máquinas elétricas rotativas	182
Objetivo de aprendizagem 07 – Máquinas de corrente contínua	204
Objetivo de aprendizagem 08 – Acionamento de motores de corrente contínua	226
Objetivo de aprendizagem 09 – Motores de passo	258
Objetivo de aprendizagem 10 – Motores sem escovas	288
Objetivo de aprendizagem 11 – Máquinas de corrente alternada	307
Objetivo de aprendizagem 12 – Acionamento de motores de indução monofásicos	333
Objetivo de aprendizagem 13 – Acionamento de motores de indução trifásicos	356
Objetivo de aprendizagem 14 – Acionamento de motores de indução monofásicos e trifásicos	377



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA

DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA

CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM ELETRÔNICA INDUSTRIAL

Acionamentos Eletrônicos



GUIA DE ESTUDO

- OBJETIVO DE APRENDIZAGEM - PRINCÍPIOS DE INSTALAÇÕES ELÉTRICAS

PRINCÍPIOS DE INSTALAÇÕES ELÉTRICAS

Objetivo de Aprendizagem

Conhecer os princípios de instalações elétricas.

Objetivos parciais

- Conhecer o sistema de energia elétrica;
- Descrever os principais elementos de um sistema de energia elétrica;
- Conhecer os tipos de diagramas utilizados em instalações elétricas;
- Descrever os sistemas de aterramento de instalações elétricas;
- Conhecer as implicações de choques elétricos.

Aulas relacionadas

Este objetivo de aprendizagem está relacionado com a aula 01 da disciplina.

Pré-requisitos

Este objetivo de aprendizagem não tem pré-requisitos.

Continuidade dos Estudos

O próximo objetivo de aprendizagem será estudar os elementos de instalações elétricas.

Roteiro para estudos

Os estudos referentes a este objetivo de aprendizagem consistem em:

1. Estudar este documento resumo, realizando as atividades propostas no mesmo;
2. Responder o quiz relacionado a este objetivo de aprendizagem;
3. Caso perceba necessidade, estudar a apresentação deste assunto ou consultar os livros texto indicados para esta disciplina;
4. Realizar os exercícios deste tópico da matéria;
5. Realizar a avaliação final para progredir ao próximo conteúdo.

Referências

- Material disponibilizado para a disciplina de Acionamentos Eletrônicos – 2021/1.
Departamento Acadêmico de Eletrônica, Instituto Federal de Santa Catarina, Campus Florianópolis.
- CREDER, H. Instalações Elétricas. São Paulo: Livros Técnicos e científicos Editora, 2002.

Check-list

Caro estudante, verifique se você completou as atividades deste objetivo de aprendizagem e obteve êxito para continuar seus estudos.

Assinale as atividades realizadas:

Estudo do documento resumo:

- Leitura do documento resumo;
- Exercícios do documento resumo;
- Atividade avaliativa do documento resumo.
- Obtive êxito e entendi o conteúdo deste documento;
- Ainda não entendi bem o conteúdo e estudarei o mesmo com mais profundidade.

Estou com dúvidas, irei estudar com mais detalhes este conteúdo:

- Assistir a apresentação relacionada ao conteúdo (apresentação 01);
- Ler os capítulos deste conteúdo no livro (capítulos 01 e 02).

Ainda estou com dúvidas:

- Entrarei em contato com o professor.

Obtive êxito, então seguirei em frente:

- Responder ao quiz deste conteúdo no Moodle;
- Informar ao professor que estou avançando com o conteúdo.

Parabéns, continue estudando com afinco e vamos em frente!!

CONTEÚDO

- OBJETIVO DE APRENDIZAGEM -
PRINCÍPIOS DE INSTALAÇÕES ELÉTRICAS

1 Introdução

O conteúdo a ser estudado neste tópico da disciplina se refere aos elementos iniciais de um sistema de energia elétrica, descrevendo-se os principais elementos que o compõem.

Assim, é fundamental que você conheça e saiba descrever os principais elementos de um sistema de energia elétrica, além dos tipos de diagramas de circuitos para instalações elétricas. Além disso, é essencial que você conheça as implicações que ocorrem quando um ser humano é submetido a um choque elétrico.

1.1 Conteúdo – O que irei estudar

Estudaremos neste tópico:

- O sistema de energia elétrica;
- Diagramas unifilar e multifilar;
- Choque elétrico;
- Sistemas de aterramento.

1.2 Metodologia – O que devo fazer e como fazer

Leia com atenção o conteúdo a seguir. Ao final deste tópico são apresentados exercícios resolvidos. Após são apresentados alguns exercícios propostos.

Ao realizar estas atividades e se sentir confiante para progredir, siga os passos indicados na primeira página deste documento.

Espera-se que após estudar este assunto, você consiga:

- Descrever os elementos de um sistema de energia elétrica;
- Saber explicar o que são diagramas unifilares e multifilares;
- Comentar sobre os sistemas de aterramento de uma instalação elétrica;
- Descrever as consequências para os seres humanos ao levarem choques elétricos.

A atividade avaliativa deste objetivo de aprendizagem consistirá em perguntar ao estudante para descrever o sistema de energia elétrica brasileiro.

Exemplo de atividade avaliativa:

1. Cite alguns elementos que compõem o sistema elétrico brasileiro.
2. Comente sobre fontes geradoras de energia elétrica.
3. Descreva com suas palavras o que são os diagramas unifilar e multifilar.
4. Comente sobre as consequências de se levar um choque elétrico.

2 O Sistema de Energia Elétrica

2.1 Introdução

A energia elétrica disponibilizada nas residências, comércio e indústrias, é originada, geralmente, a partir do sistema de energia elétrica brasileiro (ligados na rede = *on grid*). Em sistemas isolados, por exemplo, ilhas ou locais remotos, pode-se ter os geradores e consumidores separados (ilhados = *off grid*).

A seguir serão apresentados os principais elementos do sistema elétrico e alguns aspectos de sua operação.

2.2 Sistema elétrico brasileiro

O sistema elétrico de maneira geral e o brasileiro em particular, é formado pelos seguintes elementos ou subsistemas:

- Geração – conjunto de geradores de energia elétrica, tais como: usinas hidrelétricas, termoelétricas, termonucleares, eólicas, solares, dentre outras;
- Transmissão – conjunto de linhas de transmissão da energia elétrica dos geradores até a distribuição;
- Distribuição – conjunto de linhas elétricas que conectam as estações (subestações) abaixadoras de tensão até os consumidores.

Em algumas referências na literatura também se considera o conjunto de subestações elevadoras, abaixadoras e conversoras como sendo o sistema de transformação.

A Figura 1 apresenta uma representação simplificada e didática do sistema de energia elétrica, com seus principais subsistemas ou elementos. Já a Figura 2 mostra o sistema simplificado, com a identificação em diferentes cores dos diferentes elementos ou subsistemas que compõem o sistema de energia elétrica. Ainda, a Figura 3 mostra um diagrama elétrico simplificado do sistema de energia elétrica, apontando os níveis mais comuns para as tensões nos principais pontos do sistema. Por sua vez, na Figura 4 se tem a representação do sistema de energia elétrica com os principais níveis de tensão do mesmo.

Os níveis de tensão do sistema de energia elétrico brasileiro (de acordo com Mussoi, 2016¹) são classificados como:

¹ Mussoi, Fernando L. R. *Instalações Elétricas. Apostila. Departamento Acadêmico de Eletrônica, Câmpus Florianópolis, Instituto Federal de Santa Catarina – IFSC, 2016.*

- Extra baixa tensão (EBT) – até 50 V em corrente alternada (CA) e 120 V em corrente contínua (CC);
- Baixa tensão (BT) – até 1000 V em corrente alternada (CA) e até 1500 V em corrente contínua (CC);
- Alta tensão (AT) – acima de 1000 V em corrente alternada (CA) e acima de 1500 V em corrente contínua (CC);
- Extra alta tensão (EAT) – acima de 35 kV;
- Ultra alta tensão (UAT) – acima de 350 kV.

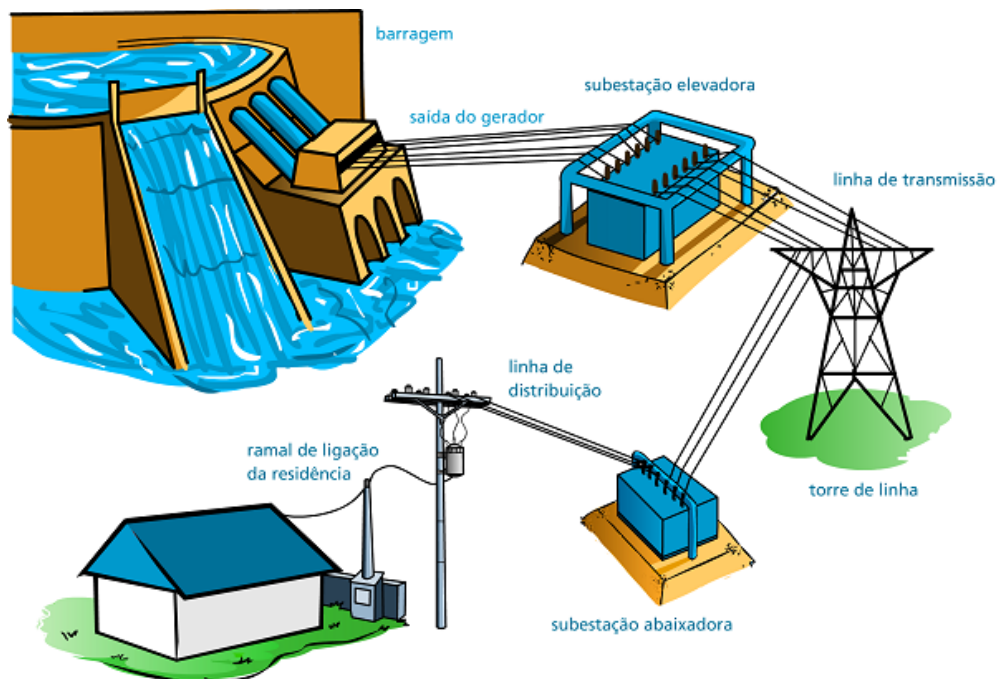


Figura 1 – Estrutura simplificada e didática do sistema de energia elétrica.

Fonte: <https://www.mundodaeletrica.com.br>. Acesso em 20/05/2021.

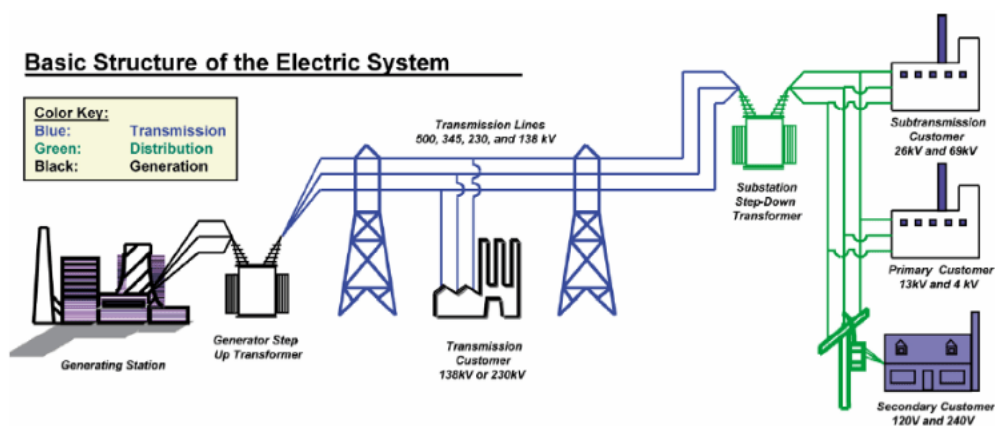


Figura 2 – Estrutura simplificada do sistema de energia elétrica.

Fonte: <https://i2.wp.com/esco-qd.com.br>. Acesso em 20/05/2021.

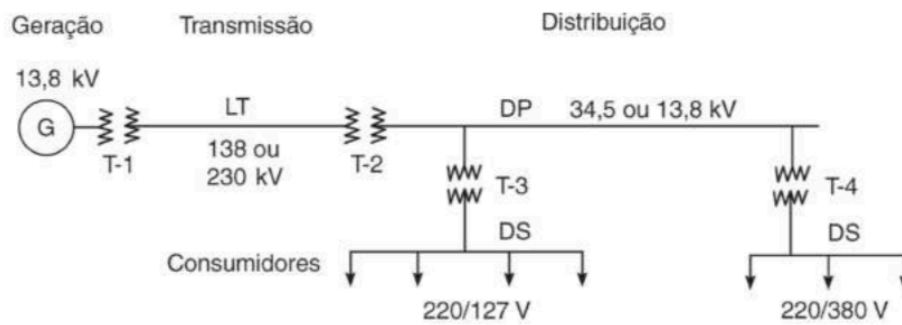


Figura 3 – Diagrama elétrico simplificado do sistema de energia elétrica.

Fonte: (Creder, 2002).

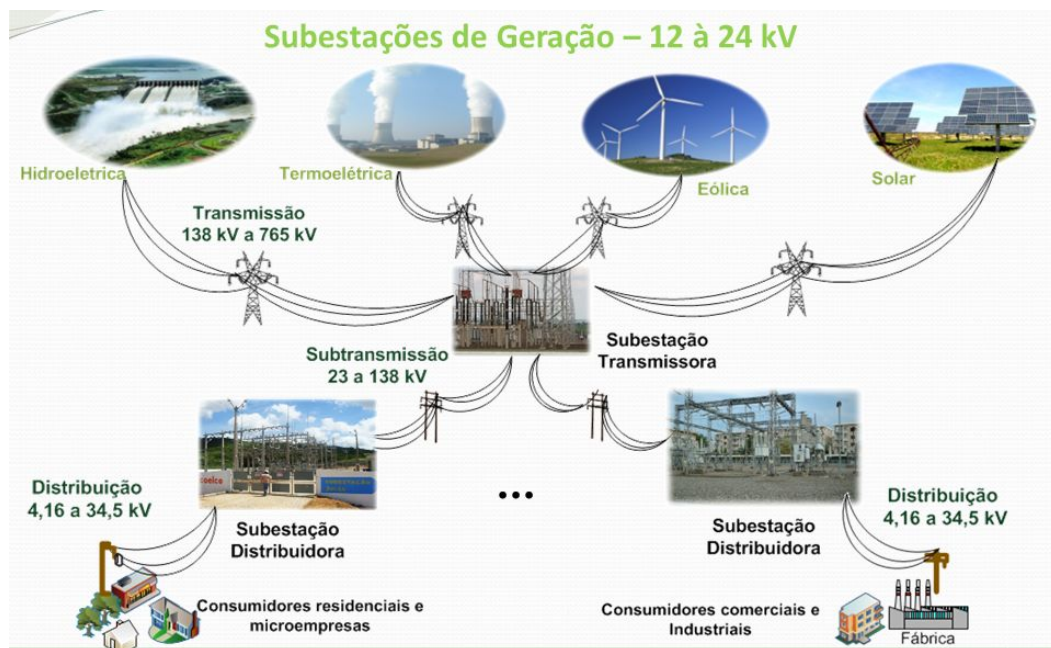


Figura 4 – Estrutura típica do sistema de energia elétrica.

Fonte: <https://i1.wp.com/sunsetenergia.com.br>. Acesso em 20/05/2021.

Atualmente com o uso de energias alternativas e a evolução da eletrônica de potência, é possível implementar sistemas elétricos complexos, ligados (*on-grid*) ou não (*off-grid*) no sistema de energia elétrica, sendo comuns termos como *smart grid* (rede ou sistema elétrico inteligente) e microrredes (*micro grid*). De acordo com (Joabel, 2016), uma microrrede engloba a integração de vários recursos de geração distribuída e um conjunto de cargas em uma pequena rede local (*microgrid*), formado por redes de média (MT) e baixa tensão (BT).

A construção e operação de microrredes ou de redes elétricas inteligentes envolve o conhecimento de diferentes áreas do conhecimento, como elétrica, eletrônica, sistemas de comunicação, controle, segurança, dentre outras.

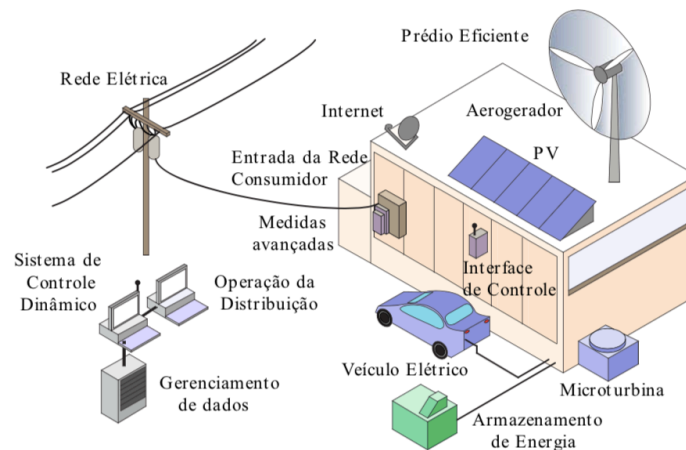


Figura 5 – Exemplo de microrrede predial.

Fonte: (Moia, 2016)².

2.3 Geração de energia elétrica

A geração de energia elétrica pode ser realizada por diferentes princípios e elementos. No Brasil, em virtude da abundância de recursos hídricos, é comum a utilização de usinas hidrelétricas; sendo comum atualmente a construção de parques para geração de energia alternativa. Define-se como energia alternativa ou renovável, aquela gerada a partir de fontes de energia renováveis, tais como: solar, eólica, hídrica e geotérmica. Assim, a geração de energia no Brasil, em virtude de utilizar em grande escala a geração hidrelétrica, é considerada limpa, em contraste com sistemas de energia elétrica que utilizam intensamente usinas termoeletricas a partir da queima de carvão ou termonucleares a partir do uso de urânio, por exemplo.

A Figura 6 mostra imagens da Usina Hidrelétrica Itaipu Binacional, uma das maiores do mundo, que gerou em 2016 103,1 milhões de MWh (megawatts-hora), que detem o recorde mundial de geração de energia elétrica (Fonte: <https://www.itaipu.gov.br>, acessado em 20/05/2021). De acordo com a empresa (Itaipu Binacional), “desde o começo de sua operação, em maio de 1984, há 34 anos e sete meses do início do acionamento de suas primeiras unidades geradoras, Itaipu acumula 2,6 bilhões de MWh, energia suficiente para iluminar o mundo inteiro por 42 dias com eletricidade limpa e renovável e mais barata que a termoeletrica. Já Três Gargantas (na China) acumula produção de 1,2 bilhão de MWh, menos da metade do acumulado de Itaipu” (grifado e adendo nosso).

Ainda na Figura 6 mostra-se uma imagem do Complexo Termoeletrico Jorge Lacerda, no município de Tubarão – SC, com capacidade total de 857 MW, formado por sete grupos geradores, agrupados em três usinas: Jorge Lacerda A, com duas unidades geradoras de 50 MW e duas de 66

² Moia, Joabel. Sistema de Conversão Estática CA-CC Bidirecional Aplicado à Microrredes CC Bipolares. Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, 2016.

MW cada, Jorge Lacerda B, com duas unidades de 131 MW cada e, Jorge Lacerda C, com uma unidade geradora de 363 MW (Fonte: <https://www.engie.com.br>, acessado em 20/05/2021.).

A Figura 7 mostra uma imagem do sistema de geração termonuclear de Angra dos Reis – RJ, em contraste com o parque de geração solar e eólico na cidade de Tubarão – SC. O sistema de energias alternativas na cidade de Tubarão – SC, próximo à Usina Termoelétrica Jorge Lacerda, possui uma usina solar (Usina Fotovoltaica Nova Aurora) com capacidade de 3 MW de pico, gerados com tecnologia de módulos fotovoltaicos de silício amorfo/microcristalino (a-Si/ μ c-Si), silício multicristalino/policristalino (p-Si) e disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS), todos com 1 MW cada um; além de uma usina eólica (Central Eólica Tubarão) de 2,1 MW, com uma torre de 120 metros e rotor com diâmetro de 110 metros.

O sistema fotovoltaico instalado no Câmpus Florianópolis do IFSC em 2018, mostrado na Figura 8, é composto por 260 módulos fotovoltaicos de 270 W (de pico) e 5 inversores de 15 kW de 220/380 V, gerando em torno de 70 kW de pico. Por fim, as Figura 8 e Figura 9 mostram outros exemplos de geradores de energia elétrica, alguns possíveis no Brasil, enquanto outros são específicos de determinadas regiões do planeta.



Usina Hidrelétrica de Itaipu Binacional.

Fonte: <https://www.itaipu.gov.br>. Acesso em 20/05/2021.



Complexo Termoelétrico Jorge Lacerda.

Fonte: <https://www.grandejornal.com.br>. Acesso em 20/05/2021.

Figura 6 – Exemplos de geradores de energia elétrica.



Usina Nuclear de Angra dos Reis.

Fonte: <http://www.planetaterrazul.com.br>. Acesso em 20/05/2021.



Planta de energias alternativas.

Fonte: <http://fotovoltaica.ufsc.br>. Acesso em 20/05/2021.

Figura 7 – Exemplos de geradores de energia elétrica.



Planta solar do IFSC – Câmpus Florianópolis.

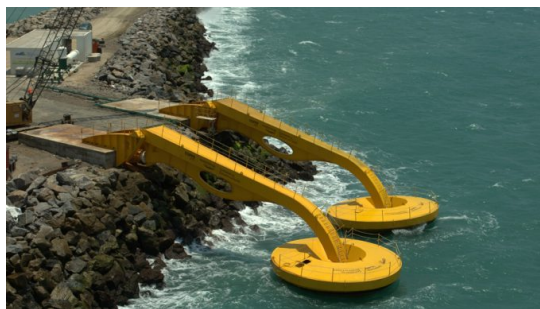
Fonte: <http://florianopolis.ifsc.edu.br/>. Acesso em 20/05/2021.



Exemplos de sistemas com biomassa.

Fonte: <https://peteletricaufff.wordpress.com/>. Acesso em 20/05/2021.

Figura 8 – Exemplos de geradores de energia elétrica.



Usina de Pecém- CE (maremotriz).

Fonte: <https://marsemfim.com.br>. Acesso em 20/05/2021.



Usina geotérmica.

Fonte: <https://www.cittadiniecologisti.it/>. Acesso em 20/05/2021.

Figura 9 – Exemplos de geradores de energia elétrica.

2.4 Transmissão de energia elétrica

O sistema de transmissão de energia elétrica brasileiro era muito simples inicialmente, conforme se pode observar na Figura 10, tornando-se um sistema complexo e interligado, com suas principais linhas de transmissão mostradas na Figura 11.

A transmissão de energia elétrica pode ser realizada em corrente contínua (HVDC - *high-voltage direct current*) ou alternada, tendo estas como características:

- Transmissão em corrente contínua – menores perdas do que em corrente alternada; necessidade de conversão ca-cc (retificação) logo após à geração e conversão cc-ca próximo à distribuição (inversão); dificuldade para elevação e diminuição, envolvendo conversores cc-cc ou transformadores eletrônicos; menores custos para linhas de longa distância;
- Transmissão em corrente alternada – maiores perdas do que em corrente contínua; simplicidade para elevação e diminuição com transformadores eletromagnéticos; custos mais altos em linhas de longa distância.

A Figura 12 mostra um exemplo de linha de transmissão de energia elétrica. As tensões típicas das linhas de transmissão, conforme a classificação em classes são:

- A1 – tensão de fornecimento igual ou superior a 230 kV;
- A2 – tensão de fornecimento de 88 kV a 138 kV;
- A3 – tensão de fornecimento de 69 kV.

Assim, as tensões do sistema de transmissão interligado (SIN – Sistema Nacional Interligado) são da classe A1, enquanto as classes A2 e A3 são denominadas de subtransmissão.

A Figura 13 mostra uma imagem da subestação de Foz do Iguaçu, onde é feita a elevação de tensão e conversão ca-cc (retificação) da energia elétrica gerada pela Usina Itaipu Binacional, destacando-se as quadriválvulas do sistema, formadas por quatro tiristores em série.

A conexão da Usina Itaipu Binacional ao sistema elétrico brasileiro ocorre de duas formas, uma em corrente alternada e outra em corrente contínua. O sistema de corrente contínua é formado por duas linhas com tensão da ordem de ± 600 kV, com extensão de aproximadamente 810 km, entre as subestações de Foz do Iguaçu (PR) e Ibiuna (SP); sendo que a conversão ca-cc e cc-ca é realizada por oito conversores em cada subestação; sistema este que está operando desde 1984. Por sua vez, o sistema de corrente alternada opera com tensão de 765 V, conectando as subestações de Foz do Iguaçu (PR) e Tijuco Preto (SP), com uma extensão da ordem de 900 km (Fonte: <https://www.itaipu.gov.br>. Acesso em 20/05/21).

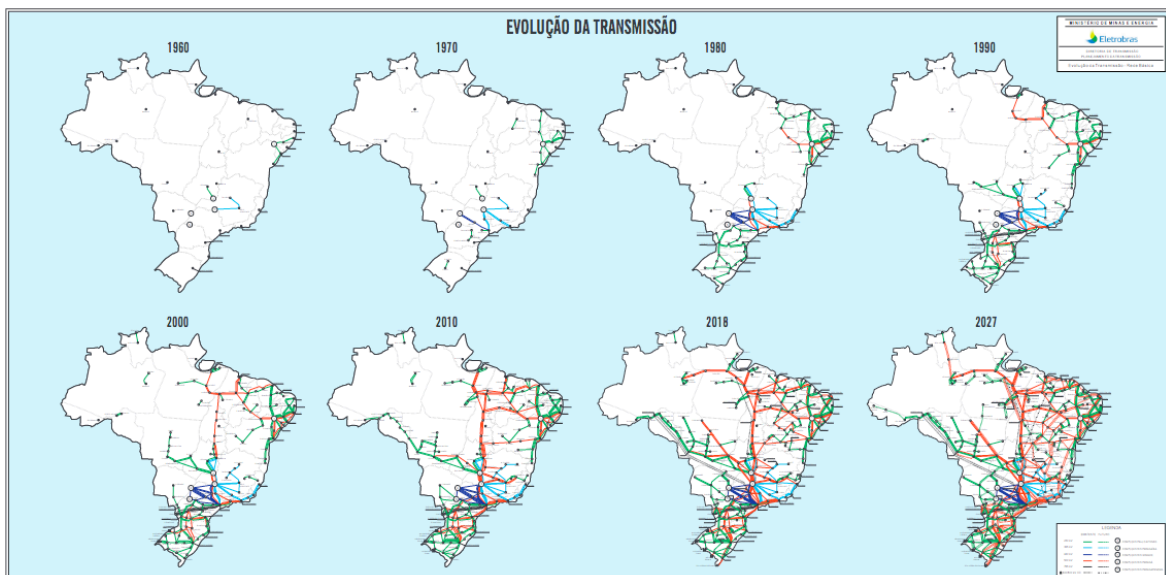


Figura 10 – Evolução do sistema de energia elétrica brasileiro.

Fonte: <https://eletrobras.com>. Acesso em 20/05/2021.



Figura 11 – Mapa das principais linhas de transmissão do sistema elétrico brasileiro interligado.

Fonte: <https://eletrobras.com>. Acesso em 20/05/2021.



Figura 12 – Exemplo de linhas de transmissão.

Fonte: <https://agenciabrasil.ebc.com.br>. Acesso em 20/05/2021.



Figura 13 – Subestação de elevação e conversão ca-cc em Foz do Iguaçu- PR e quadriválvulas do sistema.

Fonte: <https://www.furnas.com.br/>. Acesso em 20/05/2021.

2.1 Distribuição de energia elétrica

A distribuição de energia elétrica é realizada pelas concessionárias de energia elétrica, como por exemplo, a CELESC em Santa Catarina.

A Figura 14 mostra um exemplo de rede de distribuição de energia elétrica. Em relação aos níveis das tensões de fornecimento na distribuição, considera-se que as tensões secundárias são aquelas usadas para atendimento a residências, comércios e pequenas indústrias; sendo regulamentadas por norma pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e definidas por cada concessionária de energia elétrica em sua área de abrangência; sendo que para Santa Catarina a CELESC disponibiliza as seguintes tensões (Fonte: <https://www.aneel.gov.br/tensoes-nominais>. Acesso em 20/05/2021):

- Tensão Nominal 1 – 380/220 V;

- Tensão Nominal 2 – 440/220 V;
- Tensão Nominal 3 – 220/127 V.



Figura 14 – Exemplo de rede de distribuição.

Fonte: <https://www.palhocense.com.br/>. Acesso em 20/05/2021.

É importante destacar, como se observa na Figura 4, que conforme a potência dos consumidores, estes podem estar conectados em diferentes pontos do sistema de distribuição, isto é, em alimentação primária ou secundária. As linhas de distribuição denominadas de primárias são de média tensão (valores entre 2,3 kV e 44 kV) e geralmente estão afixadas nos postes da concessionária de energia elétrica em conjuntos de três condutores aéreos, dispostos horizontalmente, por exemplo, sustentados por cruzetas em postes de concreto. Já as linhas de distribuição secundárias são em baixa tensão (valores entre 110 V e 440 V), conectadas diretamente nas residências consumidoras, por exemplo, e afixadas nos postes em alinhamento vertical e abaixo da rede primária de alta tensão.

A transformação da tensão primária (alta tensão) para a tensão secundária (baixa tensão) e distribuição aos consumidores residenciais, por exemplo, é realizada pelos transformadores de distribuição, como mostrado na Figura 15.

As redes de distribuição podem ser classificadas em quatro tipos (Fonte: <https://www.abradee.org.br>. Acesso em 20/05/2021.), exemplificadas na Figura 16:

- Rede de Distribuição Aérea Convencional: os condutores são sem isolamento (nus), montados respeitando-se uma distância de isolamento entre os mesmos. Estas redes são muito comuns no Brasil, sendo susceptíveis à ocorrência de falhas (descargas atmosféricas, curto-circuito, contato com galhos de árvores, etc.);
- Rede de Distribuição Aérea Compacta: são mais recentes, da década de 1990,

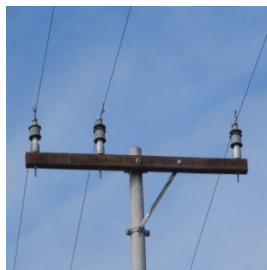
sendo mais compactas e mais seguras e menos susceptíveis a falhas, pois utilizam condutores isolados;

- Rede de Distribuição Aérea Isolada: os condutores são isolados suficientemente para não ser necessário o afastamento entre os mesmos, ou seja, podendo ser trançados; neste caso aumentando a resistência mecânica e ocupando menos espaço. São redes mais caras e utilizadas em condições especiais;
- Rede de Distribuição Subterrânea: são utilizados condutores isolados, montados sob a superfície, isto é, ficando enterradas no solo ou na estrutura, aumentando a confiabilidade e a estética do sistema, além de diminuir a manutenção. Estas redes tem alto custo, empregadas em situações especiais e regiões de alta densidade demográfica.



Figura 15 – Exemplos de transformadores de distribuição.

Fonte: <http://transformadoresjundiai.com.br>. Acesso em 20/05/2021.



Aérea convencional



Aérea compacta



Aérea isolada



Subterrânea

Figura 16 – Exemplos de tipos de redes de distribuição.

Fonte: <https://www.celesc.com.br>. Acesso em 20/05/2021.

A concessionária de energia elétrica CELESC, no Manual de Procedimentos (disponível em <https://www.celesc.com.br>), informa que os critérios de escolha são, dentre outros: segurança, análise técnica, meio ambiente, confiabilidade e custo do investimento.

Em Santa Catarina, o sistema típico de linha de transmissão é mostrado na Figura 17, onde deve-se atentar que o fornecimento secundário, em baixa tensão, é realizado por quatro fios, sendo

três fases e um condutor neutro e de proteção. Percebe-se que o ponto central da conexão em estrela (Y) do transformador abaixador de distribuição origina o condutor neutro, e pelo fato de ser aterrado, faz também o papel de condutor de proteção.

As tensões de fase, isto é, medidas entre as fases e o neutro, são nominalmente de 220 V e com frequência de 60 Hz. Já as tensões de linha, medidas entre duas fases, são de 380 V; isso nas redes convencionais em Santa Catarina.

A tensão de linha pode ser calculada a partir da tensão de fase por:

$$V_L = V_F \cdot \sqrt{3}$$

$$V_L = 220 \cdot \sqrt{3} \cong 381V$$

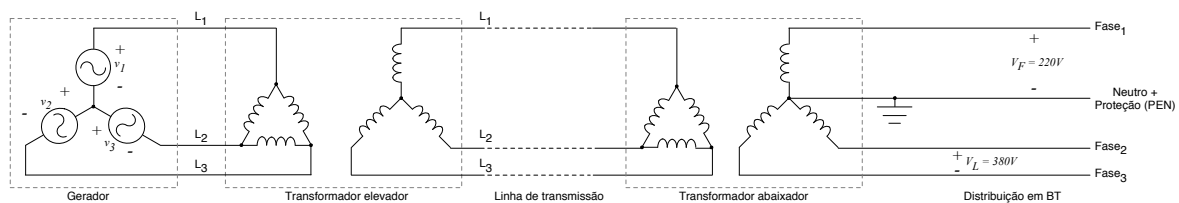


Figura 17 – Sistema típico de rede de distribuição de energia elétrica.

Fonte: Adaptado de (Creder, 2002).

As tensões das redes de distribuição são regulamentadas pela ANEEL no módulo 8 do Prodist³, sendo que as faixas para 220 V de tensão nominal ao consumidor final, na rede secundária, entre fase e neutro, são:

- Adequada: tensão da rede entre 202 V e 231 V;
- Precária: tensão entre 191 V e 202 V ou entre 231 V e 233 V;
- Crítica: tensão abaixo de 191 V ou acima de 233 V.

Assim, a tensão entregue pela concessionária de energia elétrica, na entrada das residências deve estar na faixa entre 202 V e 231 V. Por sua vez, a frequência pode ter uma variação, em regime permanente, de 59,9 Hz a 60,1 Hz.

Para a tensão de linha, isto é, entre duas fases, com valor nominal de 380 V, as faixas de tensão regulamentadas pela ANEEL são:

- Adequada: tensão da rede entre 350 V e 399 V;
- Precária: tensão entre 331 V e 350 V ou entre 399 V e 403 V;

³ Prodist, módulo 8. Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST. 2010.

- Crítica: tensão abaixo de 331 V ou acima de 403 V.

Os níveis de tensão no sistema elétrico brasileiro são mostradas na Tabela 1, com destaque aos valores mais usuais em Santa Catarina.



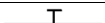
Por fim, é importante destacar que a simbologia dos elementos constituintes de instalações elétricas prediais, é padronizado pela norma NBR 5444, sendo que para os condutores disponibilizados pela concessionária de energia elétrica se tem os símbolos mostrados na Tabela 2.

Tabela 1 – Níveis de tensão do sistema elétrico brasileiro.

Transmissão (kV)	Distribuição Primária (AT) (kV)	Distribuição Secundária (BT)	
		Monofásica (V)	Trifásica (V)
69	13,8	110/220	115/230
138	23	115/230	120/208
230	Não usado	127/254	127/220
500		220/440	220/380
750		120/240	254/440

Fonte: Adaptado de (Mussoi, 2016).

Tabela 2 – Símbolos dos condutores do sistema de distribuição de energia elétrica.

Símbolo	Significado
	Condutor fase no interior de eletroduto
	Condutor neutro no interior de eletroduto
	Condutor terra no interior de eletroduto

Fonte: NBR 5444.

3 Proteção e Segurança

3.1 Introdução

O sistema de energia elétrica, as instalações elétricas e os usuários estão sujeitos a riscos e falhas, em virtude dos efeitos causados por diferentes situações e fenômenos. Assim, neste capítulo se pretende abordar de forma sintética sobre os sistemas de proteção e aterramento.

3.2 Descargas elétricas

Raios ou descargas elétricas atmosféricas são descargas elétricas de grande intensidade que ocorrem na atmosfera, decorrentes do acúmulo de cargas elétricas nos elementos do ambiente, podendo ocorrer internamente nas nuvens ou entre as nuvens e a terra, ou vice-versa.

A norma NBR 5419 define como descarga atmosférica a descarga elétrica de origem atmosférica entre uma nuvem e a terra ou entre nuvens, consistindo em um ou mais impulsos de vários quiloampères (Fonte: NBR 5419, Proteção de estruturas contra descargas atmosféricas). Por

sua vez, o raio é definido com um dos impulsos elétricos de uma descarga atmosférica para a terra.

A proteção das redes de energia elétrica e dos equipamentos a ela conectados, além dos usuários do sistema, é provida por uma série de equipamentos e procedimentos regulamentados por norma. Assim, se tem elementos internos e externos aos equipamentos ou volumes que se deseja proteger.

A proteção do sistema e dos usuários ocorre pelo sistema de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA), definido na NBR 5419 como o sistema completo destinado a proteger uma estrutura contra os efeitos das descargas atmosféricas. É composto de um sistema externo, formado por captadores (elementos para interceptar as descargas atmosféricas, como para-raios, por exemplo), subsistema de condutores de descida e subsistema de aterramento e de um sistema interno de proteção, formado por dispositivos que reduzem os efeitos elétricos e magnéticos da corrente de descarga atmosférica dentro do volume a proteger (como varistores, supressores de surtos, dentre outros). Alguns elementos de proteção presentes em redes elétricas de baixa tensão serão estudados posteriormente neste curso de Acionamentos Eletrônicos.

A norma NBR 5419 detalha o regramento para o projeto e instalação do sistema de proteção contra descargas atmosféricas, não sendo detalhado aqui, em vista do escopo deste documento.

É importante destacar que em algumas regiões do Brasil ocorre uma incidência grande de descargas atmosféricas, conforme se pode observar no mapa elaborado pelo INPE/CGPDI para o biênio 2018/2019; onde em alguns locais se tem em média em torno de 300 eventos por dia.



Figura 18 – Exemplos de descargas atmosféricas.

Fonte: <https://www.copel.com>. Acesso em 20/05/2021.

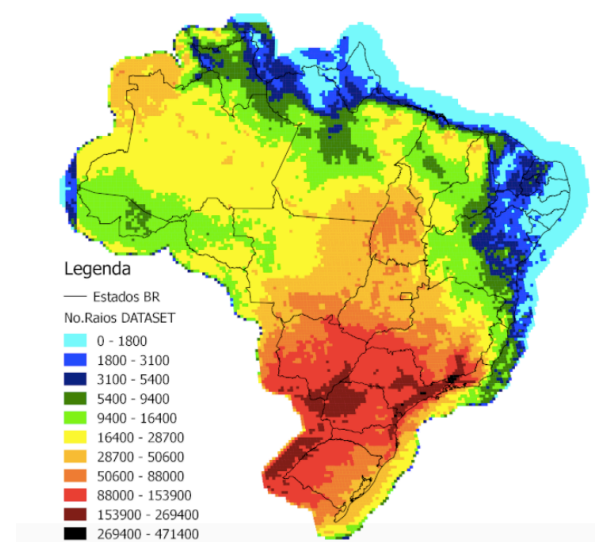


Figura 19 – Mapa de descargas atmosféricas do INPE/CGPDI, biênio 2018/2019.

Fonte: <http://www.inpe.br>. Acesso em 20/05/2021.

3.1 Choque elétrico

O choque elétrico pode ser definido como uma perturbação e que causa efeitos diversos nos organismos vivos quando estes são percorridos por correntes elétricas; ressaltando que o convencional é se referir a choque elétrico do ponto de vista humano, mas sabendo-se que a corrente elétrica causa efeitos tanto em seres vivos como em materiais e dispositivos de maneira geral (Fonte: adaptado de Vieira, 2005⁴).

Em termos legais, a Norma Regulamentadora (NR) 10 versa sobre segurança em instalações e serviços em eletricidade, sendo aplicável para geração, transmissão, distribuição e consumo, incluindo as etapas de projeto, construção, montagem, operação, manutenção das instalações elétricas e quaisquer trabalhos realizados nas suas proximidades, observando-se as normas técnicas oficiais estabelecidas pelos órgãos competentes e, na ausência ou omissão destas, as normas internacionais cabíveis. O objetivo da NR 10 é estabelecer os requisitos e condições mínimas objetivando a implementação de medidas de controle e sistemas preventivos, de forma a garantir a segurança e a saúde dos trabalhadores que, direta ou indiretamente, interajam em instalações elétricas e serviços com eletricidade.

Em termos de instalações elétricas, a NBR 5410 estabelece as condições a que devem satisfazer as instalações elétricas de baixa tensão, a fim de garantir a segurança de pessoas e animais, o funcionamento adequado da instalação e a conservação dos bens; aplicando-se aos seguintes casos:

- Aos circuitos elétricos alimentados sob tensão nominal igual ou inferior a 1000 V em corrente alternada, com frequências inferiores a 400 Hz, ou a 1500 V em corrente contínua;
- Aos circuitos elétricos, que não os internos aos equipamentos, funcionando sob uma tensão superior a 1000 V e alimentados através de uma instalação de tensão igual ou inferior a 1000 V em corrente alternada (por exemplo, circuitos de lâmpadas a descarga, precipitadores eletrostáticos etc.);
- A toda fiação e a toda linha elétrica que não sejam cobertas pelas normas relativas aos equipamentos de utilização; e
- Às linhas elétricas fixas de sinal (com exceção dos circuitos internos dos equipamentos).

⁴ VIEIRA, S. I. *Manual de Saúde e Segurança do Trabalho: segurança, higiene e medicina do trabalho*. Vol. 3. São Paulo: LTr, 2005.

Por outro lado, a NBR 5410 não se aplica a:

- Instalações de tração elétrica;
- Instalações elétricas de veículos automotores;
- Instalações elétricas de embarcações e aeronaves;
- Equipamentos para supressão de perturbações radioelétricas, na medida que não comprometam a segurança das instalações;
- Instalações de iluminação pública;
- Redes públicas de distribuição de energia elétrica;
- instalações de proteção contra quedas diretas de raios. No entanto, esta Norma considera as consequências dos fenômenos atmosféricos sobre as instalações (por exemplo, seleção dos dispositivos de proteção contra sobretensões);
- Instalações em minas;
- Instalações de cercas eletrificadas.

Os choques elétricos podem ser estáticos, dinâmicos ou por descargas atmosféricas. Em termos de circulação da corrente elétrica no corpo humano, pode-se ter cinco situações possíveis, conforme mostrado na Figura 20, sendo sempre consideradas mais perigosas aquelas casos em que a corrente elétrica circula pelo coração.

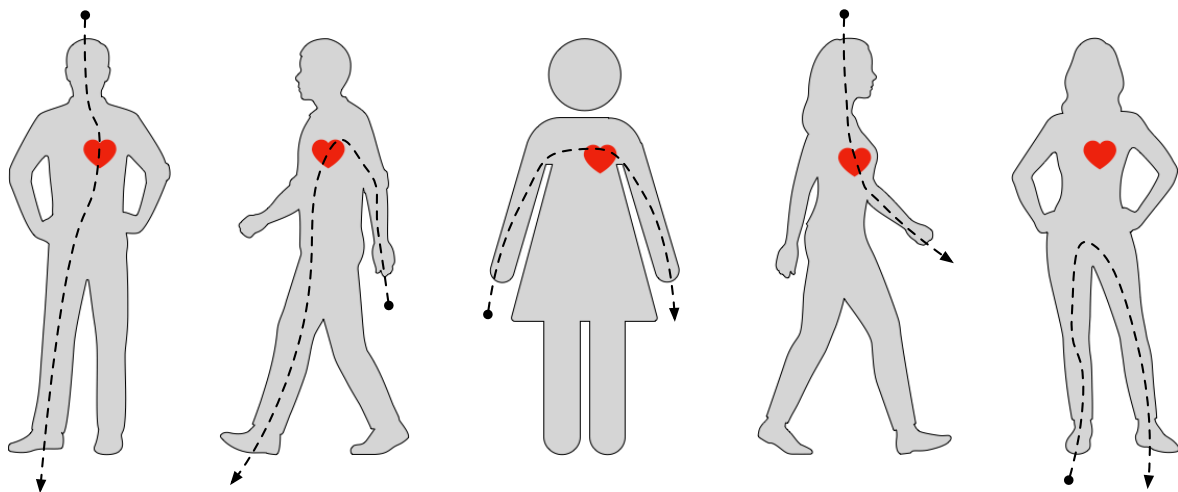


Figura 20 – Percursos da corrente elétrica no corpo humano.

As percepções e consequências dos choques elétricos são listadas na Tabela 3. É importante que sempre que ocorrer a exposição a um choque elétrico, seja acionado o setor responsável pelo pronto atendimento ou o órgão competente, como o Corpo de Bombeiros ou SAMU, por exemplo.

Tabela 3 – Efeitos do choque elétrico.

Corrente	Efeito	Percepção
1 mA	Apenas perceptível	Formigamento
10 mA	Contração muscular	Dor
16 mA	Contração muscular	Máxima dor tolerável
20 mA	Parada respiratória	Convulsões
100 mA	Ataque cardíaco	Fibrilação
2 A	Parada cardíaca	Queimaduras
3 A	Valor mortal	Queimaduras profundas

Fonte: Adaptado de <https://www.ufrj.br>. Acesso em 20/05/2021.

3.1 Sistemas de aterramento

Os sistemas de energia elétrica e seus equipamentos, conforme o caso, são aterrados visando a proteção do próprio sistema e dos usuários.

Aterramento é definido como a ligação de estruturas ou instalações com a terra, a fim de se estabelecer uma referência para a rede elétrica e permitir que fluam para a terra correntes elétricas de naturezas diversas (Creder, 2002).

As correntes elétricas que devem fluir pelo sistema de aterramento podem ser originadas por descargas atmosféricas (raios); descargas eletrostáticas; correntes de filtros, supressores de surtos e para-raios; e correntes de faltas (defeitos) para a terra (fuga de corrente).

Em relação ao sistema de aterramento, de acordo com (Creder, 2002), os tipos básicos de são:

- Aterramento funcional – aquele que consiste na conexão à terra de um dos condutores da rede de energia elétrica (em geral o neutro);
- Aterramento de proteção – aquele que consiste na ligação à terra das massas e dos elementos estranhos à instalação, evitando choques elétricos aos usuários dos mesmos por contato direto com o equipamento sob falta.




A Tabela 4 apresenta os símbolos dos condutores de proteção, para representação nos diagramas da instalação elétrica.

A classificação dos esquemas de aterramento, conforme a NBR 5410, segue um padrão específico de identificação, podendo ser:

- Esquema TN – o esquema TN possui um ponto da alimentação diretamente aterrado, sendo as massas ligadas a esse ponto através de condutores de proteção (mostrado na Figura 21). Este esquema pode ter variações, que são:
 - Esquema TN-S – o condutor neutro e o condutor de proteção são distintos;

- Esquema TN-C-S - em parte do qual as funções de neutro e de proteção são combinadas em um único condutor;
- Esquema TN-C – no qual as funções de neutro e de proteção são combinadas em um único condutor, na totalidade do esquema.
- 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 (mostrado na Figura 22);
- Esquema IT – todas as partes vivas são isoladas da terra ou um ponto da alimentação é aterrado através de impedância (mostrado nas Figura 23 e Figura 24). As massas da instalação são aterradas, tendo-se então:
 - A – Sem aterramento da alimentação;
 - B – Alimentação aterrada através de impedância;
 - B.1 – Massas aterradas em eletrodos separados e independentes do eletrodo de aterramento da alimentação;
 - B.2 – Massas coletivamente aterradas em eletrodo independente do eletrodo de aterramento da alimentação;
 - B.3 – Massas coletivamente aterradas no mesmo eletrodo da alimentação.

Tabela 4 – Símbolos dos condutores de proteção.

Símbolo	Significado
	Condutor neutro (N)
	Condutor de proteção (PE)
	Condutor combinando as funções de neutro e de condutor de proteção (PEN)

Fonte: NBR 5410.

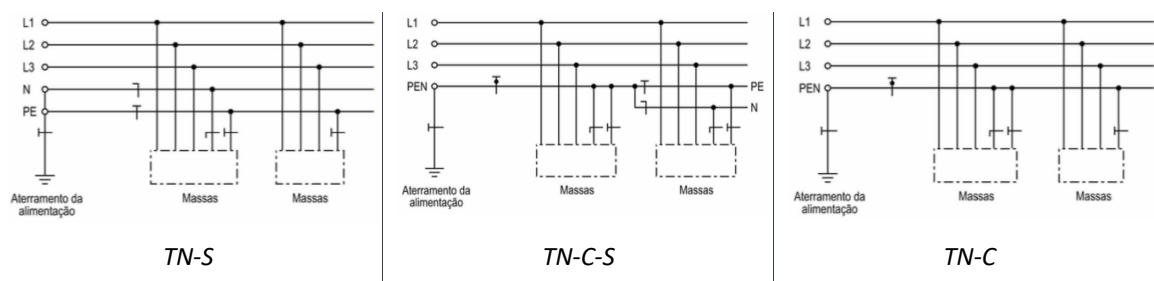


Figura 21 – Esquema TN.

Fonte: NBR 5410.

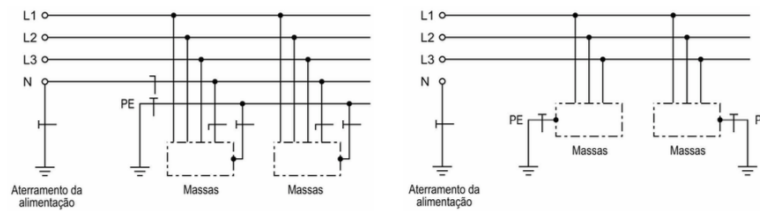


Figura 22 – Esquema TT.

Fonte: NBR 5410.

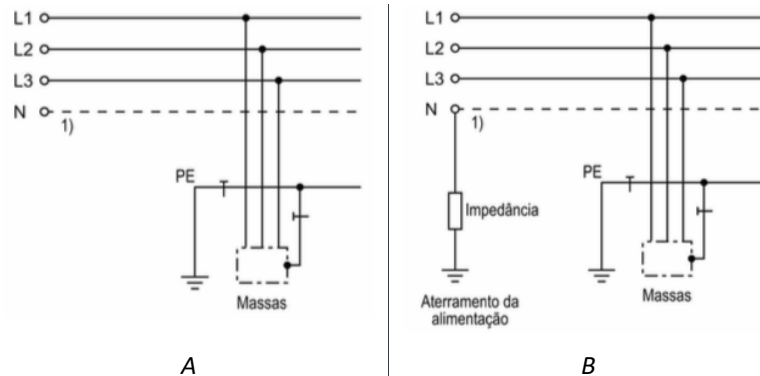


Figura 23 – Esquema IT.

Fonte: NBR 5410.

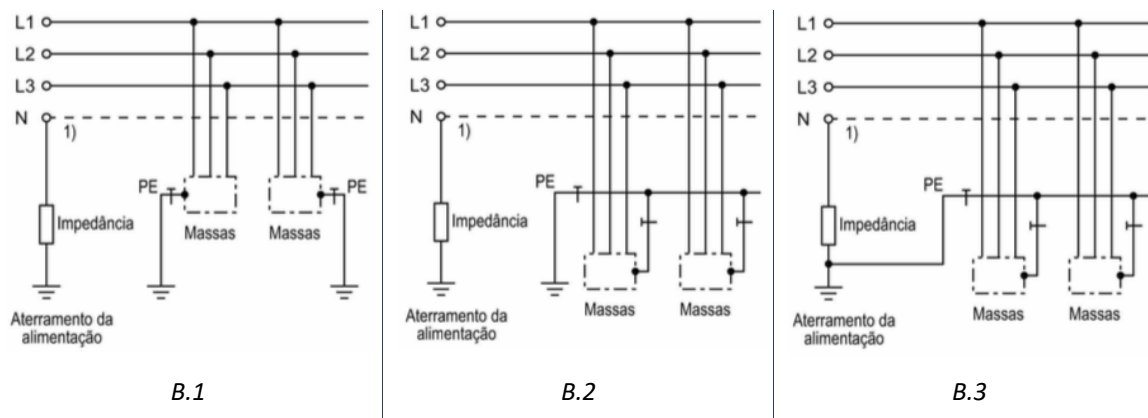


Figura 24 – Esquema IT.

Fonte: NBR 5410.

A Figura 25 mostra um sistema típico de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica no Brasil, onde se percebe que do gerador até o primário do transformador de distribuição se tem um circuito trifásico (fases A, B e C), sem aterramento e sem neutro. Já a partir do secundário do transformador abaixador da distribuição, se passa a ter um sistema com trifásico com neutro (N). Neste circuito não foi representado o condutor de proteção (PEN), pois em geral, no sistema elétrico brasileiro, o condutor Neutro é aterrado, tendo-se então um sistema do tipo TN-C.

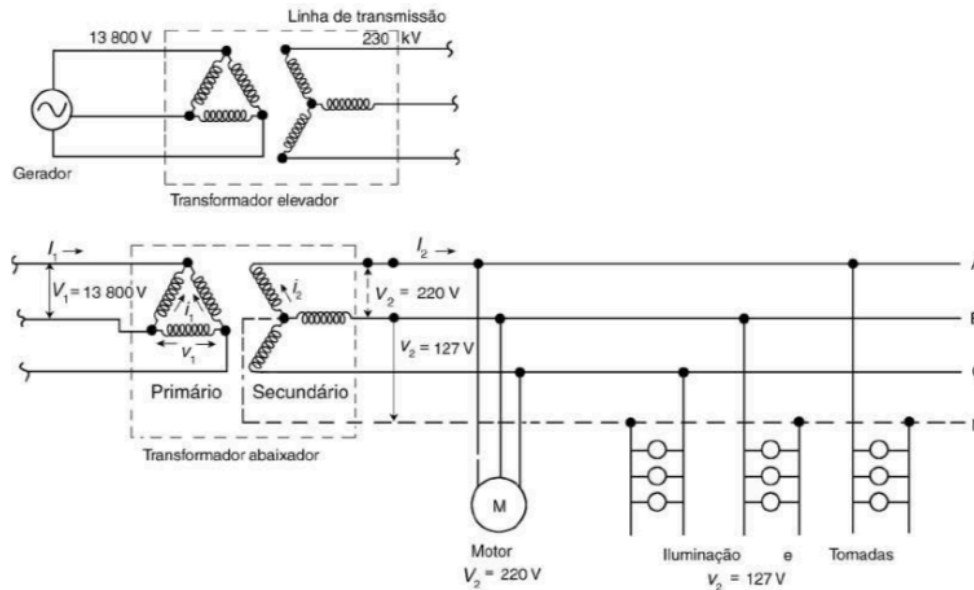


Figura 25 – Sistema típico de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica.

Fonte: (Creder, 2002).

Em virtude de o sistema elétrico ser aterrado, ou seja, estar na mesma referência dos usuários, tem-se uma diferença de potencial entre os condutores fase e a terra. Isso implica que os usuários, que estão no mesmo referencial da terra, estarão submetidos à uma diferença de potencial de 220 V quando tocarem os condutores fase de uma instalação elétrica de baixa tensão.

A Figura 26 mostra duas situações distintas, utilizando-se ou não transformador de isolamento (T_1). No primeiro caso, sem o uso de transformador de isolamento, o usuário está no referencial de terra, por intermédio de duas impedâncias, que são:

- Z_H – Impedância do corpo do usuário, somando-se as vestimentas (roupas e calçados). Esta impedância é afetada pela umidade da pele, se o usuário está seco ou molhado, se está vestido, usando calçados ou não e o grau de isolamento destes calçados;
- Z_T – Impedância de terra, isto é, entre a superfície (chão) onde o usuário está e o sistema de aterramento da rede de energia elétrica. Esta impedância é afetada pela distância da superfície onde o usuário está apoiado e a terra, do material desta superfície e do caminho, se está molhada ou seca, de seu nível de isolamento, dentre outros fatores.

O usuário pode tocar no condutor fase ou no condutor PEN (neutro mais proteção), como está mostrado nas situações A e B da Figura 26, respectivamente. Na situação B, considera-se que, idealmente, não há diferença de potencial entre o condutor PEN e o usuário, não ocorrendo a circulação de corrente elétrica e não sujeitando-se o usuário a um choque elétrico.

Já na situação A, quando o usuário toca o condutor fase, este estará submetido a uma diferença de potencial (tensão elétrica) de 220 V em relação à sua referência e ao condutor neutro e de proteção, fechando um caminho para circulação de corrente mostrado na Figura 26. Neste caso, se as impedâncias do caminho ($Z_H + Z_T$) forem baixas, o usuário poderá estar submetido a um choque elétrico fatal ou com graves consequências para sua integridade fisiológica.

Em virtude deste risco, sempre que os usuários estarão manipulando equipamentos que impliquem em riscos à vida, é imprescindível o uso de transformadores de isolamento, que tem relação de transformação unitária, por exemplo, mas que provem isolamento elétrico entre a entrada e a saída. Exemplos de situações em que se deve utilizar transformador de isolamento são quando da operação de máquinas em locais úmidos ou molhados, como minas, por exemplo.

A Figura 26 mostra novamente o usuário tocando acidentalmente nos condutores do lado secundário do transformador isolador, identificados como L_1 e L_2 , visto que agora o circuito do lado secundário não está aterrado, não se identificando então os condutores por fase, neutro, por exemplo. Percebe-se pela figura o usuário não ficará submetido à diferença de potencial, pois o lado secundário está isolado do primário e da referência de terra. Assim, não há caminho para a circulação de corrente elétrica se o usuário tocar acidentalmente nos condutores L_1 ou L_2 .

No entanto é necessário atentar que, se o usuário tocar simultaneamente nos condutores L_1 e L_2 , estará submetido novamente a diferença de potencial de 220 V, ficando sujeito ao choque elétrico e suas consequências.

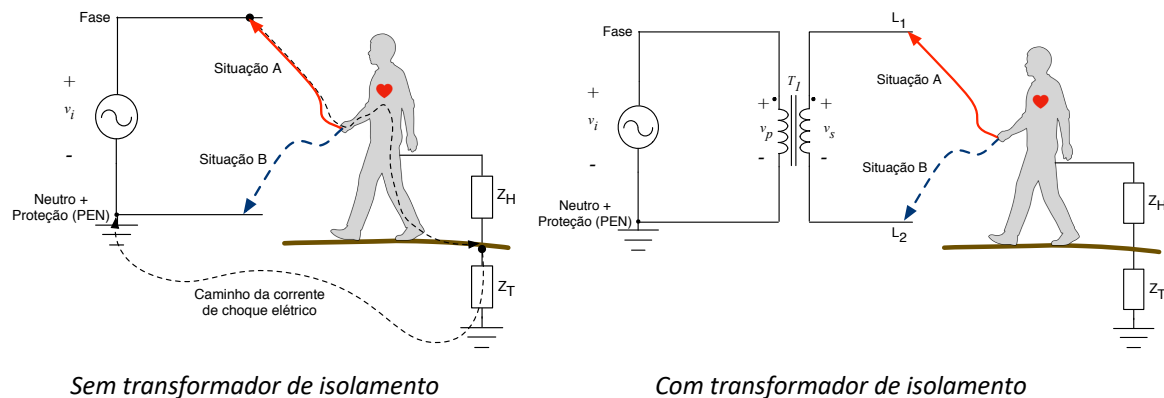


Figura 26 – Usuário tocando acidentalmente os condutores da instalação elétrica.

Além da questão de risco de choque elétrico, conforme mostrado anteriormente, também se tem implicações nas conexões dos instrumentos de medição ao se medir grandezas da rede de energia elétrica, isso em virtude de o sistema elétrico ser aterrado.

A Figura 27 mostra um esboço de conexão de um osciloscópio na rede de energia elétrica. É importante notar que os equipamentos possuem cabos de conexão com três fios (fase, neutro e

proteção), enquanto o sistema de energia elétrica pode ser a dois fios (fase e neutro mais proteção).

A massa do equipamento de medição é conectada ao condutor de proteção do mesmo, resultando que as ponteiros de medição, em seus terminais negativos (-, menos), também estão conectadas aos condutores de proteção; isso para a proteção dos usuários contra choque elétrico. No entanto, isso implica que, se o osciloscópio for utilizado para se medir a tensão diretamente na rede de energia elétrica, além de se ter o risco de danificar o equipamento por sobretensão, pode ocorrer um curto-circuito pelas ponteiros, provando a destruição das mesmas. Esta situação é mostrada na Figura 27, na parte inferior, quando se conecta a ponteira negativa (menos) no condutor fase, fechando um caminho de circulação de corrente pelo condutor de proteção e provando um curto-circuito na rede de energia elétrica.

Assim, recomenda-se que sejam utilizados transformadores de isolamento/medição ou ponteiros isoladas, que operam com tensões mais elevadas e podem ser conectadas diretamente na rede de energia elétrica sem risco de curto-circuito.

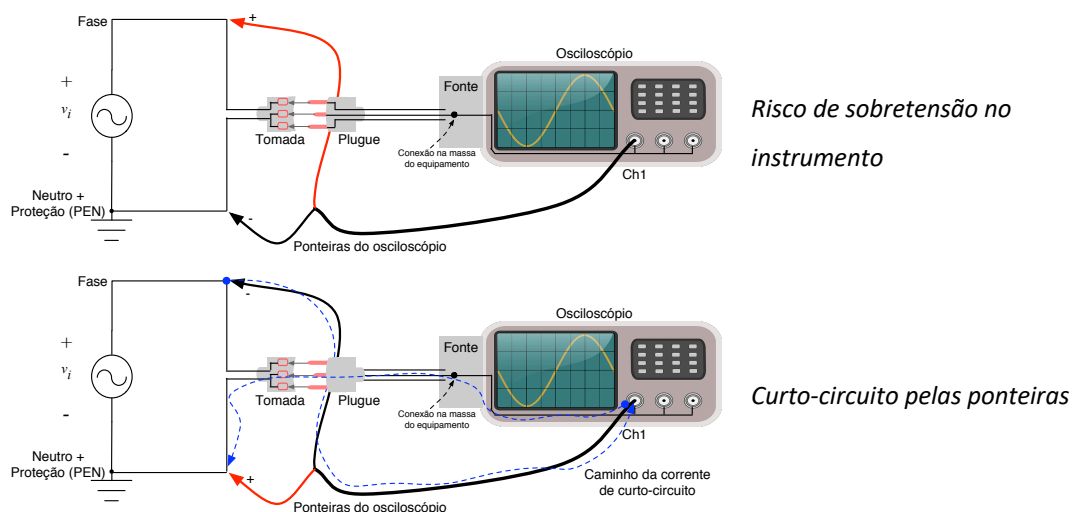


Figura 27 – Conexão de instrumento de medição diretamente na rede de energia elétrica.

4 Diagramas Elétricos

4.1 Introdução

A representação dos elementos das instalações elétricas e suas conexões é realizado por intermédio de diagramas elétricos, que basicamente podem ser do tipo unifilar ou multifilar. É ainda possível, apesar de não ser usual, se representar os elementos e suas conexões por meio de desenhos que se aproximam mais do aspecto real do que se está desejando representar, tendo utilidade didática ou artística, por exemplo.

4.2 Diagrama unifilar

O diagrama unifilar (um fio) é utilizado para a representação de instalações elétricas com muitos elementos, por exemplo em uma planta baixa. Assim, por meio da utilização de símbolos e códigos, é possível simplificar e facilitar a representação dos circuitos.

A Figura 28 mostra o diagrama unifilar de uma instalação elétrica, sobre a planta baixa da edificação. Nota-se que os condutores são representados por símbolos, e as linhas que interconectam os elementos representam a tubulação (eletrodutos) para a passagem da fiação. Os elementos do sistema também são representados pelos seus respectivos símbolos.

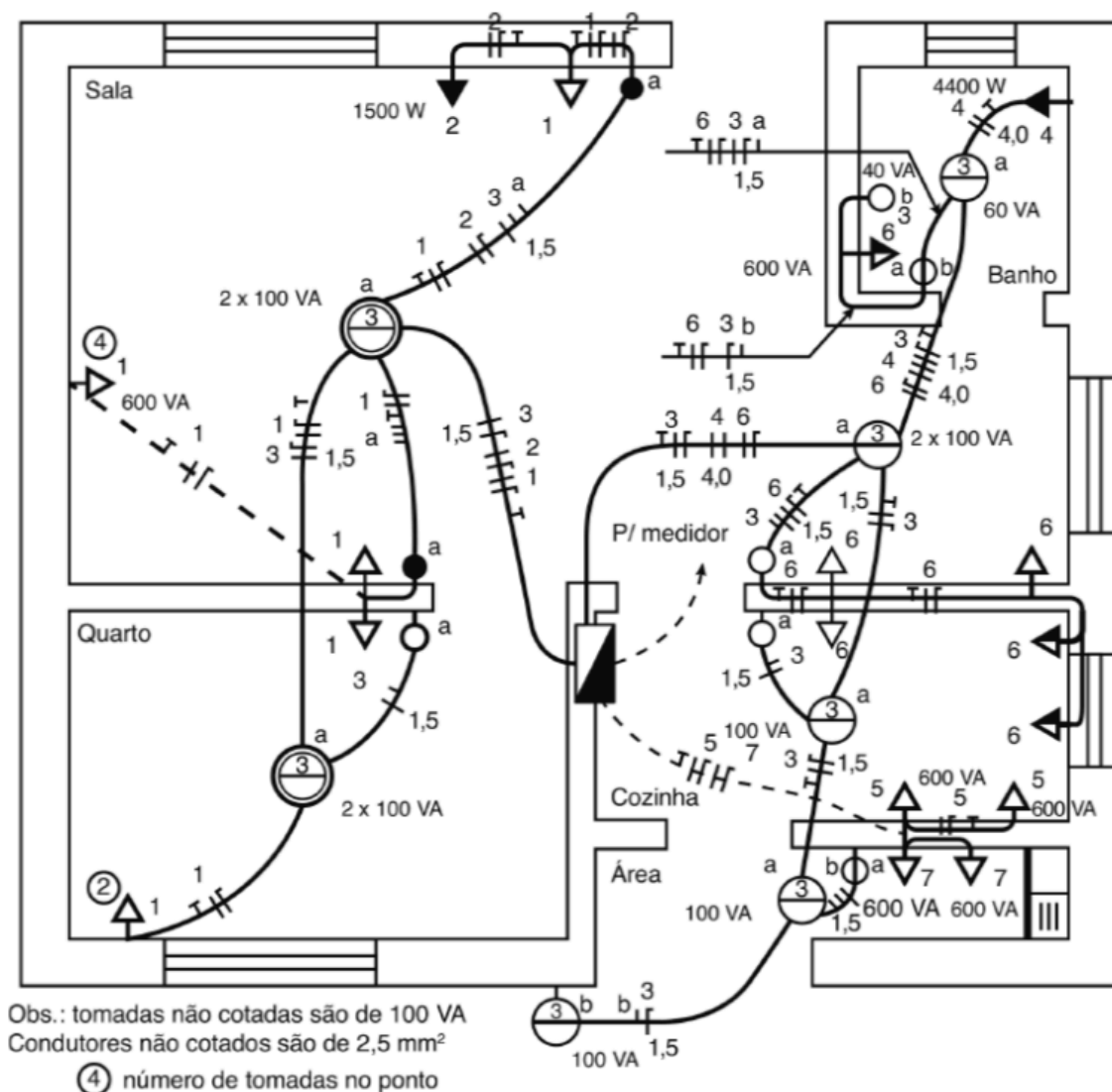


Figura 28 – Diagrama unifilar de uma instalação elétrica.

Fonte: (Creder, 2002).

4.3 Diagrama multifilar

O diagrama multifilar (vários fios) representa todas as conexões dos elementos do circuito elétrico da instalação, como serão executados na prática, resultando em um esquemático completo de um circuito ou instalação. Em circuitos eletrônicos, quando se representa o circuito elétrico de um equipamento, se está desenhando o diagrama multifilar daquele dispositivo, resultando no esquemático do mesmo.

A Figura 29 mostra o diagrama multifilar (trifilar) da instalação elétrica mostrada na Figura 28, com o objetivo de representar os elementos de proteção daquela instalação.

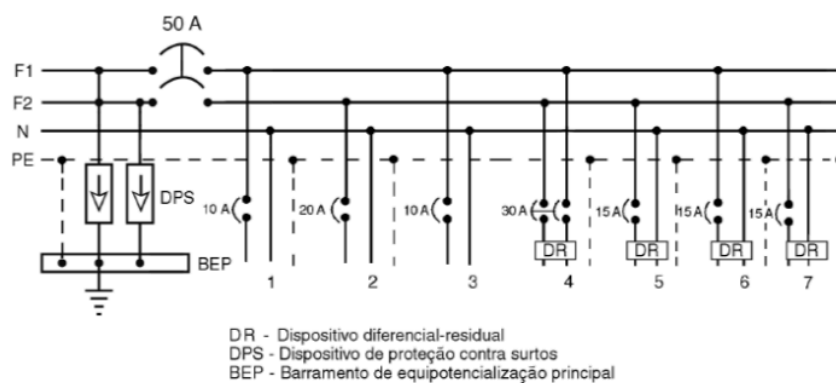


Figura 29 – Diagrama multifilar de parte de uma instalação elétrica.

Fonte: (Creder, 2002).

4.1 Diagramas unifilar, multifilar e funcional ou desenho em perspectiva

Em algumas situações com objetivos técnicos, didáticos ou estéticos, pode-se utilizar também a representação em perspectiva de uma instalação ou elementos do sistema.

A Figura 30 apresenta um circuito de iluminação, formado por três lâmpadas comandadas por três interruptores simples, conectadas em uma rede de energia elétrica com os condutores fase e neutro. Neste caso foram apresentados os diagramas unifilar, multifilar e desenho em perspectiva, podendo-se notar as diferenças entre os mesmos e suas características, quais sejam:

- Diagrama unifilar – mais simples de elaborar, representando o circuito em pouco espaço e com poucos elementos representativos;
- Diagrama multifilar – representa todas as conexões dos elementos do sistema, sendo fiel ao circuito elétrico que deve ser executado para o correto funcionamento da instalação;
- Diagrama funcional ou desenho em perspectiva – permite representar tridimensionalmente a instalação elétrica, com figuras mais próximas da representação real de seus elementos.

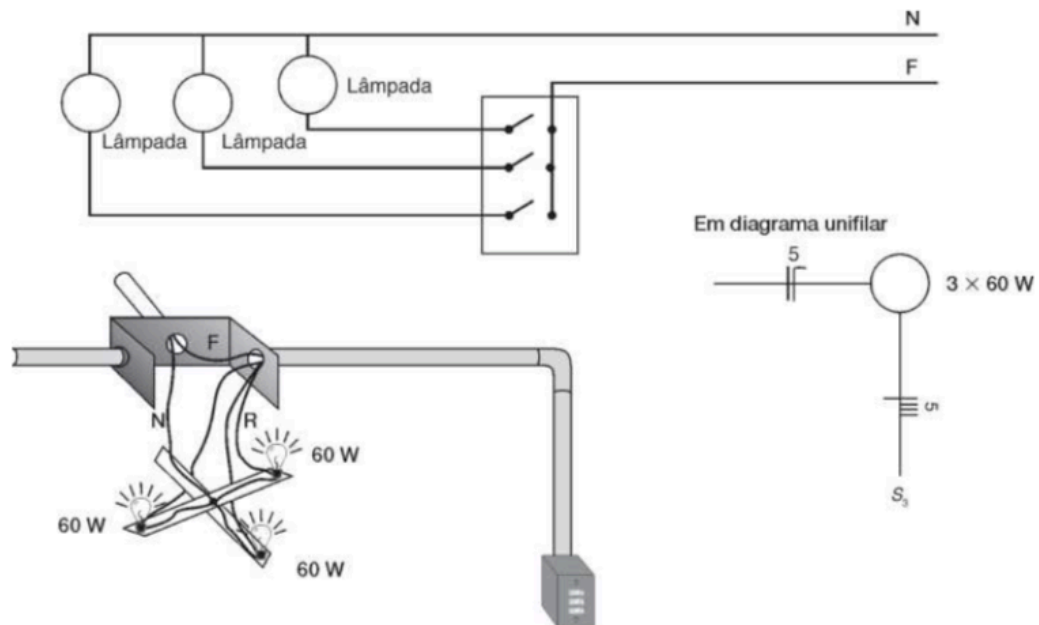


Figura 30 – Diagramas unifilar, multifilar e desenho em perspectiva de um circuito de iluminação.

Fonte: (Creder, 2002).

5 Exercícios

Exercícios Resolvidos

ER 01. Cite as principais etapas do sistema de energia elétrica?

As principais etapas ou partes do sistema de energia elétrica são: geração, transmissão e distribuição.

ER 02. Os consumidores em baixa tensão são alimentados em que tensão e qual sua amplitude em Santa Catarina?

A alimentação dos consumidores em baixa tensão é secundária, sendo que a tensão entre fase e neutro (monofásica) é de 220 V.

ER 03. O que é um diagrama unifilar?

Diagrama unifilar é aquele que permite representar os elementos da instalação elétrica de maneira simplificada e utilizando um condutor (fio) apenas, com os condutores representados por símbolos.

ER 04. Qual a finalidade do condutor de proteção?

O condutor de proteção tem por finalidade proteger os usuários contra choques elétricos, descargas atmosféricas e correntes de fuga, por exemplo.

Exercícios Propostos

EP 01. Comente sobre algumas formas de se gerar energia elétrica.

EP 02. Explique o que são tensão de fase e tensão de linha?

EP 03. Cite consequências de se levar um choque elétrico.

EP 04. A partir de que corrente o choque elétrico é prejudicial ao ser humano?

EP 05. O que é um condutor PEN?

6 Atividade Avaliativa

6.1 Introdução – O que preciso saber

Ao final deste objetivo de aprendizagem são apresentadas cinco questões, que devem ser respondidas sem consultar o material. Se você conseguir responder as questões e conferir as respostas com o gabarito abaixo, parabéns, você concluiu com êxito este tópico. Caso tenha errado alguma questão, revise o conteúdo relacionado com a mesma e refaça a questão, procurando se concentrar mais desta vez, para acertar o exercício e fixar bem o conteúdo.

AA 01. O que o sistema de distribuição de energia elétrica?

AA 02. Em um sistema onde a tensão de fase é de 220 V, qual o valor da tensão de linha?

AA 03. Explique o que é um diagrama multifilar.

AA 04. Qual a finalidade de se utilizar transformadores de isolamento?

AA 05. Quais os condutores disponibilizados pela concessionária de energia elétrica, em Santa Catarina, em uma instalação elétrica residencial típica?

AA 01. O sistema de distribuição de energia elétrica realiza a conexão dos consumidores à rede elétrica, podendo ser em baixa ou alta tensão. É de responsabilidade das concessionárias de energia elétrica.

AA 02. Se a tensão de fase é de 220 V, a tensão de linha será de 380 V.

AA 03. Diagrama multifilar é aquele que representa todas as conexões dos elementos da instalação elétrica, empregando múltiplos condutores.

AA 04. O objetivo de se utilizar transformadores de isolamento é a proteção dos usuários contra choques elétricos ou a proteção de instrumentos de medição para se medir as grandezas da rede de energia elétrica, por exemplo.

AA 05. A CELESC disponibiliza em sua rede de distribuição, em geral, quatro condutores, sendo três fases e o condutor de neutro mais proteção.



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA

DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA

CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM ELETRÔNICA INDUSTRIAL

Acionamentos Eletrônicos



GUIA DE ESTUDO

- OBJETIVO DE APRENDIZAGEM - ELEMENTOS DE INSTALAÇÕES ELÉTRICAS

ELEMENTOS DE INSTALAÇÕES ELÉTRICAS

Objetivo de Aprendizagem

Conhecer os principais elementos de instalações elétricas.

Objetivos parciais

- Conhecer simbologia dos elementos de instalações elétricas;
- Conhecer os principais elementos das instalações elétricas;
- Descrever os elementos que compõem uma instalação elétrica;
- Saber como representar os elementos das instalações elétricas nos diagramas unifilares.

Aulas relacionadas

Este objetivo de aprendizagem está relacionado com a aula 02 da disciplina.

Pré-requisitos

Ter estudado o objetivo de aprendizagem 01 relacionado aos princípios de instalações elétricas.

Continuidade dos Estudos

O próximo objetivo de aprendizagem será projetar instalações elétricas simples.

Roteiro para estudos

Os estudos referentes a este objetivo de aprendizagem consistem em:

1. Estudar este documento resumo, realizando as atividades propostas no mesmo;
2. Responder o quiz relacionado a este objetivo de aprendizagem;
3. Caso perceba necessidade, estudar a apresentação deste assunto ou consultar os livros texto indicados para esta disciplina;
4. Realizar os exercícios deste tópico da matéria;
5. Realizar a avaliação final para progredir ao próximo conteúdo.

Referências

- Material disponibilizado para a disciplina de Acionamentos Eletrônicos – 2021/1.
Departamento Acadêmico de Eletrônica, Instituto Federal de Santa Catarina, Campus Florianópolis.
- CREDER, H. Instalações Elétricas. São Paulo: Livros Técnicos e científicos Editora, 2002.

Check-list

Caro estudante, verifique se você completou as atividades deste objetivo de aprendizagem e obteve êxito para continuar seus estudos.

Assinale as atividades realizadas:

Estudo do documento resumo:

- Leitura do documento resumo;
- Exercícios do documento resumo;
- Atividade avaliativa do documento resumo.
- Obtive êxito e entendi o conteúdo deste documento;
- Ainda não entendi bem o conteúdo e estudarei o mesmo com mais profundidade.

Estou com dúvidas, irei estudar com mais detalhes este conteúdo:

- Assistir a apresentação relacionada ao conteúdo (apresentação 01);
- Ler os capítulos deste conteúdo no livro (capítulos 01 e 02).

Ainda estou com dúvidas:

- Entrarei em contato com o professor.

Obtive êxito, então seguirei em frente:

- Responder ao quiz deste conteúdo no Moodle;
- Informar ao professor que estou avançando com o conteúdo.

Parabéns, continue estudando com afinco e vamos em frente!!

CONTEÚDO

**- OBJETIVO DE APRENDIZAGEM -
ELEMENTOS DE INSTALAÇÕES ELÉTRICAS**

1 Introdução

O conteúdo a ser estudado neste tópico da disciplina se refere aos elementos que compõem uma instalação elétrica, descrevendo-se e representando os mesmos em diagramas unifilares sobre plantas baixas de edificações.

Assim, é fundamental que você conheça e saiba descrever os principais elementos de uma instalação elétrica, além de conhecer a simbologia relacionada com a representação em diagramas unifilares dos componentes e suas interconexões, em termos de instalações elétricas simples.

1.1 Conteúdo – O que irei estudar

Estudaremos neste tópico:

- Simbologia de elementos de instalações elétricas;
- Principais elementos de instalações elétricas.

1.2 Metodologia – O que devo fazer e como fazer

Leia com atenção o conteúdo a seguir. Ao final deste tópico são apresentados exercícios resolvidos. Após são apresentados alguns exercícios propostos.

Ao realizar estas atividades e se sentir confiante para progredir, siga os passos indicados na primeira página deste documento.

Espera-se que após estudar este assunto, você consiga:

- Descrever os elementos de uma instalação elétrica simples;
- Representar simbolicamente os elementos de uma instalação elétrica.

A atividade avaliativa deste objetivo de aprendizagem consistirá em perguntar ao estudante para descrever os elementos de uma instalação elétrica.

Exemplo de atividade avaliativa:

1. Cite alguns elementos que compõem uma instalação elétrica.
2. Descreva sobre dispositivos de proteção das instalações elétricas.
3. Represente alguns elementos com sua simbologia correspondente.
4. Explique o funcionamento de alguns elementos de instalações elétricas simples.

2 Simbologia de Elementos de Instalações Elétricas

2.1 Introdução

A representação dos elementos que compõem as instalações elétricas é realizada por meio de símbolos específicos, visando o desenho do diagrama unifilar sobre a planta baixa da edificação.

É importante destacar que, em virtude de variações na simbologia representativa de elementos de instalações elétricas, todo projeto deve conter uma legenda, com objetivo de esclarecer e definir os símbolos empregados em cada caso em específico.

A seguir serão apresentados os símbolos dos principais elementos utilizados em instalações elétricas.

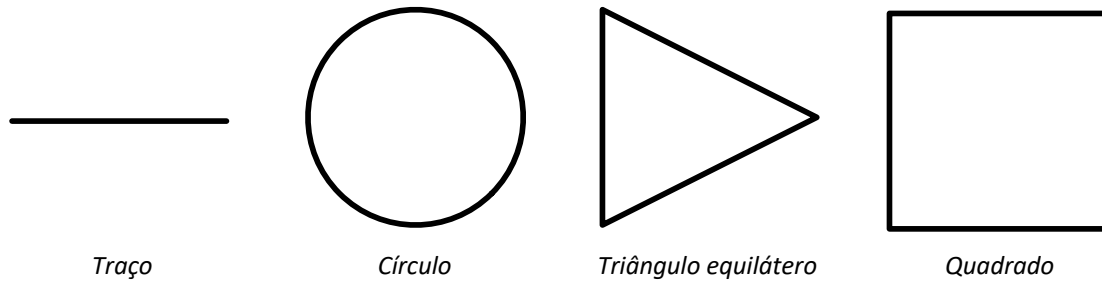
2.2 Norma NBR 5444

A norma NBR 5444 de 1989 definia a simbologia a ser empregada na representação dos elementos de instalações elétricas. Esta norma foi cancelada, mas continua em uso, visto a ABNT recomendar o emprego de duas normas internacionais, quais sejam:

- EC 60417 – símbolos gráficos para uso em equipamentos (*graphical symbols for use on equipment*);
- IEC 60617 – símbolos gráficos para diagramas (*graphical symbols for diagrams*).

A NBR 5444 considera que a construção da simbologia é baseada em figuras geométricas, para permitir uma representação adequada e coerente dos dispositivos elétricos; se baseando na conceituação simbólica de quatro elementos geométricos básicos: o traço, o círculo, o triângulo equilátero e o quadrado. A Figura 1 apresenta o desenho dos elementos geométricos empregados na NBR 5444; os quais representam:

- Traço - seguimento de reta que representa o eletroduto;
- Círculo - representa três funções básicas: o ponto de luz, o interruptor e a indicação de qualquer dispositivo embutido no teto;
- Triângulo equilátero - representa tomadas em geral;
- Quadrado - qualquer tipo de elemento no piso ou conversor de energia (motor elétrico).



2.3 Simbologia usual

Em virtude do cancelamento da norma NBR 5444 e do emprego de diferentes símbolos para representar os elementos, considerando também a evolução tecnológica e a incorporação de diferentes funcionalidades aos dispositivos de instalações elétricas, tem-se, conforme cada projetista, escritório de projetos ou empresa da área, símbolos específicos, que são denominados de usuais.

Além disso, na literatura técnica também aparecem símbolos diferentes, não havendo consenso sobre a representação dos elementos de instalações elétricas.

De todo modo, em geral, alguns símbolos são utilizados com mais frequência, tornando-se um padrão usual entre os profissionais da área.

2.4 Tabela de símbolos dos principais elementos

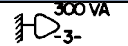

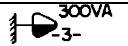

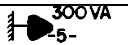



A partir da NBR 5444 e dos símbolos mais usuais empregados na área, não se pretendendo abarcar todo o universo de elementos de instalações elétricas ou de possibilidades de representação, são apresentadas a seguir, tabelas com os símbolos dos principais elementos de instalações elétricas.

A Tabela 1 apresenta a simbologia de pontos de alimentação, ou seja, de tomadas. Os pontos de iluminação são apresentados na Tabela 2 e os interruptores que os comandam, por exemplo, na Tabela 3.

A Tabela 4 apresenta a simbologia para os dutos (eletrodutos) e os condutores da instalação elétrica, enquanto a Tabela 5 apresenta os diferentes quadros a serem utilizados no projeto desta instalação.

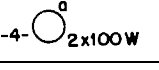

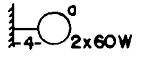


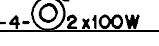
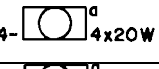
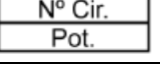

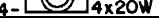
Por fim, a Tabela 6 apresenta elementos diversos, utilizados para representar os componentes do sistema de imagem (TV), dados (internet e telefone), segurança, dentre outros.

Tabela 1 – Simbologia para tomadas.

Tomadas		
Símbolos		Significado
NBR 5444	Usual	
		Tomada baixa na parede (a 30 cm do piso acabado)
		Tomada média na parede (a 130 cm do piso acabado)
		Tomada alta na parede (a 200 cm do piso acabado)
		Tomada no piso













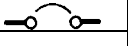





Fonte: Adaptado de (NBR 5444, 1989).

Tabela 2 – Simbologia para pontos de iluminação.

Pontos de iluminação		
Símbolos		Significado
NBR 5444	Usual	
		Ponto de luz incandescente no teto
		Ponto de luz incandescente na parede (arandela, altura de 1,80 m)
		Ponto de luz incandescente na parede (arandela, altura de 2,20 m)
		Ponto de luz incandescente embutido no teto
		Ponto de luz fluorescente no teto
		Ponto de luz fluorescente na parede (arandela)
		Ponto de luz fluorescente embutido no teto

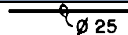
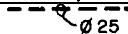
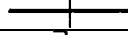
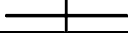


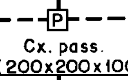
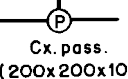
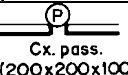
Fonte: Adaptado de (NBR 5444, 1989).

Tabela 3 – Simbologia para interruptores.

Interruptores			
Símbolos		Significado	
NBR 5444	Usual		
	S		Interruptor simples (1 seção)
	S ₂		Interruptor duplo (2 seções)
	S ₃		Interruptor triplo (3 seções)
	S _w		Interruptor paralelo (<i>Three-Way</i>)
	S _{4w}		Interruptor intermediário (<i>Four-Way</i>)
			Botão na parede (tipo campainha)
			Botão no piso
			Disjuntor a seco
			Disjuntor diferencial residual
			Supressor de surtos











Fonte: Adaptado de (NBR 5444, 1989).

Tabela 4 – Simbologia para dutos e condutores.

Dutos e condutores		Significado
Símbolos	NBR 5444	
		Eletroduto embutido no teto ou parede
		Eletroduto embutido no piso
		Condutor da fase no interior do eletroduto
		Condutor do neutro no interior do eletroduto
		Condutor do retorno no interior do eletroduto
		Condutor de proteção no interior do eletroduto (terra)
		Caixa de derivação ou passagem no piso
		Caixa de derivação ou passagem no teto
		Caixa de derivação ou passagem na parede


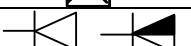

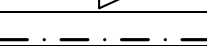
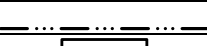



Fonte: Adaptado de (NBR 5444, 1989).

Tabela 5 – Simbologia para quadros.

Quadros		
Símbolos		Significado
NBR 5444	Usual	
		Quadro parcial (terminal) aparente na parede
		Quadro parcial (terminal) embutido na parede
		Quadro de distribuição (geral) aparente na parede
		Quadro de distribuição (geral) embutido na parede
		Quadro de comunicação (telefones)
		Quadro geral e de medição

Fonte: Adaptado de (NBR 5444, 1989).

Tabela 6 – Simbologia para comunicação e sinalização.

Comunicação, sinalização, etc.		Significado
Símbolos	Usual	
		Caixa de entrada de sinal de dados e imagem
		Ponto de telefone (altura de 30 cm ou 110 cm)
		Ponto de sinal de imagem (altura de 30 cm)
		Tubulação de sinal de imagem
		Tubulação de rede de alarme
		Quadro para central de alarme
		Ponto para comando de alarme
		Ponto para sensor de presença

Fonte: Adaptado de (NBR 5444, 1989).

3 Elementos de Instalações Elétricas

3.1 Introdução

A quantidade de elementos utilizados em instalações tem aumentado em virtude da evolução tecnológica e utilização com mais intensidade de automação residencial, por exemplo.

Assim, este documento tem por objetivo apresentar os principais elementos de uma instalação elétrica simples, para uso residencial ou comercial, isto é, aqueles que são comumente empregados na maioria dos projetos de instalações elétricas em baixa tensão e alimentação pelo sistema de distribuição secundária, conforme estudado anteriormente neste curso.

A seguir serão apresentados os principais elementos de instalações elétricas, e conforme o caso, seu funcionamento e circuitos elétricos correspondentes.

3.2 Elementos para iluminação

As lâmpadas elétricas são dispositivos de iluminação, que visam prover níveis confortáveis para os usuários nos diferentes ambientes que habitam. As lâmpadas também podem ser empregadas para finalidades diversas, como aquecimento, secagem, etc., sendo que estes usos fogem do escopo de um projeto de instalação elétrica simples e de uso residencial ou comercial.

Os interruptores são, em geral, os dispositivos empregados para o comando de lâmpadas elétricas; podendo se utilizar também sensores de presença ou outros dispositivos para esta finalidade.

A seguir serão apresentados alguns modelos de lâmpadas e interruptores, e a seguir, os principais circuitos elétricos utilizados em instalações elétricas simples.

3.3 Principais modelos de lâmpadas

A quantidade de modelos de lâmpadas disponíveis comercialmente é grande, se alterando conforme ocorrem evoluções tecnológicas ou normativas. A norma NBR 5444 expressa alguns símbolos especificamente para lâmpadas incandescentes, sendo que atualmente esta estão em desuso por questões tecnológicas e legais.

Os modelos mais comuns de lâmpadas são incandescentes, fluorescentes compactas, fluorescentes tubulares, luz mista, vapor de mercúrio e LED; tendo-se uma tendência ao uso mais intenso das lâmpadas com base na tecnologia LED em virtude de sua eficiência, durabilidade, flexibilidade de controle, dentre outras características.

Exemplos de lâmpadas são apresentados a seguir e mostrados nas Figura 2 e Figura 3:

- LED E27 – são lâmpadas utilizando diodos emissores de luz (LED) com os circuitos

de acionamento (reatores eletrônicos) incorporados, que possuem conexão ao circuito por meio de rosca Edison, especificadas como E27 (Edison 27);

- Tubular de LED – utilizam a tecnologia LED tendo dimensões maiores, na forma de tubos, para iluminação de ambientes de médias e grandes dimensões, necessitando de reator eletrônico externo;
- Dicroica convencional - são lâmpadas halógenas de baixa tensão de funcionamento, contendo internamente uma superfície refletora, servindo para filtrar a radiação infravermelha da parte traseira da lâmpada; utilizadas para finalidades decorativas ou em vitrines e expositores de produtos, por exemplo;
- Dicroica LED – é uma lâmpada que utiliza a tecnologia LED (não-halogênica), substituindo as lâmpadas dicroicas convencionais;
- LED de embutir – são lâmpadas com tecnologia LED para embutir em móveis, tetos ou outras superfícies, com finalidades de iluminação, decorativas ou funcionais, com controle de temperatura e/ou brilho, por exemplo;
- Vintage de LED – são modelos diferenciados, com características estéticas relevantes, utilizadas para diferentes finalidades e usabilidades, principalmente para destacar ambientes ou elementos.



LED E27

Dicroica LED

Embutir LED

Figura 2 – Modelos de lâmpadas comerciais.

Fonte: <https://saveenergylife.com.br>. Acesso em 25/05/2021.



LED tubular

Vintage LED

Figura 3 – Modelos de lâmpadas comerciais.

Fonte: <https://saveenergylife.com.br>. Acesso em 25/05/2021.

3.4 Principais modelos de interruptores

Interruptores são dispositivos eletromecânicos para comando de lâmpadas elétricas. Assim, estes elementos permitem que o usuário ligue e desligue o elemento de iluminação correspondente. Em geral, os interruptores são instalados em alturas que variam de 1,10 m até 1,30 m do piso acabado.

Os principais tipos de interruptores são apresentados a seguir e mostrados nas Figura 4 e Figura 5:

- Interruptor simples – possui uma seção apenas, utilizado para ligar e desligar elementos de iluminação isolados ou agrupados em um circuito apenas;
- Interruptor duplo – possui duas seções, podendo comandar de um mesmo local dois elementos de iluminação isolados ou agrupados em dois circuitos distintos;
- Interruptor triplo – possui três seções, podendo comandar de um mesmo local três elementos de iluminação isolados ou agrupados em três circuitos distintos;
- Interruptor paralelo – também conhecido por *Three-Way* (três vias), é utilizado para comandar elementos de iluminação de dois locais distintos, comumente em duas portas do ambiente ou na porta e cabeceira da cama nos quartos de dormir, por exemplo;
- Interruptor intermediário – também conhecido por *Four-Way* (quatro vias) ou interruptor cruz, é utilizado em conjunto com dois interruptores paralelos, para comandar os elementos de iluminação de três ou mais locais, comum em corredores longos, por exemplo em hotéis;
- Pulsador – também chamado de botão de campainha, é um interruptor de pressão, que permanece aberto na posição de repouso e fecha o circuito quando pressionado, sendo utilizado para acionar elementos de sinalização, como campainhas, por exemplo.

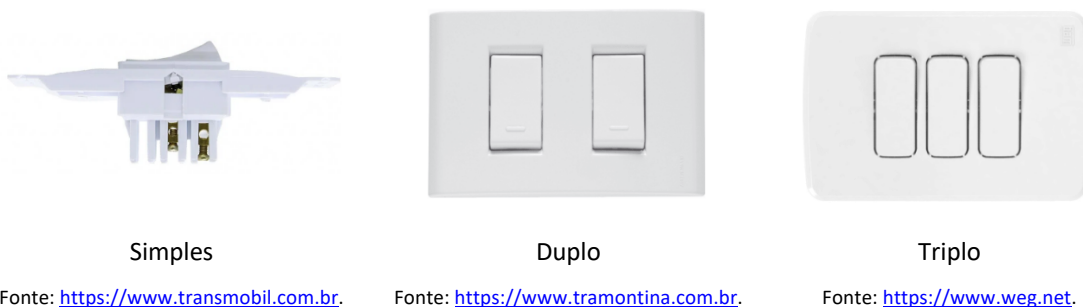


Figura 4 – Modelos de interruptores comerciais.

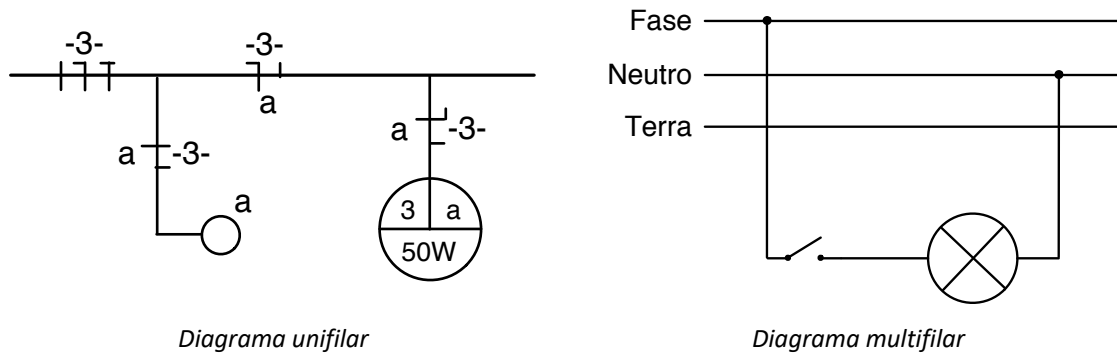


Figura 6 – Circuito de comando de lâmpada com interruptor simples.

3.5.1 Interruptor duplo comandando lâmpadas

A Figura 7 mostra os diagramas unifilar e multifilar do circuito de comando de duas lâmpadas no teto, a partir de um interruptor duplo, onde o circuito e a seção destes elementos são identificados com o número 3 e as letras a e b. Nota-se que neste caso, os elementos estão no mesmo circuito (número 3), mas cada lâmpada em uma seção correspondente (a, b).

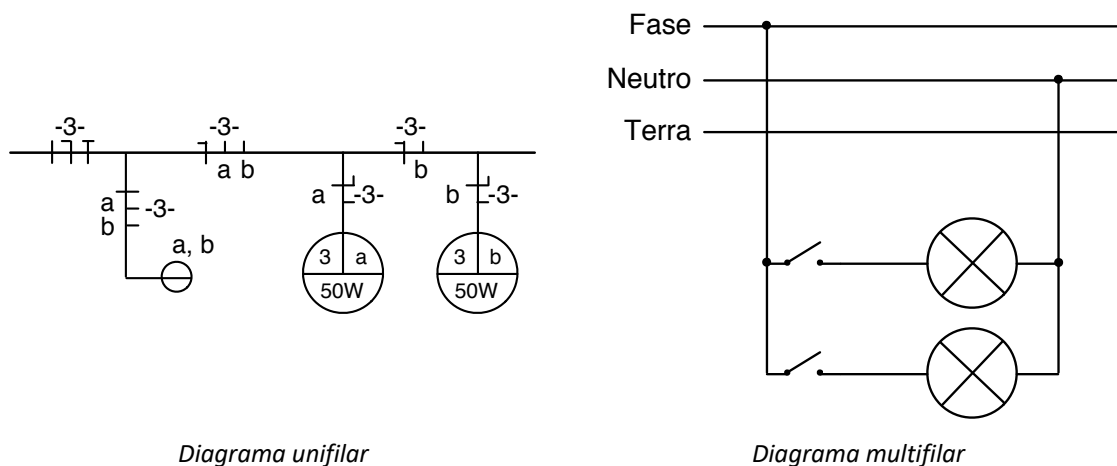


Figura 7 – Circuito de comando de lâmpadas com interruptor duplo.

3.5.1 Interruptores paralelos comandando lâmpadas

A Figura 8 mostra os diagramas unifilar e multifilar do circuito de comando de uma lâmpada no teto, a partir de dois interruptores paralelos, sendo possível então, ligar e desligar a lâmpada de dois locais diferentes.

Os diagramas unifilares mostrados aqui são genéricos, isto é, não mostram a posição dos elementos sobre a planta baixa da edificação, como será feito quando da realização do projeto elétrico da instalação.

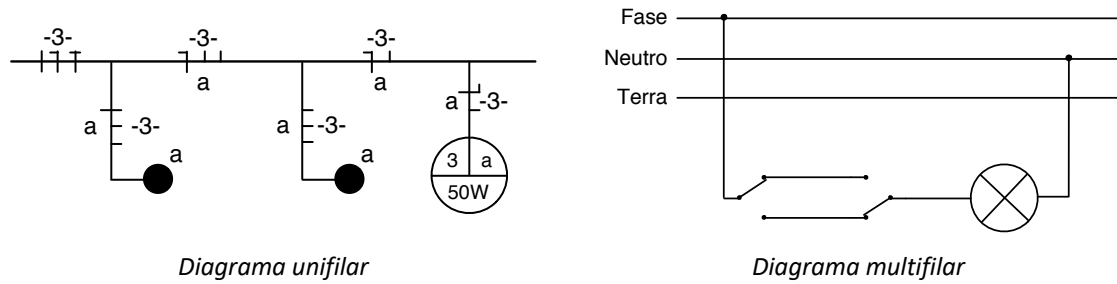


Diagrama unifilar

Diagrama multifilar

Figura 8 – Circuito de comando de lâmpada com interruptores paralelos.

3.5.1 Interruptores paralelos e intermediário comandando lâmpadas

A Figura 9 mostra os diagramas unifilar e multifilar do circuito de comando de uma lâmpada no teto, a partir de dois interruptores paralelos e um intermediário, sendo possível então, ligar e desligar a lâmpada de três locais diferentes.

O número de locais de comando do elemento de iluminação pode ser definido em função do número de interruptores intermediários utilizados, começando em três (dois paralelos e um intermediário) e indo até o quantitativo desejado, sempre utilizando dois interruptores paralelos adicionados ao número de interruptores intermediários necessários para cada caso. A Figura 10 mostra os diagramas multifilar e funcional de um circuito com dois interruptores paralelos e dois interruptores intermediários, resultando em quatro locais distintos para comando da lâmpada.

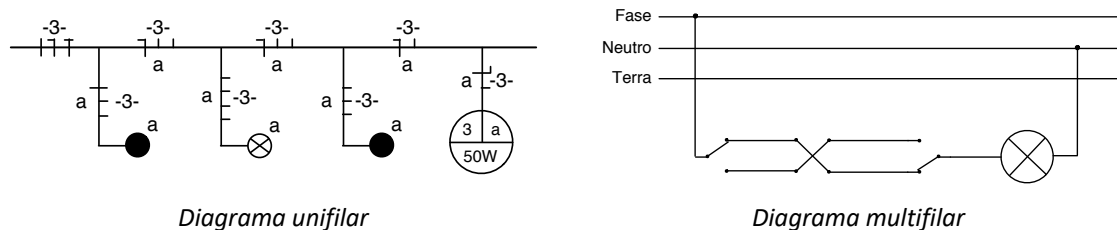


Diagrama unifilar

Diagrama multifilar

Figura 9 – Circuito de comando de lâmpada com interruptores paralelos e intermediário.

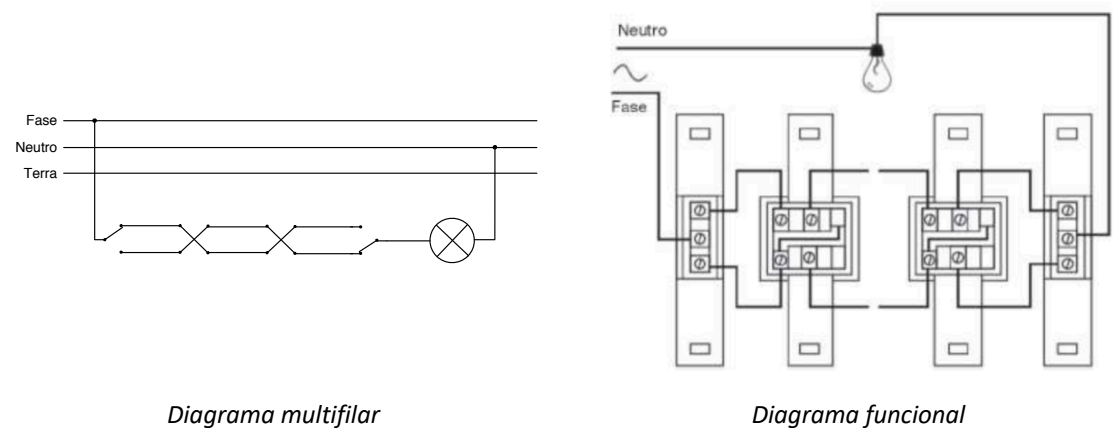


Diagrama multifilar

Diagrama funcional

Figura 10 – Circuito de comando de lâmpada com interruptores paralelos e intermediário.

Fonte: Fonte: (Pial-Legrand apud Creder, 2002).

4 Elementos de Conexão (Tomadas)

4.1 Introdução

O capítulo anterior deste curso abordou o sistema de distribuição de energia elétrica, culminando na entrega da mesma ao consumidor.

A partir da entrada de energia elétrica no imóvel ou edificação, após o sistema de medição, tem os diferentes elementos que disponibilizam esta energia aos equipamentos (consumidores finais). Os dispositivos mais comuns para se disponibilizar a energia elétrica aos equipamentos são as tomadas, que em conjunto com os plugues, permitem a conexão dos equipamentos à rede de energia elétrica.

A NBR 5410 define de pontos de utilização os pontos de uma linha elétrica destinados à conexão de equipamento de utilização; que podem ser classificados entre outros critérios, de acordo com a tensão da linha elétrica, a natureza da carga prevista (ponto de luz, ponto para aquecedor, ponto para aparelho de ar-condicionado, etc.) e o tipo de conexão previsto (ponto de tomada, ponto de ligação direta).

A seguir serão apresentados os principais modelos de tomadas e a seguir os diagramas unifilar e multifilar de seus circuitos elétricos.

4.2 Principais modelos de tomadas

As tomadas e plugues são regulamentadas no Brasil pela NBR 14136 de 2012, que definiu o novo padrão a ser utilizado nacionalmente.

Em termos de tomadas para uso comum, isto é, residencial, comercial e industrial, para conexão de equipamentos monofásicos, se tem dois tipos:

- Tomada de uso geral (TUG) – são tomadas para correntes até 10 A, com orifício de encaixe do plugue com dimensão de 4 mm;
- Tomada de uso específico (TUE) – são tomadas para correntes até 20 A, com orifício de encaixe do plugue com dimensão de 4,8 mm.

A partir da diferenciação na dimensão dos orifícios de encaixa dos pontos de conexão dos plugues, pretende-se evitar que um equipamento de potência maior (uso específico) seja conectado incorretamente em uma tomada de uso geral.

As tomadas de uso geral (TUG) se destinam à conexão de equipamentos eletroeletrônicos convencionais de baixa potência, tais como: rádios, televisores, ventiladores, fontes de alimentação de computadores, telefones celulares, dentre outros.

Por outro lado, as tomadas de uso específico (TUE) se destinam à conexão de equipamentos específicos e de maior potência, tais como: chuveiros, torneiras elétricas, fornos elétricos, ferros de passar roupa, dentre outros.

Os principais tipos de tomadas são mostradas na Figura 11, mostrando-se exemplos de tomadas de uso geral, específico e de embutir.



Tomada de uso geral

Fonte: <https://www.transmobil.com.br>.



Tomada de uso específico

Fonte: <https://www.tramontina.com.br>.



Tomada para painel (embutir)

Fonte: <https://www.weg.net>.

Figura 11 – Modelos de tomadas comerciais.

4.1 Principais circuitos para tomadas

A seguir serão apresentados os principais circuitos de tomadas de uso geral e específico, mostrando-se os diagramas unifilar e multifilar e destacando-se os detalhes da simbologia dos dispositivos, quando for o caso.

A Figura 12 mostra os diagramas unifilar e multifilar de tomada tripolar (fase, neutro e terra) do circuito 5, montada a 30 cm do piso acabado, com potência de 100 VA. Destaca-se que se a potência for de 100 VA não precisa ser indicada junto ao elemento.

Por sua vez, a Figura 13 mostra os diagramas unifilar e multifilar de tomada tripolar (fase, neutro e terra) do circuito 3, montada a 130 cm do piso acabado, com potência de 300 VA.

Importante ressaltar que pelo padrão de tomadas e pluges regulamentadas pela NBR 14136 se terá potências de até 2200 VA em 220 V, para tomadas de uso geral (TUG) e 4400 VA para tomadas de uso específico (TUE). Nestes casos, seguindo-se a NBR 5444 (cancelada), seria necessário especificar a potência sempre ao lado de todas as tomadas do projeto. Assim, é comum na área de projetos, se especificar símbolos específicos para as tomadas de conexão de equipamentos bem definidos, como chuveiros, motobombas, cozinha, etc., sabendo-se que sua corrente será de 20 A.

A sequência correta para a conexão dos condutores fase, neutro e terra (proteção) nas tomadas tripolares é definido na NBR 14136, conforme mostrado na Figura 14.

As tomadas para conexão de elementos de sinalização, segurança e dados, por exemplo, são especificadas no projeto com simbologia própria, visando sua diferenciação e facilidade de identificação em relação às tomadas de uso geral e específico.

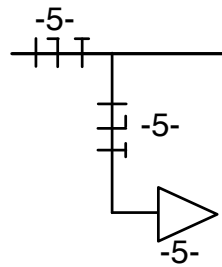


Diagrama unifilar

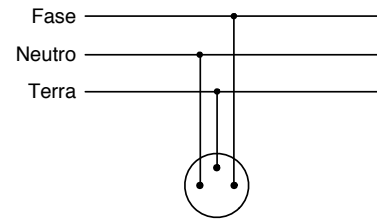


Diagrama multifilar

Figura 12 – Circuito de tomada de uso geral a 30 cm do piso.

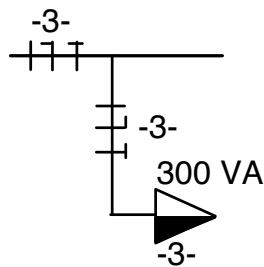


Diagrama unifilar

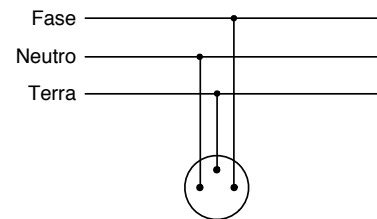


Diagrama multifilar

Figura 13 – Circuito de tomada de uso geral a 30 cm do piso.

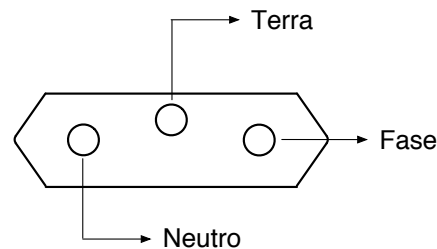


Figura 14 – Sequência de conexões nas tomadas tripolares, conforme a NBR 14136.

5 Elementos de Proteção

5.1 Introdução

Os elementos de proteção tem a finalidade de proteger o usuário e o próprio sistema de energia elétrica contra diferentes faltas (falhas), como curto-circuitos, descargas atmosféricas, correntes de fuga, dentre outras.

A seguir serão apresentados os principais elementos de proteção utilizados em instalações elétricas de baixa tensão.

5.2 Disjuntores termomagnéticos

Os disjuntores termomagnéticos são dispositivos de manobra (mecânicos) e de proteção,

capazes de estabelecer, conduzir e interromper correntes em condições normais do circuito, assim como estabelecer, conduzir por tempo especificado e interromper correntes em condições anormais especificadas do circuito, tais como as de curto-circuito (Adaptado de Cotrim, 2003)¹.

Os disjuntores são normalmente usados para proteção e manobra de circuitos de distribuição e terminais, montados em quadros de distribuição padronizados. Neste caso, são montados em caixas moldadas e podem ser unipolares, bipolares e tripolares, geralmente com acionamento manual e, se forem equipados com disparadores térmicos e eletromagnéticos, serão chamados de disjuntores termomagnéticos.

A Figura 15 mostra exemplos de disjuntores termomagnéticos comerciais, apresentando três modelos: disjuntor de 1 polo (monofásico ou unipolar); disjuntor de 2 pólos (bifásico ou bipolar); e disjuntor de 3 pólos (trifásico ou tripolar).



Disjuntor unipolar

Fonte: <https://www.se.com/br/pt>.

Disjuntor bipolar

Fonte: <https://www.tramontina.com.br>.

Disjuntor tripolar

Fonte: <https://www.tramontina.com.br>.

Figura 15 – Modelos de disjuntores termomagnéticos comerciais.

As principais partes de um disjuntor termomagnético são listadas a seguir e mostradas na Figura 16:

- Parte externa, termoplástica – corpo do dispositivo com a finalidade de acondicionar os seus diversos elementos;
- Terminal superior – terminal para conexão ao circuito;
- Câmara de extinção de arco – parte responsável pela extinção do arco elétrico gerado durante a abertura de cargas indutivas, por exemplo;
- Bobina responsável pelo disparo instantâneo (magnético) – dispositivo eletromagnético para geração de força proporcional à intensidade da corrente elétrica que circula pelo disjuntor, provocando a atuação do mesmo;
- Alavanca liga-desliga – elemento de acionamento pelo usuário para ligar e

¹ Instalações Elétricas. Ademaro A. M. B. Cotrim. Pearson Prentice Hall, 4ª Edição, 2003.

desligar o disjuntor;

- Contato fixo – parte condutora fixa que permite o fechamento do circuito ao ocorrer o contato mecânico com a parte móvel;
- Contato móvel – parte condutora móvel que permite o fechamento do circuito ao ocorrer o contato mecânico com a parte fixa;
- Guia para o arco - sob condições de falta, o contato móvel se afasta do contato fixo e o arco resultante é guiado para a câmara de extinção, evitando danos no bimetal, em caso de altas correntes (curto-circuito);
- Bimetal responsável pelo disparo por sobrecarga (térmico) – elemento constituído por dois metais diferentes e que irá se flexionar conforme a intensidade da corrente que percorre o disjuntor, provocando a abertura dos contatos ao se ultrapassar a corrente nominal;
- Terminal inferior – terminal para conexão ao circuito;
- Clip para fixação do trilho DIN – encaixe para montagem em suportes específicos em quadros de distribuição.

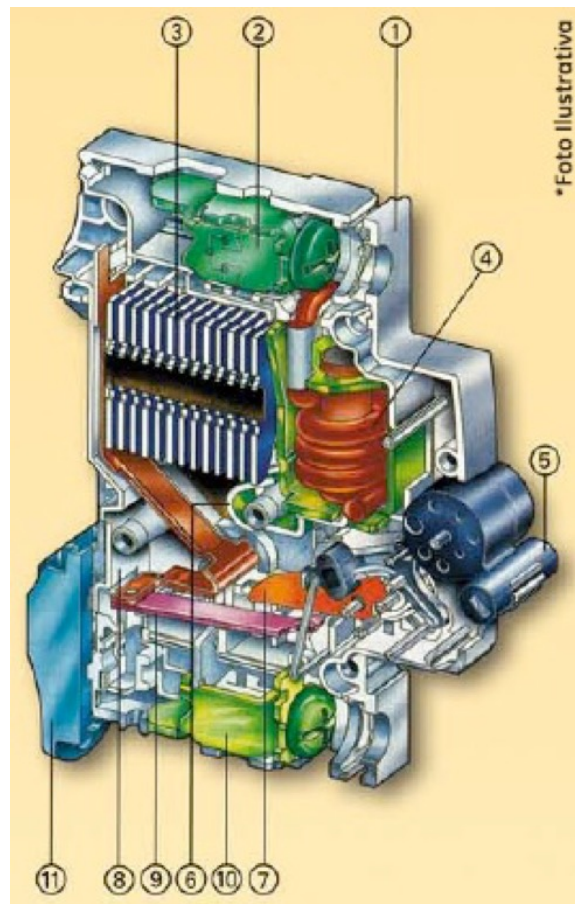


Figura 16 – Figura ilustrativa do interior de um disjuntor.

Fonte: www.qeindustrial.com.br. Acesso em 19/09/2006.

Os disjuntores termomagnéticos possuem dois níveis de proteção, que são:

- Contra sobrecorrentes pequenas e moderadas (geralmente correntes de sobrecarga), através de disparadores eletromagnéticos ou térmicos;
- Contra sobrecorrentes elevadas (geralmente correntes de curto-circuito), através de disparadores eletromagnéticos.

A Figura 17 mostra-se o princípio de funcionamento de um disparador eletromagnético. A corrente circulando pela bobina magnetizante cria um fluxo magnético no núcleo fixo proporcional a esta corrente. Acima de determinada corrente, previamente especificada, a força de atração entre o núcleo fixo e o núcleo móvel será suficiente para vencer a inércia mecânica do conjunto, devido à mola, e provocará a abertura dos contatos principais do disjuntor. Quando ocorrem sobrecorrentes altas, normalmente devido a curto-circuitos no circuito, o disjuntor desligará o circuito instantaneamente pela atuação do elemento eletromagnético. Se as sobrecorrentes forem baixas, este elemento não fará o disjuntor desarmar, mesmo que a sobrecorrente dure um tempo grande.

O princípio de funcionamento do disparador térmico é mostrado na Figura 18. Este dispositivo opera baseado no princípio dos pares (bimetálico) termoelétricos, isto é, nas diferentes dilatações que apresentam os metais quando submetidos a uma variação de temperatura (Cotrim, 2003).

A corrente pode circular diretamente pela lâmina bimetálica provocando o aquecimento da mesma, ou através de um elemento resistivo (com baixa resistência) que irá aquecer, provocando então o aquecimento do par bimetálico. Para correntes inferiores ou iguais a corrente nominal do disjuntor, este não deverá desarmar. Já para correntes acima da nominal, o calor provocado pela circulação da corrente elétrica fará a lâmina bimetálica se curvar, mais rapidamente quanto maior for a corrente, até provocar a atuação do disjuntor, desligando o circuito.

É interessante notar que o tempo de permanência da sobrecorrente é determinante para a atuação do elemento térmico, por isso, para pequenas sobrecorrentes, o tempo para o disjuntor desarmar pode ser da ordem de minutos.

A curva típica de tempo versus corrente de disjuntores termomagnéticos é mostrada na Figura 19. A corrente normalizada em função da corrente nominal do disjuntor é colocada no eixo horizontal (x), enquanto o tempo de atuação é marcado no eixo vertical (y). Desta forma, para cada sobrecorrente que circula pelo disjuntor se tem um tempo de atuação correspondente. Traçando o gráfico do tempo de atuação versus a corrente devem-se encontrar curvas que estejam dentro dos limites fornecidos pelo fabricante. Pode-se, assim, determinar se o disjuntor está operando

adequadamente ou não. Nota-se pela Figura 19 que a partir de correntes cinco vezes maiores que a nominal ($I = 5 \cdot I_n$) o que o disjuntor começará a desarmar por atuação do elemento magnético, sendo que abaixo deste valor a atuação será pelo elemento térmico.

A região entre as duas curvas é de transição, isto é, determinado disjuntor poderá atuar pela ação do disparador bimetálico, enquanto outro poderá atuar pelo disparador eletromagnético.

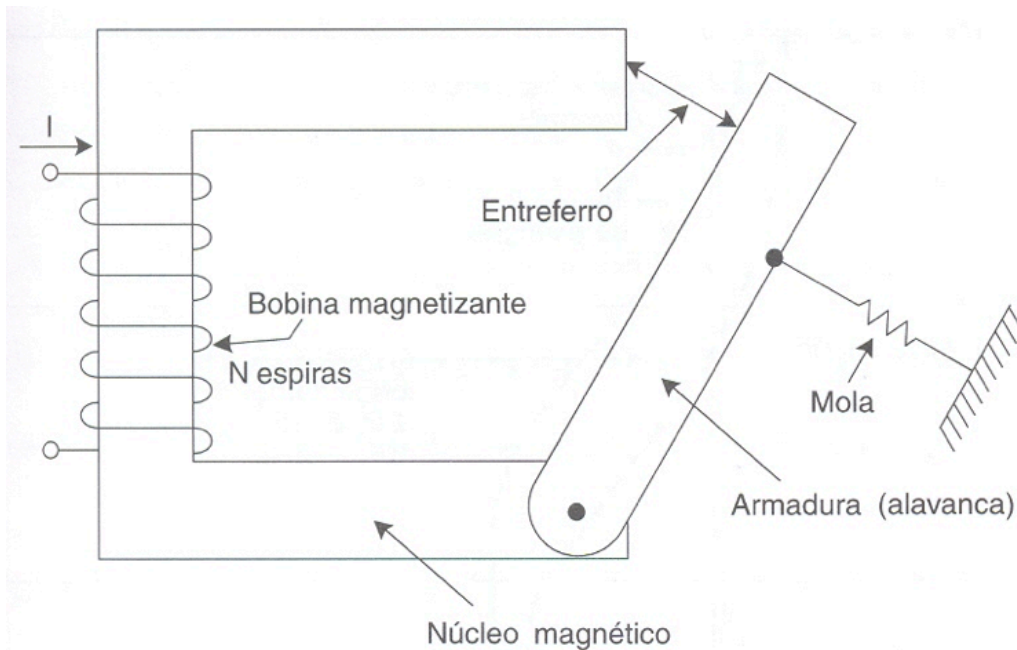


Figura 17 – Princípio de funcionamento do disparador eletromagnético.

Fonte: (Cotrim, 2003).

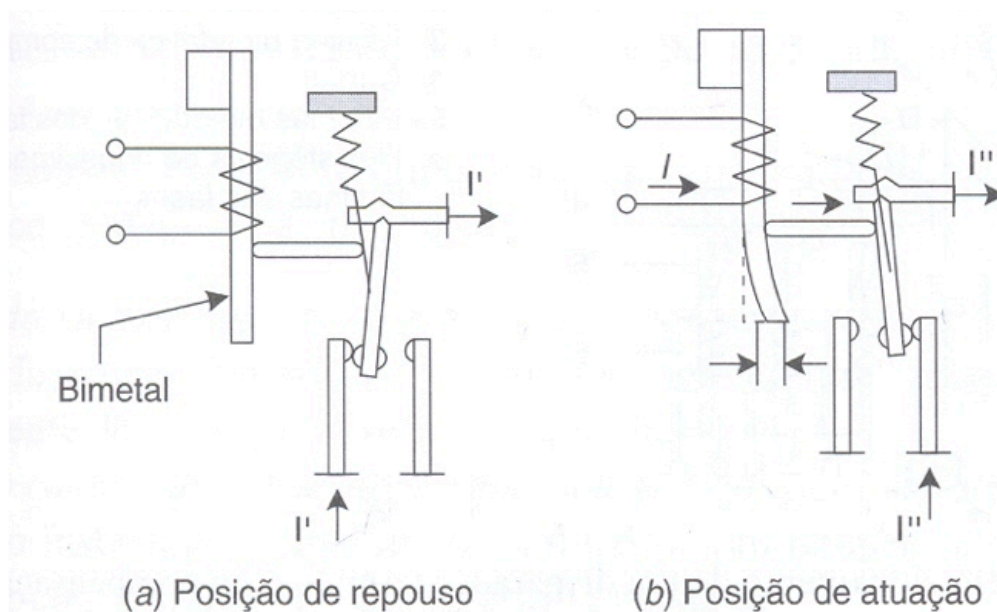


Figura 18 – Princípio de funcionamento do disparador bimetálico.

Fonte: (Cotrim, 2003).

A partir níveis de proteção se tem disjuntores de diferentes curvas de atuação, implicando na escolha mais adequada conforme o projeto e a coordenação da proteção do mesmo.

As principais curvas de resposta de disjuntores termomagnéticos são:

- Curva D ou k - atuam para correntes entre 10 e 14 vezes acima da nominal (I/I_n);
- Curva C – atuam para correntes entre 5 e 10 vezes acima da nominal (I/I_n);
- Curva D - atuam para correntes entre 3 e 5 vezes acima da nominal (I/I_n);
- Curva Z - atuam para correntes entre 2 e 3 vezes acima da nominal (I/I_n).

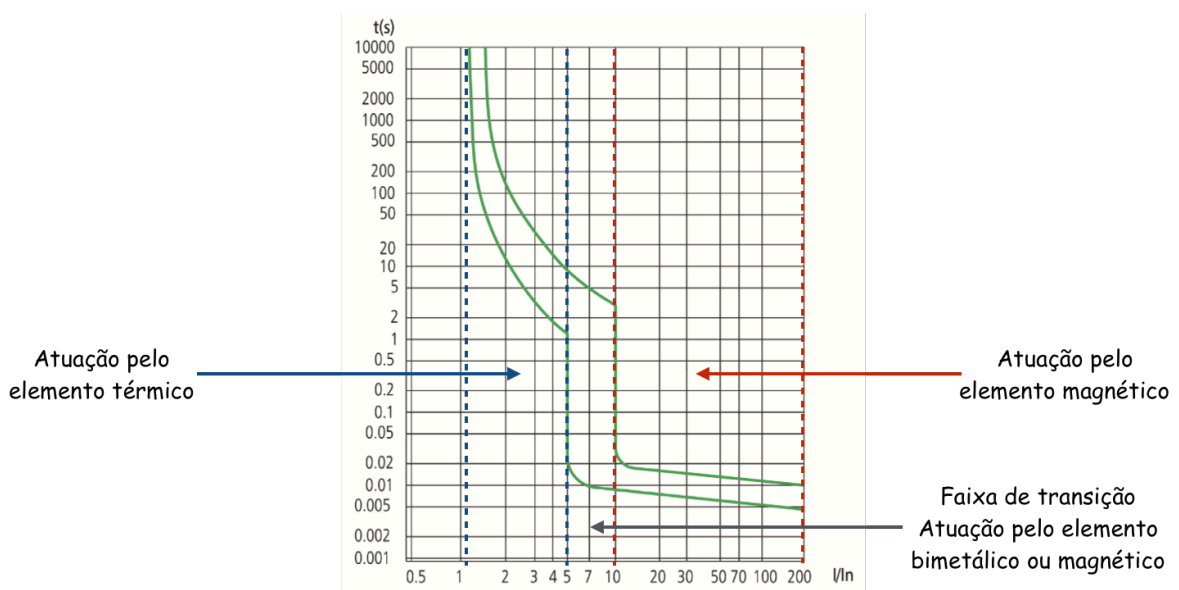


Figura 19 – Curva típica (C) de atuação do disjuntor termomagnético.

Fonte: <https://www.tramontina.com.br>. Acesso em 25/05/2021.

5.3 Disjuntores diferenciais-residuais

Os disjuntores diferenciais-residuais (DR) tem a finalidade de detectar fugas de corrente em circuitos elétricos, desligando o circuito imediatamente; atuando na ocorrência de choques elétricos ou falha no isolamento do equipamento ou instalação.

Estes disjuntores são formados pelos seguintes elementos (Cotrim, 2003), conforme mostrado na Figura 20:

- Contatos fixos e contatos móveis – responsáveis pelo contato mecânico e conexão elétrica entre si, fechando e abrindo o circuito conforme o estado de operação do dispositivo;
- Transformador diferencial – dispositivo eletromagnético que tem a finalidade de gerar uma corrente induzida sempre que ocorrerem correntes diferentes entre os condutores que estiverem conectados no disjuntor, fazendo o acionamento do disparador para abertura do elemento de proteção;

- Disparador diferencial (relé polarizado) – elemento eletromecânico, que fará a abertura do disjuntor quando ocorrer uma falta no circuito, detectada pelo transformador diferencial.

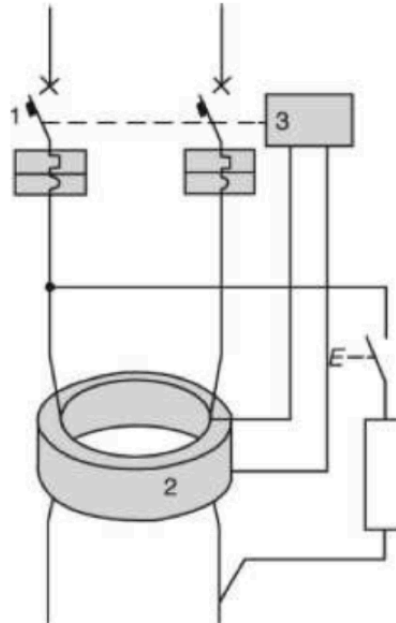


Figura 20 – Elementos de um disjuntor diferencial-residual (DR).

Fonte: (Creder, 2002).

A Figura 21 mostra o disjuntor diferencial-residual em funcionamento com um circuito operando normalmente, isto é, sem ocorrência de faltas à terra (corrente de fuga para a terra). Neste caso as correntes I_1 e I_2 iguais, fazendo com que o fluxo gerado no transformador diferencial seja nulo. Assim, o disparador diferencial fica inativado, e o disjuntor diferencial-residual está fechado.

Ao ocorrer alguma falta à terra, como mostrado na Figura 21, as correntes I_1 e I_2 serão diferentes entre si. Assim, em virtude das correntes serem diferentes, se terá um fluxo diferente de zero no transformador diferencial, ocasionando uma corrente diferencial-residual (I_{DR}), que se suficiente, irá provocar o acionamento do disparador diferencial, a abertura do disjuntor e o desligamento do circuito.

A corrente que provoca o desligamento do disjuntor, quando para proteção de seres humanos, é menor do que 30 mA. Já em indústrias, é comum o uso de disjuntores diferenciais-residuais com correntes da ordem de 300 mA.

É importante destacar que existem interruptores residuais-diferenciais (IDR), que atuam unicamente quando ocorrem correntes de falta à terra, mas não protegendo o circuito contra curto-

circuitos, por exemplo. Assim, os disjuntores diferenciais-residuais acumulam a função de disjuntor termomagnético e de interruptor diferencial-residual, protegendo o circuito e os usuários em ambas as situações.

Em acordo com a norma NBR 5410, os disjuntores diferenciais-residuais devem ser utilizados nos seguintes casos:

- Em circuitos que sirvam a pontos de utilização situados em locais contendo banheira ou chuveiro;
- Para circuitos que alimentem tomadas de corrente situadas em áreas externas à edificação;
- Em circuitos de tomadas de corrente situadas em áreas internas que possam vir a alimentar equipamentos no exterior;
- Em circuitos que, em locais de habitação, sirvam a pontos de utilização situados em cozinhas, copas-cozinhas, lavanderias, áreas de serviço, garagens e demais dependências internas molhadas em uso normal ou sujeitas a lavagens;
- Em circuitos que, em edificações não-residenciais, sirvam a pontos de tomada situados em cozinhas, copas-cozinhas, lavanderias, áreas de serviço, garagens e, no geral, em áreas internas molhadas em uso normal ou sujeitas a lavagens.

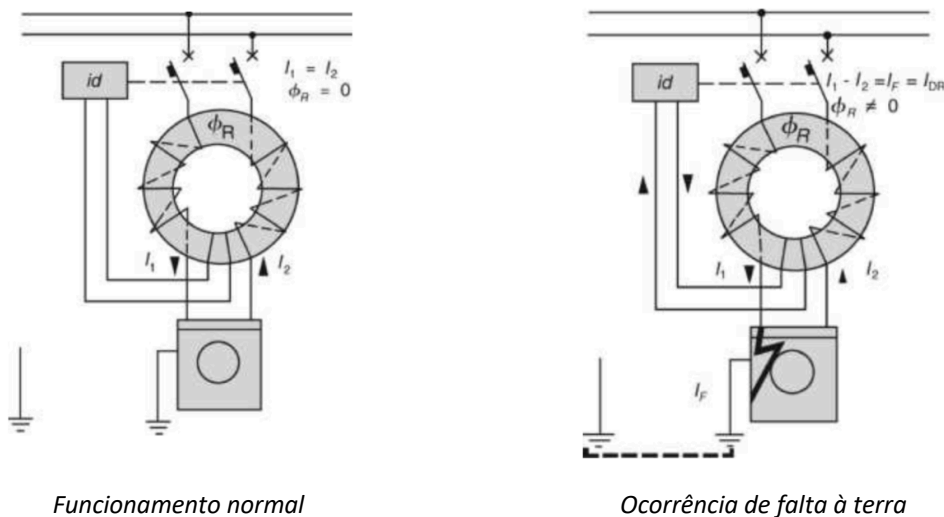


Figura 21 – Princípio de funcionamento do disjuntor diferencial-residual (DR).

Fonte: (Creder, 2002).

A Figura 22 mostra exemplos de disjuntores diferenciais-residuais comerciais, apresentando três modelos: disjuntor de 2 polos (bipolar); disjuntor de 3 polos (tripolar); e disjuntor de 4 polos (tetrapolar ou quadripolar).



Disjuntor bipolar

Fonte: <https://www.steck.com.br>.

Disjuntor tripolar

Fonte: <https://www.se.com/br/pt>.

Disjuntor tetrapolar

Fonte: <https://new.siemens.com/br>.*Figura 22 – Modelos de disjuntores diferenciais-residuais comerciais.*

5.4 Dispositivos supressores de surtos

Os dispositivos supressores de surtos (DPS) tem a finalidade de detectar tensões e correntes provenientes de surtos elétricos ou transitórias, desviando as mesmas para a terra, impedindo que cheguem até os aparelhos eletroeletrônicos ligados a rede elétrica.

Os supressores de surtos podem ser para-raios de resistência não-linear (varistor) ou por para-raios de expansão. Estes dispositivos são classificados como:

- Classe I: dispositivos com capacidade para drenagem de correntes parciais de um raio, para áreas urbanas periféricas e rurais, que ficam expostas a descargas atmosféricas diretas;
- Classe II: dispositivos que drenam correntes induzidas, em edificações, com efeitos indiretos de descarga atmosférica;
- Classe III: dispositivos instalados próximos a equipamentos ligados à rede elétrica, de dados ou telefônica, para proteção específica (fina).

O funcionamento dos dispositivos de supressão de surtos se dá em função da tensão aplicada em seus terminais, que ao ultrapassar determinado valor pré-definido, provocará o rompimento de sua isolação (no caso de para-raios) ou a diminuição de sua resistência (no caso de varistores), oferecendo um caminho de baixa impedância para as correntes de falta até a terra. Assim, o dispositivo tem alta impedância em condições normais, não circulando corrente pelo mesmo, e baixa impedância quando ocorrem surtos de alta tensão na rede de energia elétrica, fechando o caminho da rede de alimentação para a terra, para desviar estas correntes decorrentes das descargas atmosféricas, por exemplo.

Em equipamentos eletrônicos, que utilizam fontes chaveadas, por exemplo, os dispositivos de proteção contra surtos podem ser coordenados conjuntamente com fusíveis ou outros elementos de proteção, para que, quando atuarem, provoquem a abertura deste outro

dispositivo de proteção, desligando o equipamento da rede de energia elétrica.

A Figura 23 mostra exemplos de dispositivos supressores de surtos, apresentando três modelos: DPS de 1 polo (unipolar); DPS de 2 polos (bipolar); DPS de 3 polos (tripolar); e DPS de 4 polos (tetrapolar ou quadripolar).



DPS unipolar

Fonte: <https://www.clamper.com.br>.



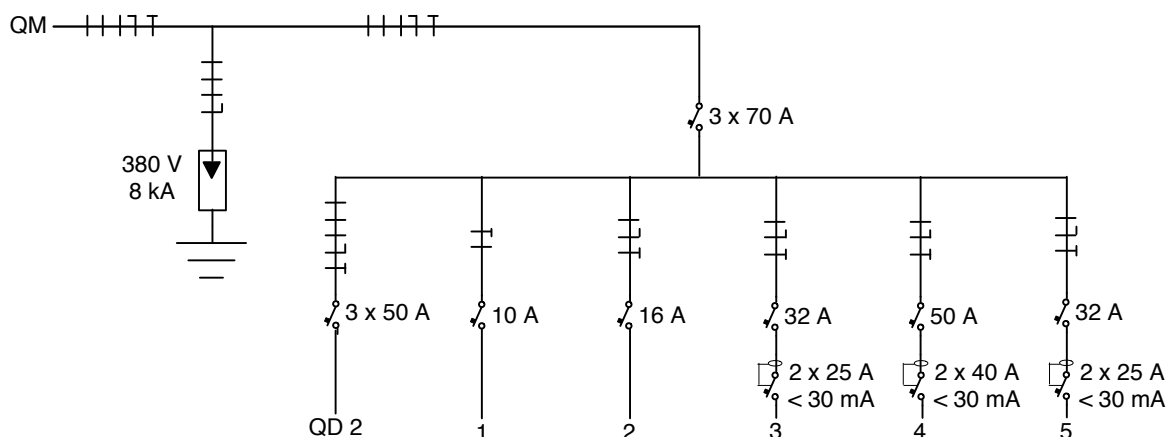
DPS bipolar, tripolar e tetrapolar

Fonte: <https://www.soprano.com.br>.

Figura 23 – Modelos de dispositivos supressores de surtos comerciais.

5.1 Exemplo de circuito de proteção

A Figura 24 mostra um exemplo de quadro de distribuição, com dos diferentes dispositivos de proteção, dentre eles disjuntores termomagnéticos, disjuntores diferenciais-residuais e dispositivos supressores de surtos. Este exemplo hipotético, mostra que cada circuito individual da instalação terá os elementos de proteção conforme sua finalidade bem específica, como ocorre, por exemplo, com as tomadas de uso específico (TUE).



- QM - Quadro de medição
- QD 2 - Quadro de distribuição 2
- 1 - Circuito de iluminação
- 2 - Tomadas de uso geral (TUG)
- 3 - Tomada de uso específico (TUE), cozinha
- 4 - Tomada de uso específico (TUE), chuveiro
- 5 - Tomada de uso específico (TUE), banheiro

Figura 24 – Exemplo hipotético de quadro de distribuição residencial.

6 Condutores Elétricos

6.1 Introdução

Os condutores são os elementos que permitem fazer a conexão entre os diversos componentes e dispositivos de um circuito elétrico, sendo os responsáveis pela condução da corrente elétrica desde a rede de distribuição de energia elétrica até os consumidores finais.

A seguir serão apresentados os principais condutores utilizados em instalações elétricas de baixa tensão.

6.2 Exemplos de condutores elétricos

Os condutores elétricos utilizados em circuitos de baixa tensão podem ser classificados quanto:

- Material condutor:
 - Cobre;
 - Alumínio.
- Rigidez mecânica:
 - Rígidos;
 - Flexíveis.
- Material isolante:
 - Nus (sem isolamento) - usados para malhas de aterramento.
 - PVC (policloreto de vinila) - isolação termoplástica que suporta temperaturas até 70 °C;
 - XLPE (polietileno articulado) - borracha termofixa, mais flexíveis e suportam até 90 °C;
 - EPR (etileno polipropileno) - borracha termofixa, mais flexíveis e suportam até 90 °C;
 - EVA (etileno vinil acetado) - livres de halogênios, emitem menos fumaça e não emitem gases tóxicos;
 - LSHF/A (composto poliolefínico termoplástico não halogenado) - livres de halogênios, emitem menos fumaça e não emitem gases tóxicos.

Os condutores isolados com PVC tem tensões de isolamento até 750 V, seções de 1,5 mm² até 240 mm² e são empregados em redes de distribuição de energia de casas, prédios residenciais,

comerciais, industriais, ligações de painéis e motores elétricos, por exemplo. As cores para seções de 1,5 mm² até 6 mm² normalmente são: amarelo, azul, branco, cinza, preto, verde, vermelho, verde-amarelo, azul escuro, laranja, lilás, marrom (Fonte: <http://www.corfio.com.br>. Acesso em 25/05/2021.). Já para seções de 10 mm² até 240 mm² podem ser nas cores preto, azul, branco, vermelho e verde.

Importante destacar que as cores dos condutores para instalações elétricas de baixa tensão são:

- Conductor fase – vermelho;
- Conductor neutro – azul;
- Conductor de proteção (terra) – verde e amarelo;
- Conductor de retorno – preto.

Os condutores com isolação extrudada de borracha etilenopropileno (EPR, HEPR ou EPR 105) podem ser para tensões de 1 kV a 35 kV, utilizados para instalações em prédios residenciais, comerciais, industriais e subestações, onde exigem-se maiores proteções mecânicas do material isolante, incluindo boa resistência a ambientes úmidos (Fonte: <http://www.corfio.com.br>. Acesso em 25/05/2021.).

Os condutores livres de halogênios, de EVA ou LSHF/A, não propagam a chama e tem baixa emissão de fumaça e gases tóxicos, sendo empregados em redes de distribuição de energia de casas, prédios residenciais, comerciais, industriais, ligações de painéis e motores elétricos, em especial em locais com alta densidade de ocupação de pessoas e condições de fuga difíceis (teatros, cinemas, hospitais, escolas, shoppings, etc.). Podem ter seções de 1,5 mm² até 300 mm². (Fonte: <http://www.corfio.com.br>. Acesso em 25/05/2021.).

Exemplos dos principais condutores utilizados em instalações elétricas são mostrados nas Figura 25 até Figura 28, conforme suas características apresentadas anteriormente.

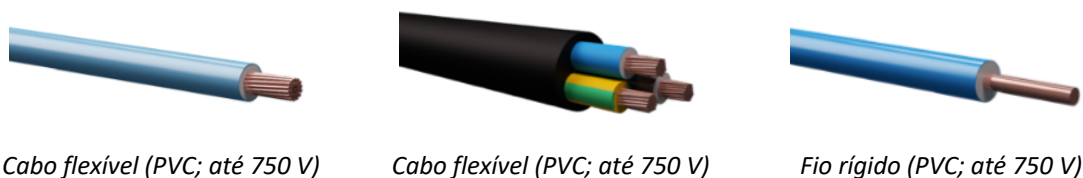
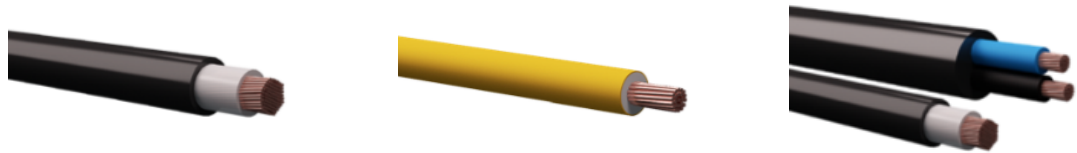


Figura 25 – Exemplos de condutores comerciais.

Fonte: <http://www.corfio.com.br>. Acesso em 25/05/2021.



*Cabo flexível (EPR, HEPR ou EPR
105; até 35 kV)*

Cabo flexível (LSHF/A; até 1 kV)

Cabo flexível (HEPR; até 1 kV)

Figura 26 – Exemplos de condutores comerciais.

Fonte: <http://www.corfio.com.br>. Acesso em 25/05/2021.

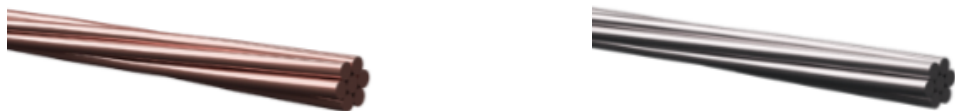


Cabo plano (PVC; até 750 kV)

Cabo paralelo (PVC; até 750 V)

Figura 27 – Exemplos de condutores comerciais.

Fonte: <http://www.corfio.com.br>. Acesso em 25/05/2021.



Cabo de cobre nu

Cabo de alumínio nu

Figura 28 – Exemplos de condutores comerciais.

Fonte: <http://www.corfio.com.br>. Acesso em 25/05/2021.

7 Dutos e Caixas

7.1 Introdução

Os dutos, também conhecidos como eletrodutos tem a finalidade de acondicionar os condutores ao longo dos circuitos de distribuição da instalação. Assim, os dutos provêm proteção mecânica aos condutores, evitando que estes sejam danificados por pressões, torções, rompimentos, etc. Além disso, também protegem os condutores contra umidade, sujeira, agentes químicos, dentre outros elementos que podem ser nocivos e diminuir a vida útil dos elementos da instalação. Por fim, os eletrodutos aumentam o isolamento entre a rede de alimentação dos circuitos e as diversas superfícies e elementos da edificação.

A seguir serão apresentados os principais modelos de eletrodutos e caixas e na sequência um exemplo de circuito elétrico com os mesmos.

7.2 Exemplos de dutos e caixas

Os modelos mais comuns de eletroduto são os rígidos e os flexíveis, conhecidos como mangueiras corrugadas, conforme mostrado na Figura 29.

Os eletrodutos usualmente tem diâmetros de 4/4", 1/2" ou 1", expressos em polegadas, mas disponíveis também com outras dimensões, como por exemplo: 20, 25, 32, 40, 50, 60, 75, 85, 110 mm.

Por sua vez, as caixas são o elemento de terminação ou interconexão entre linhas de eletrodutos, para acondicionar os pontos de iluminação, tomadas, interruptores, dentre outros dispositivos eletroeletrônicos. Além disso, podem servir como elemento de passagem, para permitirem a realização de interconexões entre os circuitos da instalação elétrica.

A Figura 30 mostra alguns exemplos de caixas disponíveis comercialmente e utilizadas comumente nas instalações elétricas de baixa tensão.

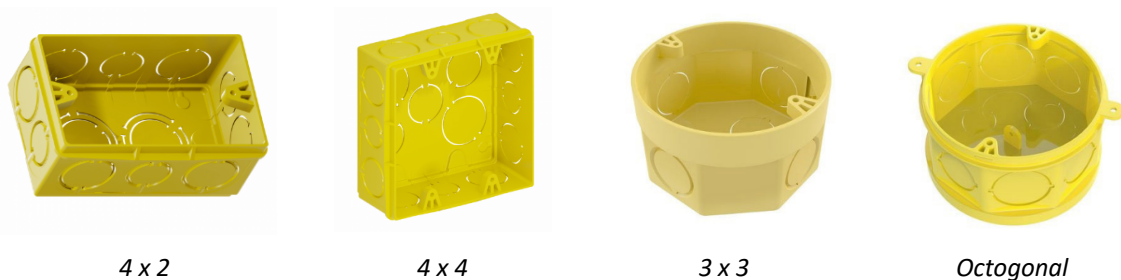


Eletroduto rígido

Eletroduto corrugado (flexível)

Figura 29 – Exemplos de eletrodutos comerciais.

Fonte: <https://www.tigre.com.br>. Acesso em 25/05/2021.



4 x 2

4 x 4

3 x 3

Octogonal

Figura 30 – Exemplos de caixas comerciais.

Fonte: <https://www.tigre.com.br>. Acesso em 25/05/2021.

7.3 Exemplo de circuito com dutos e caixas

A Figura 31 mostra um exemplo de circuito elétrico contendo interruptor, lâmpada e tomada, todos pertencentes ao circuito de número três. O interruptor será montado a meia altura

na parede (entre 110 cm e 130 cm), comandando uma lâmpada de 50 W no teto, identificados pela seção a. A lâmpada será afixada no teto em uma caixa octogonal, que recebe os dutos com os condutores vindos do circuito de distribuição e saindo para uma tomada de 300 VA a meia altura na parede.

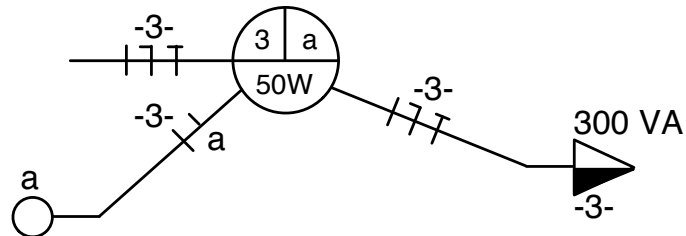


Figura 31 – Exemplo de circuito elétrico com elementos e caixas.

8 Quadros

8.1 Introdução

Os quadros são os elementos para acondicionamento dos dispositivos de proteção (disjuntores termomagnéticos, disjuntores diferenciais-residuais e dispositivos supressores de surtos), além de outros elementos, como centrais de alarmes, por exemplo.

A seguir serão apresentados alguns exemplos de quadros comerciais e um exemplo de circuito elétrico utilizando os mesmos.

8.2 Exemplos de quadros

Exemplos de quadros são mostrados na Figura 32, onde se mostram quadros de distribuição e quadros de comunicação. Os quadros podem ter tamanhos variados em função do número de elementos, disjuntores, por exemplo, que podem ser montados nos mesmos.



Quadro de distribuição



Quadro de comunicação

Figura 32 – Exemplos de quadros comerciais.

Fonte: <https://www.se.com/br/pt> e <https://www.tigre.com.br>. Acesso em 25/05/2021.

8.3 Exemplo de circuito com quadros

A Figura 33 mostra um circuito elétrico de exemplo, onde se tem a entrada de energia elétrica e a seguir o quadro de medição (QM). Na sequência se tem um duto flexível no piso, levando os condutores até o quadro de distribuição principal (QD 1) e deste, saindo um duto na parede ou teto levando os condutores da rede de alimentação até o quadro secundário (QD 2).

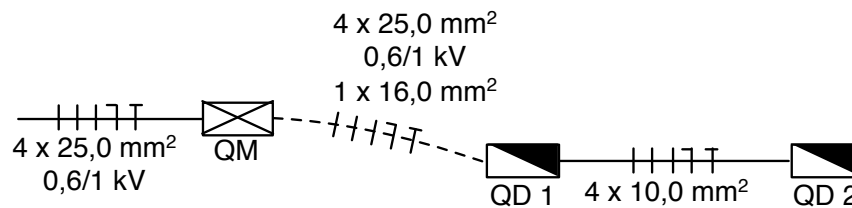


Figura 33 – Exemplo de circuito elétrico com diferentes quadros.

9 Comunicação, Sinalização e Demais Circuitos Auxiliares

9.1 Introdução

Além dos elementos apresentados anteriormente, se tem também elementos de comunicação e sinalização, como por exemplo as tomadas e rede para telefone, para alarme, para sinais de televisão, dentre outros.

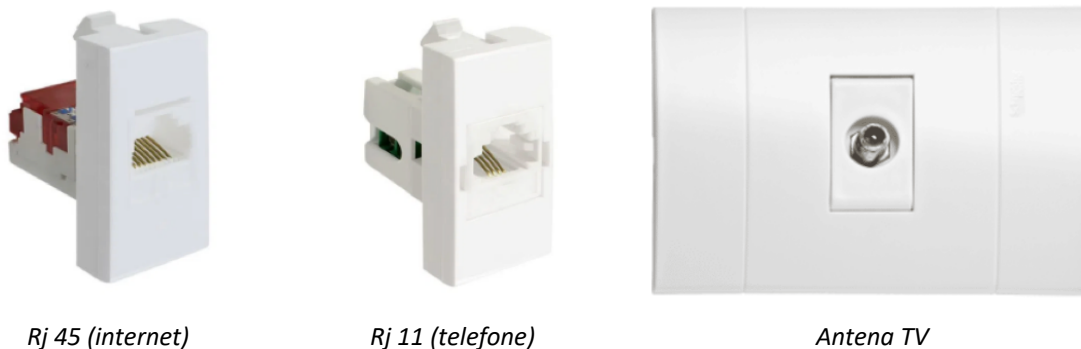
A seguir serão apresentados elementos diversos que fazem parte dos circuitos de comunicação, sinalização, dentre outros.

9.2 Tomadas diversas

Além das tomadas de uso geral e específico, integrantes dos circuitos de alimentação dos diversos pontos e equipamentos de uma instalação, também devem ser previstos pontos para os circuitos de comunicação, sinalização, dentre outros.

A Figura 34 apresenta três modelos comerciais de tomadas para aplicações específicas de comunicação e sinalização. Nesta figura se mostram as tomadas para conexão de equipamentos de telefone, no padrão Rj 11; conexão de equipamentos de internet, no padrão Rj 45; e para conexão de cabos coaxiais para televisores ou equipamentos de imagem, por exemplo.

Os exemplos mostrados não pretendem esgotar a variedade de opções para comunicação e sinalização, mas ilustrar os elementos mais comuns utilizados comumente nas instalações elétricas residenciais, mesmo de natureza simples e de baixo custo.



Rj 45 (internet)

Rj 11 (telefone)

Antena TV

Fonte: <https://www.alumbra.com.br>.Fonte: <https://www.se.com/br/pt>.

Figura 34 – Modelos de tomadas comerciais para comunicação e sinalização.

9.1 Elementos diversos para comunicação e sinalização

A instalação elétrica residencial em baixa tensão pode dispor de diversos elementos distintos daqueles apresentados até aqui, a depender da complexidade e das necessidades dos usuários.

Assim, é comum a utilização de campainha acionada por botão de campainha (pulsador), interfone e sensores de presença, por exemplo. A Figura 35 apresenta exemplos de modelos comerciais dos elementos citados.

Os sensores de presença podem ser utilizados para diferentes finalidades, como por exemplo: acionamento de alarmes, comando de lâmpadas de iluminação, comando de campainhas de sinalização, detecção de passagem de veículos ou pedestres, em circuitos de automação residencial, dentre outras. Em geral, os sensores de presença utilizam sensores de movimento e presença (PIR = *passive infrared*, sensor infravermelho), podendo ter fonte de alimentação (ou bateria) e circuito de acionamento (relés) integrados no mesmo gabinete.

A Figura 36 apresenta alguns aspectos de sensores de presença, mostrando-se elementos abertos, onde um deles é alimentado por bateria de 9 V, outro é utilizado para automação residencial e predial e também os sensores infravermelhos do dispositivo.



Campainha

Sensor de presença

Interfone

Fonte: <http://www.legrand.com.br>.Fonte: <https://www.multicraft.com.br>.Fonte: <https://www.intelbras.com>.

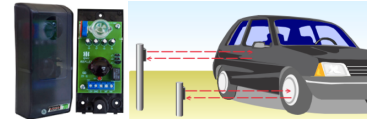
Figura 35 – Dispositivos comerciais para comunicação e sinalização.



Campainha

Fonte: <https://www.magazineluiza.com.br>.

Sensor de presença

Fonte: <https://www.filipeflop.com>.

Interfone

Fonte: <https://www.ipec.ind.br>.

Figura 36 – Aspectos sobre sensores de presença.

9.1 Exemplo de circuito com sensor de presença

A Figura 37 apresenta os diagramas unifilar e multifilar exemplificando o comando de uma lâmpada de 50 W no teto a partir de sensor de presença para iluminação. Pode-se notar que o sensor de presença é conectado de modo similar a um interruptor simples, com a diferença que o circuito do sensor deve também ser conectado ao condutor neutro; isso em virtude da fonte de alimentação interna do sensor, que será alimentada conectando nos condutores fase e neutro.

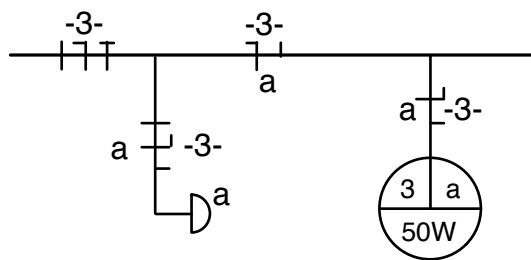


Diagrama unifilar

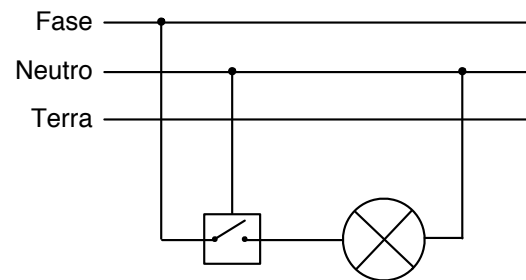


Diagrama multifilar

Figura 37 – Exemplo de circuito elétrico com diferentes quadros.

10 Entrada de Energia Elétrica

10.1 Introdução

Até o momento foram apresentados os elementos que são utilizados ao longo da instalação de energia elétrica residencial ou comercial, mas sem se detalhar os elementos que compõem o sistema de medição e fornecimento de energia a partir da concessionária de energia elétrica local.

A seguir serão apresentados sucintamente os principais elementos do sistema de entrada de energia elétrica de uma instalação elétrica de baixa tensão, com alimentação pela distribuição secundária da concessionária de energia elétrica.

10.1 Entrada de fornecimento de energia elétrica

O fornecimento de energia elétrica em baixa tensão, a partir da rede de distribuição secundária, é regulamentado pela concessionária de energia elétrica em Santa Catarina (CELESC) pela Norma Técnica N-321.0001. Esta norma define o padrão a ser adotado, nomenclatura específica e demais requisitos para que a instalação elétrica do consumidor esteja adequada para conexão na rede de energia elétrica.

Em termos de potência da unidade consumidora, o fornecimento poderá ser, para baixa tensão (alimentação secundária):

- Monofásico (fase e neutro), potência até 15 kW;
- Bifásico (2 fases e neutro), potência de 15 a 25 kW;
- Trifásico (3 fases e neutro), potência de 25 a 75 kW.

A Figura 38 mostra exemplos de entrada de energia elétrica, extraídos da Norma Técnica N-321.0001/CELESC, apresentando o quadro medidor em mureta ou parede, por exemplo. Interessante observar a especificação do local para a caixa de passagem subterrânea, por onde serão passarão os condutores vindos da alimentação da concessionária de energia elétrica. Além disso, o acesso para leitura no medidor deve ser desimpedido, para ser acessível pela parte externa da propriedade, isto é, a calçada da rua, neste caso.

A Figura 39 apresenta um sistema completo para entrada utilizando postes, tanto na rede de distribuição, como também para o medidor e entrada de energia no lado do consumidor.

Os elementos do sistema de fornecimento mostrados na Figura 39 são:

- A até C – Entrada de energia – condutores e acessórios desde o poste da rede de distribuição até o medidor de energia elétrica do consumidor;
- A até B – Ramal de ligação – conjunto de condutores que fazem a conexão da rede de distribuição até o ramal de entrada do consumidor;
- B até C – Ramal de entrada – conjunto de condutores que faz a conexão do ramal de ligação até a medição da unidade consumidora;
- B – Ponto de entrega – delimitação do ponto físico onde se considera que a energia foi disponibilizada ao consumidor;
- C até D – Ramal de saída – conjunto de condutores que fazem a conexão, pelo lado do consumidor, da medição até o ramal de carga;
- E – Ramal de carga – conjunto de condutores que fazem a conexão, pelo lado do consumidor, do ramal de saída até o quadro de distribuição interno da instalação.

Importante observar na Figura 39 a caixa de aterramento junto ao poste particular, com o respectivo condutor de aterramento e haste de terra. A Figura 40 mostra o aspecto real de uma haste de terra e de um quadro para medição. Por sua vez, a Figura 41 apresenta um sistema típico de fornecimento de energia elétrica, onde se podem identificar os elementos listados anteriormente a partir da Figura 39.

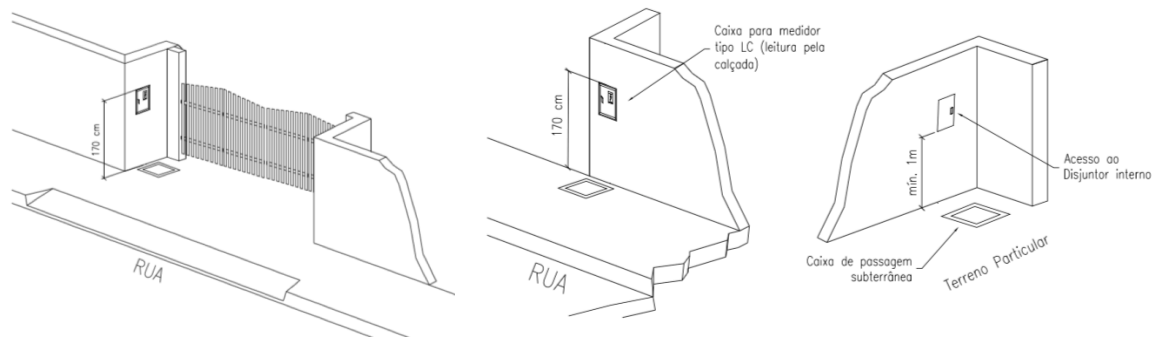


Figura 38 – Exemplo de entrada em mureta ou parede.

Fonte: (Norma Técnica N-321.0001/CELESC)

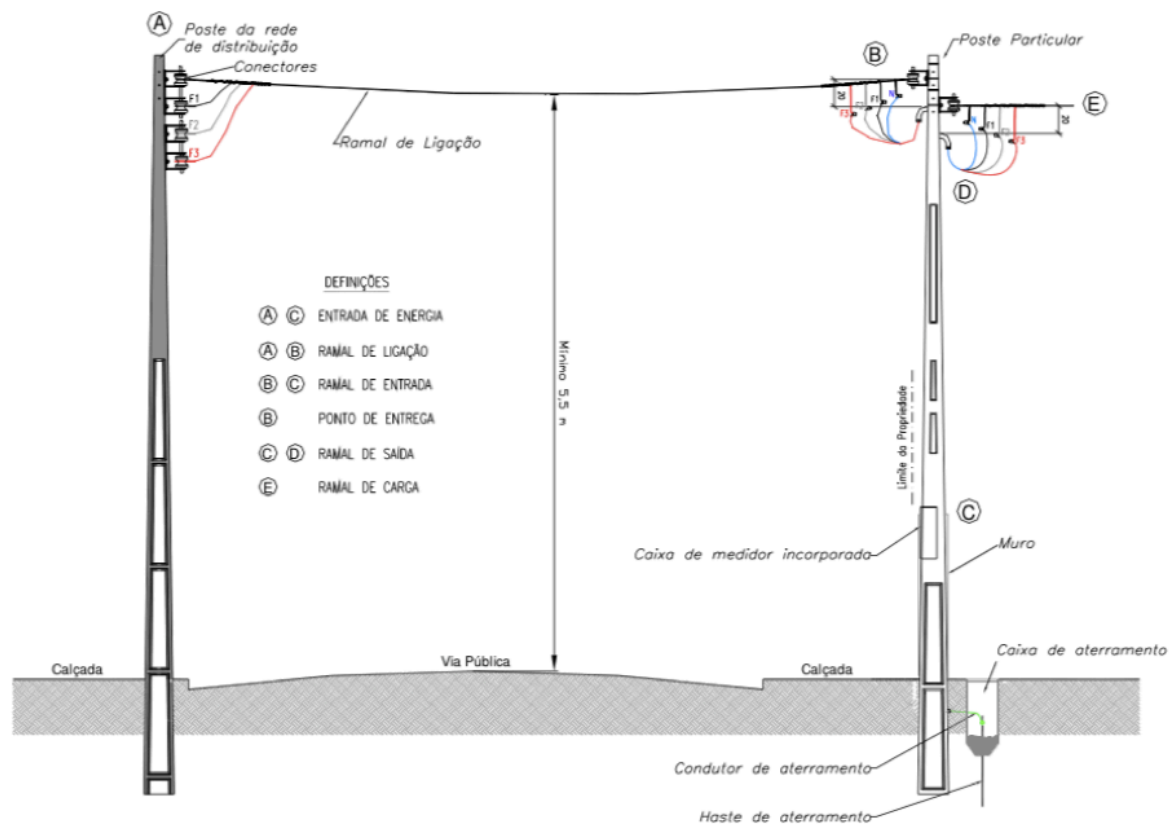


Figura 39 – Exemplo de entrada em poste.

Fonte: (Norma Técnica N-321.0001/CELESC)



Quadro de medição

Fonte: <https://www.comandopaineis.com.br>.



Haste de terra

Fonte: <https://www.leroymerlin.com.br>.

Figura 40 – Exemplos de elementos do sistema de medição.

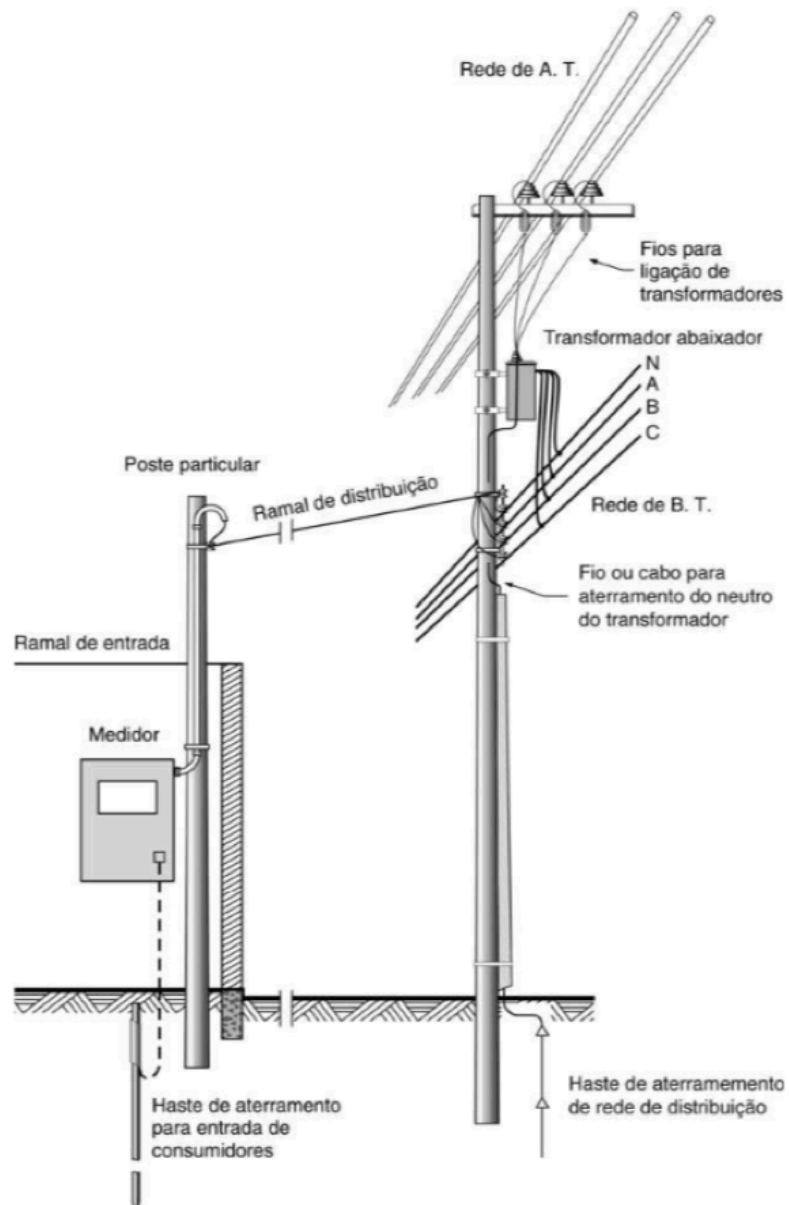


Figura 41 – Exemplo de sistema de fornecimento de energia.

Fonte: (Creder, 2002)

11 Exercícios

Exercícios Resolvidos

ER 01. Qual elemento gráfico é utilizado para representar lâmpadas?

O elemento gráfico para representar lâmpadas é o círculo.

ER 02. Cite 3 exemplos de lâmpadas utilizadas atualmente?

Atualmente é comum o uso de lâmpadas LED, que podem ser com rosca Edison (E27), tubulares, de embutir, dentre outras.

ER 03. O que é um interruptor simples?

Interruptor simples é um dispositivo de comando para ligar e desligar elementos de iluminação, como lâmpadas, por exemplo.

ER 04. O que são disjuntores termomagnéticos?

Disjuntores termomagnéticos são dispositivos de proteção, que atuam quando a corrente do circuito ultrapassar o valor nominal especificado para o disjuntor, protegendo os equipamentos e a instalação.

ER 05. O que são disjuntores residuais-diferenciais?

Disjuntores residuais-diferenciais são dispositivos de proteção, que atuam quando ocorre uma falta à terra, protegendo os usuários contra choques elétricos.

Exercícios Propostos

EP 01. Os projetos elétricos são representados sobre a planta baixa da edificação. Qual diagrama é utilizado para a representação de projetos elétricos residenciais de baixa tensão?

EP 02. Explique a diferença entre tomadas de uso específico e de uso geral?

EP 03. O que são interruptores paralelos?

EP 04. Qual a finalidade de se utilizar dispositivos supressores de surtos?

EP 05. O aterramento é um recurso importante para a proteção da instalação elétrica, dos equipamentos e dos usuários. Mesmo em uma instalação muito simples, qual elemento da instalação elétrica deve ser aterrado para atendimento das exigências da concessionária de energia elétrica?

12 Atividade Avaliativa

12.1 Introdução – O que preciso saber

Ao final deste objetivo de aprendizagem são apresentadas cinco questões, que devem ser respondidas sem consultar o material. Se você conseguir responder as questões e conferir as respostas com o gabarito abaixo, parabéns, você concluiu com êxito este tópico. Caso tenha errado alguma questão, revise o conteúdo relacionado com a mesma e refaça a questão, procurando se concentrar mais desta vez, para acertar o exercício e fixar bem o conteúdo.

AA 01. Cite exemplos de utilização de tomadas de uso específico (TUE)?

AA 02. O que são interruptores duplos?

AA 03. Cite um equipamento que deve ser conectado usando disjuntor diferencial-residual.

AA 04. Um disjuntor termomagnético atua imediatamente quando a corrente atinge seu valor nominal?

AA 05. Obrigatoriamente, os símbolos utilizados no projeto de uma instalação elétrica devem estar de acordo com a NBR 5444 de 1989?

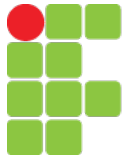
AA 01. As tomadas de uso específico são utilizadas para alimentar chuveiros e cozinhas e áreas de serviço, por exemplo.

AA 02. Os interruptores duplos são dispositivos de comando de elementos de iluminação, que podem comandar dois circuitos distintos de um mesmo local.

AA 03. Os chuveiros devem ser ligados por meio de disjuntores residuais-diferenciais.

AA 04. Os disjuntores termomagnéticos atuam com tempos que dependem de sua curva de resposta. Assim, se a corrente ultrapassar o valor nominal por uma diferença pequena, o elemento de atuação será o bimetálico, que demandará um tempo grande para desligar o disjuntor.

AA 05. A NBR 5444 de 1989 foi cancelada. Assim, sua simbologia continua sendo utilizada, mas os projetistas podem adotar outras normas ou criar símbolos próprios para uso nos projetos, indicados sempre na legenda que acompanha os diagramas elétricos.



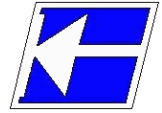
INSTITUTO FEDERAL
SANTA CATARINA

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA

DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA

CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM ELETRÔNICA INDUSTRIAL

Acionamentos Eletrônicos



GUIA DE ESTUDO

- OBJETIVO DE APRENDIZAGEM - PROJETO DE INSTALAÇÕES ELÉTRICAS

Prof. Clóvis Antônio Petry.

Florianópolis, junho de 2021.

PROJETO DE INSTALAÇÕES ELÉTRICAS

Objetivo de Aprendizagem

Realizar projetos de instalações elétricas de baixa complexidade.

Objetivos parciais

- Conhecer simbologia dos elementos de instalações elétricas;
- Conhecer os principais elementos das instalações elétricas;
- Interpretar projetos de instalações elétricas
- Realizar o projeto de instalações elétricas de baixa complexidade.

Aulas relacionadas

Este objetivo de aprendizagem está relacionado com a aula 03 da disciplina.

Pré-requisitos

Ter estudado o objetivo de aprendizagem 02 relacionado aos elementos de instalações elétricas.

Continuidade dos Estudos

O próximo objetivo de aprendizagem será o estudo dos princípios de eletromagnetismo.

Roteiro para estudos

Os estudos referentes a este objetivo de aprendizagem consistem em:

1. Estudar este documento resumo, realizando as atividades propostas no mesmo;
2. Responder o quiz relacionado a este objetivo de aprendizagem;
3. Caso perceba necessidade, estudar a apresentação deste assunto ou consultar os livros texto indicados para esta disciplina;
4. Realizar os exercícios deste tópico da matéria;
5. Realizar a avaliação final para progredir ao próximo conteúdo.

Referências

- Material disponibilizado para a disciplina de Acionamentos Eletrônicos – 2021/1.
Departamento Acadêmico de Eletrônica, Instituto Federal de Santa Catarina, Campus Florianópolis.
- CREDER, H. Instalações Elétricas. São Paulo: Livros Técnicos e científicos Editora, 2002.

Check-list

Caro estudante, verifique se você completou as atividades deste objetivo de aprendizagem e obteve êxito para continuar seus estudos.

Assinale as atividades realizadas:

Estudo do documento resumo:

- () Leitura do documento resumo;
- () Exercícios do documento resumo;
- () Atividade avaliativa do documento resumo.
- () Obtive êxito e entendi o conteúdo deste documento;
- () Ainda não entendi bem o conteúdo e estudarei o mesmo com mais profundidade.

Estou com dúvidas, irei estudar com mais detalhes este conteúdo:

- () Assistir a apresentação relacionada ao conteúdo (apresentação 01);
- () Ler os capítulos deste conteúdo no livro (capítulos 01 e 02).

Ainda estou com dúvidas:

- () Entrarei em contato com o professor.

Obtive êxito, então seguirei em frente:

- () Responder ao quiz deste conteúdo no Moodle;
- () Informar ao professor que estou avançando com o conteúdo.

Parabéns, continue estudando com afinco e vamos em frente!!

CONTEÚDO

- OBJETIVO DE APRENDIZAGEM - PROJETO DE INSTALAÇÕES ELÉTRICAS

1 Introdução

O conteúdo a ser estudado neste tópico da disciplina se refere ao projeto de instalações elétricas simples, isto é, de baixa complexidade.

A partir do estudo das aulas anteriores, sobre o sistema de energia elétrica e os elementos que compõem uma instalação elétrica, serão estudados os critérios, requisitos e recomendações para projetos elétricos em baixa tensão.

1.1 Conteúdo – O que irei estudar

Estudaremos neste tópico:

- Recomendações para projetos elétricos;
- Metodologia de projetos elétricos em baixa tensão;
- Exemplo de projeto de instalação elétrica simples.

1.2 Metodologia – O que devo fazer e como fazer

Leia com atenção o conteúdo a seguir. Ao final deste tópico são apresentados exercícios resolvidos. Após são apresentados alguns exercícios propostos.

Ao realizar estas atividades e se sentir confiante para progredir, siga os passos indicados na primeira página deste documento.

Espera-se que após estudar este assunto, você consiga:

- Interpretar projetos elétricos;
- Realizar projetos elétricos simples em baixa tensão.

A atividade avaliativa deste objetivo de aprendizagem consistirá em perguntar ao estudante para descrever os elementos de uma instalação elétrica.

Exemplo de atividade avaliativa:

1. Descreva os elementos de uma planta elétrica qualquer.
2. Cite requisitos técnicos para alocação de pontos de iluminação.
3. Cite requisitos técnicos para alocação de pontos de tomadas.
4. Realiza o projeto da instalação a partir de uma planta baixa específica.

2 Recomendações para Projetos Elétricos em Baixa Tensão

2.1 Introdução

Os projetos elétricos em baixa tensão são realizados seguindo-se recomendações, critérios e requisitos normativos e também da literatura, além de sugestões de fabricantes e profissionais da área.

Antes de se realizar o projeto propriamente dito, é interessante conhecer as principais recomendações sobre os diferentes elementos de um projeto e sua aplicação durante as fases de execução do mesmo.

A seguir serão apresentadas as principais recomendações, requisitos e critérios normativos ou da literatura, referentes aos elementos que compoem um projeto elétrico de baixa tensão.

2.2 Elementos do Projeto Elétrico

A norma NBR 5410 determina que a instalação deve ser executada a partir de projeto específico, que deve conter, no mínimo:

- a) Plantas;
- b) Esquemas unifilares e outros, quando aplicáveis;
- c) Detalhes de montagem, quando necessários;
- d) Memorial descritivo da instalação;
- e) Especificação dos componentes (descrição, características nominais e normas que devem atender);
- f) Parâmetros de projeto (correntes de curto-circuito, queda de tensão, fatores de demanda considerados, temperatura ambiente etc.).

A norma indica também que após concluída a instalação, a documentação relacionada anteriormente deve ser revisada e atualizada de forma a corresponder fielmente ao que foi executado (documentação "como construído", ou *as built*). Em outras palavras, a documentação deve ser atualizada para corresponder ao que foi construído, pois é comum se fazerem ajustes durante as obras e implementação dos projetos realizados.

Os principais elementos de uma planta para um projeto elétrico de uma instalação de baixa tensão são mostrados na Figura 1, onde se tem:

- Diagrama unifilar sobre a planta baixa – Representação dos elementos da

instalação e dos circuitos da mesma, sobre a planta baixa, por meio de diagrama unifilar específico;

- Quadro de cargas – Tabela com os circuitos que compõem a instalação, indicando sua potência, tensão de funcionamento, fases onde estão conectados e elementos de proteção;
- Diagrama unifilar do quadro de distribuição – Representação por meio de diagrama unifilar dos elementos de proteção integrantes do quadro de distribuição e suas conexões;
- Detalhes construtivos – Informações sobre dimensões de caixas, dados de condutores e elementos do sistema de aterramento, por exemplo;
- Anotações – Apontamentos importantes que devem ser levados em conta na execução do projeto;
- Legenda – Tabela com a simbologia utilizada no projeto;
- Identificação (rótulo) – Dados do projeto, como título, autor (projetista), data, endereço, etc.

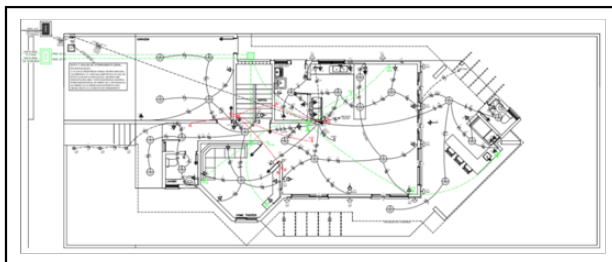
O memorial descritivo é um resumo das principais informações do projeto, detalhando aspectos técnicos sobre alguns elementos. Em geral é composto por:

- Características gerais – Identificação do projeto, com os dados do proprietário, do projetista, do endereço, da finalidade, dentre outras;
- Especificações técnicas – Detalhamento dos pontos relevantes e de destaque do projeto, podendo conter:
 - Generalidades – Recomendações iniciais sobre o projeto;
 - Entrada de energia elétrica – Dados técnicos sobre o fornecimento de energia elétrica;
 - Medição e proteção geral – Informações sobre o sistema de medição e disjuntor geral;
 - Aterramento – Informações técnicas sobre o sistema de aterramento, tanto na medição, como na instalação propriamente dita;
 - Carga instalada – Resumo da carga instalada e sua distribuição por fase, por exemplo;
 - Condutores – Especificações técnicas referentes aos condutores a serem utilizados na execução da instalação elétrica;
 - Eletrodutos – Especificações técnicas referentes aos eletrodutos a serem

utilizados na execução da instalação elétrica;

- Disjuntores e proteções – Especificações dos disjuntores e demais elementos de proteção da instalação e dos usuários;
- Quadro de distribuição – Detalhamento sobre os quadros de distribuição utilizados na instalação elétrica;
- Especificações da concessionária de energia elétrica – Detalhes específicos exigidos pela concessionária de energia elétrica;
- Recomendações gerais – Informações relevantes sobre a instalação como um todo e cuidados na execução da mesma;
- Informações adicionais – Recomendações e alertas quanto ao projeto e responsabilidade técnica relacionada com o mesmo.

Diagrama unifilar sobre a planta baixa



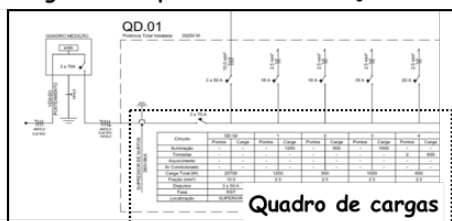
Anotações

Notas	
-	Eletroduto não costado: PVC anti-chama de Ø 1"
-	Condutor Fase, Neutro e Terra não costado: 2,5mm ² - 750V
-	Condutor Retorno não costado: 1,5mm ² - 750V
-	Condutor fase: cor preto, verde-claro ou branco
-	Condutor neutro: cor azul claro
-	Condutor retorno: cor amarelo ou cinza
-	Condutor terra: cor verde ou verde/amarelo

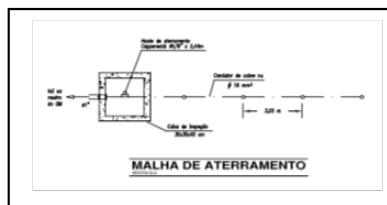
Legenda

LEGENDA	
Ø 1"	Eletroduto não costado: PVC anti-chama de Ø 1"
2,5mm ²	Condutor Fase, Neutro e Terra não costado: 2,5mm ² - 750V
1,5mm ²	Condutor Retorno não costado: 1,5mm ² - 750V
Preto, Verde-claro, Branco	Condutor fase: cor preto, verde-claro ou branco
Azul claro	Condutor neutro: cor azul claro
Amarelo, Cinza	Condutor retorno: cor amarelo ou cinza
Verde, Verde/amarelo	Condutor terra: cor verde ou verde/amarelo

Diagrama do quadro de distribuição



Detalhes construtivos



Identificação (rótulo)

IDENTIFICAÇÃO (RÓTULO)	
PLANTA BASE DO PAVIL. 01/02	PLANTA BASE DO PAVIL. SUPERIOR
LEGENDA, NOTAS E DETALHES	
PROJETO: []	REVISÃO: []
ELABORADO: []	REVISADO: []
APROVADO: []	DATA: []
ELETROELECTRÔNICA E TELECOMUNICAÇÕES	
APROVAÇÃO	

Figura 1 – Exemplo de planta de um projeto elétrico de baixa tensão.

Os demais elementos que constituem a documentação técnica de um projeto elétrico de baixa tensão e sua execução podem ser necessários conforme o grau de complexidade, finalidade e localização da instalação, além daqueles elementos específicos exigidos pelas autoridades competentes em cada município e estado, por exemplo.

Por fim, o levantamento das cargas é realizado prevendo-se as potências mínimas de iluminação e tomadas a serem instaladas, obtendo-se a partir daí a potência total prevista para a instalação elétrica residencial; o que será realizado ao longo do desenvolvimento do projeto elétrico, como será visto adiante.

2.3 Elementos de iluminação

A norma NBR 5410 estabelece os critérios a serem seguidos para estabelecer os pontos de iluminação em uma instalação de baixa tensão. Em ambientes e projetos específicos devem ser utilizados projetos luminotécnicos e as normativas aplicadas para os mesmos, como por exemplo, a NBR 5413 que aborda a iluminação de interiores.

A NBR 5410 estabelece que:

- Em cada cômodo ou dependência deve ser previsto pelo menos um ponto de luz fixo no teto, comandado por interruptor;
- Arandelas no banheiro devem estar distantes, no mínimo, 60 cm do limite do boxe;
- Na determinação das cargas de iluminação, como alternativa à aplicação da ABNT NBR 5413:
 - Para área igual ou inferior a 6 m^2 > atribuir um mínimo de 100 VA;
 - Para área superior a 6 m^2 > atribuir um mínimo de 100 VA para os primeiros 6 m^2 , acrescido de 60 VA para cada aumento de 4 m^2 inteiros.

A norma ressalta que os valores apurados correspondem à potência destinada a iluminação para efeito de dimensionamento dos circuitos, e não necessariamente à potência nominal das lâmpadas.

2.4 Elementos de conexão (tomadas)

A NBR 5410 define que número de pontos de tomada deve ser determinado em função da destinação do local e dos equipamentos elétricos que podem ser aí utilizados, observando-se no mínimo os seguintes critérios.

- a) Em banheiros, deve ser previsto pelo menos um ponto de tomada, próximo ao lavatório. Respeitar a distância mínima de 60 cm do limite do boxe;
- b) Em cozinhas, copas, copas-cozinhas, áreas de serviço, cozinha-área de serviço, lavanderias e locais análogos, deve ser previsto no mínimo um ponto de tomada para cada 3,5 m, ou fração, de perímetro, sendo que acima da bancada da pia devem ser previstas no mínimo duas tomadas de corrente, no mesmo ponto ou em pontos distintos;
- c) Em varandas, deve ser previsto pelo menos um ponto de tomada, podendo este ser colocado próximo a mesma se não comportar o ponto, tiver área inferior a 2 m^2 ou quando sua profundidade for inferior a 0,80 m;

- d) Em salas e dormitórios devem ser previstos pelo menos um ponto de tomada para cada 5 m, ou fração, de perímetro, devendo esses pontos ser espaçados tão uniformemente quanto possível;
- e) Em cada um dos demais cômodos e dependências de habitação devem ser previstos pelo menos:
- Um ponto de tomada, se a área do cômodo ou dependência for igual ou inferior a 2,25 m². Admite-se que esse ponto seja posicionado externamente ao cômodo ou dependência, a até 0,80 m no máximo de sua porta de acesso;
 - Um ponto de tomada, se a área do cômodo ou dependência for superior a 2,25 m² e igual ou inferior a 6 m²;
 - Um ponto de tomada para cada 5 m, ou fração, de perímetro, se a área do cômodo ou dependência for superior a 6 m², devendo esses pontos ser espaçados tão uniformemente quanto possível.

A potência dos pontos de tomada, segundo a NBR 5410 deverá ser:

- a) Em banheiros, cozinhas, copas, copas-cozinhas, áreas de serviço, lavanderias e locais análogos, no mínimo 600 VA por ponto de tomada, até três pontos, e 100 VA por ponto para os excedentes, considerando-se cada um desses ambientes separadamente. Quando o total de tomadas no conjunto desses ambientes for superior a seis pontos, admite-se que o critério de atribuição de potências seja de no mínimo 600 VA por ponto de tomada, até dois pontos, e 100 VA por ponto para os excedentes, sempre considerando cada um dos ambientes separadamente;
- b) Nos demais cômodos ou dependências, no mínimo 100 VA por ponto de tomada.

Em relação ao tipo de tomada, considerar:

- Tomadas de uso geral (TUG) – Respeitar os requisitos da norma e os interesses do usuário da edificação;
- Tomadas de uso específico (TUE) – Determinar a quantidade de pontos de tomada conforme a quantidade de equipamentos do usuário. Exemplos de equipamentos para uso de tomadas de uso específico são: chuveiro, torneira elétrica, secadora de roupas, forno elétrico, fogão elétrico, motobomba, etc. Atribuir a potência da tomada conforme a potência do equipamento.

Importante destacar que conforme a potência e tipo de equipamento, a conexão deste à rede de distribuição deve ser feita diretamente na fiação, sem o uso de tomada e plugue, como é o caso de torneiras elétricas e chuveiros, por exemplo.

2.5 Potência total da instalação

O cálculo da potência total da instalação elétrica é realizado somando-se todas as potências parciais dos elementos do circuito, levando em conta o fator de potência e o fator de demanda, conforme cada equipamento ou elemento em específico.

O fator de potência, conforme a norma NBR 5410, é considerado como sendo:

- Elementos e circuitos de iluminação – fator de potência unitário (1);
- Tomadas de uso geral (TUG) – fator de potência de 0,8;
- Tomadas de uso específico (TUE) – fator de potência do equipamento que será alimentado.

A potência ativa (W) é calculada a partir da potência aparente (VA) e do fator de potência como sendo:

$$P = S \cdot FP$$

$$S = V \cdot I$$

Onde:

- P – Potência ativa em watts (W);
- S – Potência aparente em volt-ampère (VA);
- V – Tensão eficaz em volts (V);
- I – Corrente eficaz em ampères (A).

Em relação ao fator de demanda, que representa quanto da potência prevista será utilizada efetivamente nos momentos de maior demanda, visto que não serão ligados todos os elementos da instalação simultaneamente. Ao aplicar o fator de demanda se otimiza o projeto evitando superdimensionamento dos elementos da instalação, que implicariam em maiores custos para execução da mesma.

A Tabela 1 apresenta os fatores de demanda aplicáveis a pontos de iluminação e tomadas de uso geral, para potências ativas até 10 kW.

Por sua vez, para tomadas de uso específico (TUE), se utiliza a Tabela 1 para determinar o fator de demanda aplicável a estes elementos da instalação.

Tabela 1 – Fatores de demanda para pontos de iluminação e tomadas de uso geral.

Potência ativa (W)	Fator de demanda
0 até 1000	0,86
1001 até 2000	0,75
2001 até 3000	0,66
3001 até 4000	0,59
4001 até 5000	0,52
5001 até 6000	0,45
6001 até 7000	0,40
7001 até 8000	0,35
8001 até 9000	0,31
9001 até 10000	0,27
Acima de 10000	0,24

Fonte: Adaptado de (NBR 5410, 2004).

Tabela 2 – Fatores de demanda para tomadas de uso específico.

Número de tomadas de uso específico (TUE)	Fator de demanda	Número de tomadas de uso específico (TUE)	Fator de demanda
1	1,00	13	0,46
2	1,00	14	0,45
3	0,84	15	0,44
4	0,76	16	0,43
5	0,70	17	0,40
6	0,65	18	0,40
7	0,60	19	0,40
8	0,57	20	0,40
9	0,54	21	0,39
10	0,52	22	0,39
11	0,49	23	0,39
12	0,48	24	0,38
		25	0,38

Fonte: Adaptado de (Prysmian, 2006).

2.6 Divisão em circuitos

Uma instalação elétrica é pode ser dividida em circuitos parciais, para ocorrer uma melhor distribuição da potência entre as fases, quando forem redes bifásicas ou trifásicas, além de diminuir a seção dos condutores e facilitar a manutenção da instalação.

Ao carregar em demasia os circuitos, isto é, alimentar diversos equipamentos com o mesmo circuito terminal, se terá maiores correntes nos condutores, mais aquecimento, além de implicar de se necessitar usar maiores seções para a fiação, o que acarreta aumento de custo e dificuldade durante a passagem dos condutores nos eletrodutos e as conexões nos dispositivos, como interruptores e tomadas.

O circuito de distribuição conecta o quadro de medição até o quadro de distribuição, sendo que a partir daí se tem os circuitos terminais, que conectam os pontos de iluminação, pontos

de tomadas e cargas em geral aos disjuntores e demais elementos de proteção no quadro de distribuição.

Os critérios estabelecidos pela NBR 5410 para se dividir o circuito são:

- Prever circuitos de iluminação separados dos circuitos de pontos de tomadas de uso geral;
- Prever circuitos independentes e exclusivos para cada equipamento com corrente nominal superior a 10 A. Assim, em 220 V, equipamentos com potências acima de 2200 VA devem ser separados dos demais circuitos;
- Pontos de tomadas de cozinhas, copas, copas-cozinhas, áreas de serviços, lavanderias e locais semelhantes devem ser alimentados por circuitos exclusivos, visto a norma recomendar o uso de tomadas de uso específico para estes locais.

Além da divisão em circuitos, também se realiza o agrupamento de circuitos, unindo-se elementos de diferentes locais, considerando o afastamento entre os mesmos e as funcionalidades da instalação. Assim, os elementos de iluminação de diferentes ambientes podem ser agrupados em um único circuito terminal; o que também poderá ser feito com tomadas de uso geral.

Por outro lado, a NBR 5410 recomenda que os circuitos de iluminação sejam independentes dos circuitos de tomadas, visando facilitar a intervenção durante falhas, pois ao ocorrer algum problema com um equipamento conectado em uma tomada, apenas aquele circuito seria desligado pelo disjuntor de proteção, restando funcional os circuitos de iluminação e demais circuitos terminais.

Em termos práticos, conforme (Mussoi, 2016), pode-se considerar:

- Circuitos dos elementos de iluminação – Agrupar os elementos até o limite de 10 A, o que implica em uma potência de 2200 VA em 220 V, sugerindo-se não ultrapassar 8 pontos de iluminação;
- Tomadas de uso geral (TUG) – Agrupar os elementos até o limite de 10 A, 2200 VA, sugerindo-se não ultrapassar 8 pontos de tomadas;
- Tomadas de uso específico (TUE) – Utilizar um circuito terminal independente para cada equipamento ou conjunto de equipamentos, conforme recomenda a NBR 5410 para cozinhas, copas, copas-cozinhas, áreas de serviços, lavanderias e locais semelhantes.

Em edificações menores, pode-se dividir os circuitos conforme o uso, por exemplo em: social, serviço, privativos, etc.

2.7 Dimensionamento dos condutores

Os condutores a serem utilizados nas instalações elétricas de baixa tensão podem ser de cobre ou alumínio. No entanto, os condutores de alumínio somente podem ser utilizados em instalações comerciais ou industriais, nas condições definidas na NBR 5410.

A norma brasileira NBR NM280 atribui classes aos condutores, em termos de flexibilidade durante o manuseio dos mesmos:

- Classe 1 – Condutores sólidos (fios), que apresentam baixo grau de flexibilidade, isto é, são condutores rígidos;
- Classes 2, 4, 5 e 6 – Condutores formados por vários fios (cabos), sendo que, quanto mais alta a classe, maior a flexibilidade do cabo.

Assim, o uso de cabos flexíveis, com classe 5, por exemplo, facilita o processo de passagem dos condutores nos eletrodutos e posteriores manutenções e alterações na instalação elétrica.

A seção mínima para os condutores, conforme a finalidade do circuito, de acordo com a NBR 5410 é indicada na Tabela 3, em resumo sendo:

- Iluminação – Condutores com 1,5 mm² no mínimo;
- Força (tomadas de uso geral e específico) – Condutores com 2,5 mm² no mínimo.

Tabela 3 – Seção mínima dos condutores.

Tipo de linha		Utilização do circuito	Seção mínima do condutor em mm ²
Instalações fixas em geral	Condutores e cabos isolados	Circuitos de iluminação	1,5
		Circuitos de força	2,5
		Circuitos de sinalização e circuitos de controle	0,5*
	Condutores nus	Circuitos de força	10
Circuitos de sinalização e circuitos de controle		4	
Linhas flexíveis com cabos isolados		Para um equipamento específico	Conforme norma do equipamento
		Para qualquer outra aplicação	0,75
		Circuitos a extra-baixa tensão para aplicações especiais	0,75

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

Fonte: Adaptado de (NBR 5410, 2004).

Por sua vez, para o condutor de proteção, a NBR 5410 determina que a sua seção seja determinada a partir da seção dos condutores fase, conforme a Tabela 4.

Tabela 4 – Seção dos condutores de proteção em função da seção dos condutores fase.

Seção dos condutores fase (mm ²)	Seção do condutor de proteção (mm ²)
1,5	1,5
2,5	2,5
4	4
6	6
10	10
16	16
25	16
35	16
50	25
70	35
95	50
120	70
150	95
185	95
240	120

Fonte: Adaptado de (NBR 5410, 2004).

A norma NBR 5410 estabelece diferentes métodos de instalação dos condutores e seu acondicionamento em dutos. Os tipos de linhas elétricas mais comuns em instalações de baixa tensão para uso residencial são mostrados na Tabela 5, sendo que a listagem completa pode ser obtida diretamente na norma NBR 5410.

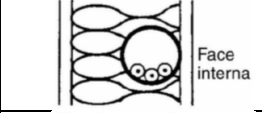
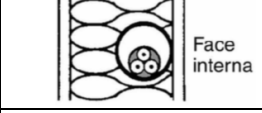
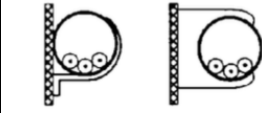
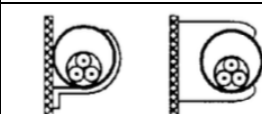
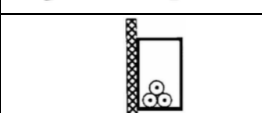
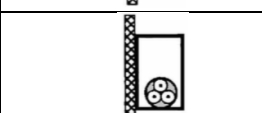
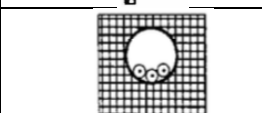
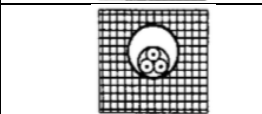
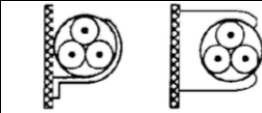
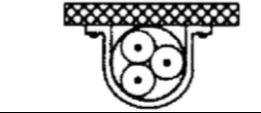
Os métodos de referência definidos pela NBR 5410 são os métodos de instalação, indicados na IEC 60364-5-52, para os quais a capacidade de condução de corrente foi determinada por ensaio (empiricamente) ou por cálculo, sendo eles:

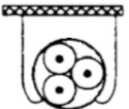
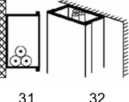
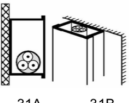
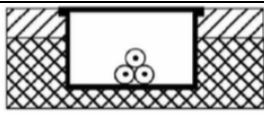
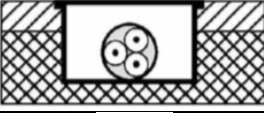
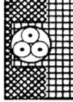
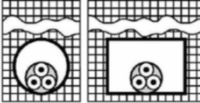
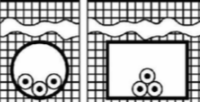
- A1 – Condutores isolados em eletroduto de seção circular embutido em parede termicamente isolante;
- A2 – Cabo multipolar em eletroduto de seção circular embutido em parede termicamente isolante;
- B1 – Condutores isolados em eletroduto de seção circular sobre parede de madeira;
- B2 – Cabo multipolar 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.

O método de instalação irá influenciar o dimensionamento dos condutores, visto que conforme forem instalados em dutos de diferentes características, se terá diferentes comportamentos térmicos, isto é, aquecimento e ventilação dos condutores.

As Tabela 6 e Tabela 7 apresentam as capacidades de condução de corrente dos condutores para diferentes métodos de instalação e em função do número de condutores carregados no interior do eletroduto. A corrente é dada em ampères nas tabelas Tabela 6 e Tabela 7, sendo que a título de exemplo, um condutor de 1,5 mm² com isolamento de PVC, teria capacidade de condução de 14,5 A se estiver acondicionado em eletroduto, considerando-se dois condutores carregados e um condutor de proteção, que seria uma ligação típica de tomada de uso geral (TUG).

Tabela 5 – Tipos de linhas elétricas.

Número do método de instalação	Esquema ilustrativo	Descrição	Método de referência
1		Condutores isolados ou cabos unipolares em eletroduto de seção circular embutido em parede termicamente isolante)	A1
2		Cabo multipolar em eletroduto de seção circular embutido em parede termicamente isolante)	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
31, 32		Condutores isolados ou cabos unipolares em eletrocalha sobre parede em percurso horizontal ou vertical	B1
31A, 32A		Cabo multipolar em eletrocalha sobre parede em percurso horizontal ou 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
52		Cabos unipolares ou cabo multipolar embutido(s) diretamente em alvenaria sem proteção mecânica adicional	C
61		Cabo multipolar em eletroduto (de seção circular ou não) ou em canaleta não-ventilada enterrado(a)	D
61A		Cabos unipolares em eletroduto (de seção não-circular ou não) ou em canaleta não-ventilada enterrado(a)	D

Fonte: Adaptado de (NBR 5410, 2004).

Tabela 6 – Capacidades de condução de corrente, em ampères, para os métodos de referência A1, A2, B1, B2, C e D, condutores de cobre, temperatura de 70 °C e isolamento de PVC.

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
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
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

Fonte: Adaptado de (NBR 5410, 2004).

Tabela 7 – Capacidades de condução de corrente, em ampères, para os métodos de referência A1, A2, B1, B2, C e D, condutores de cobre, temperatura de 90 °C e isolamento de EPR ou XLPE.

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
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
630	765	685	696	623	998	879	825	725	1.122	923	711	596
800	885	792	805	721	1.158	1020	952	837	1.311	1.074	811	679
1.000	1014	908	923	826	1332	1.173	1.088	957	1.515	1.237	916	767

Fonte: Adaptado de (NBR 5410, 2004).

O número de condutores carregados a ser considerado para se consultar as Tabela 6 e Tabela 7 é determinado a partir da Tabela 8, lembrando que são considerados condutores carregados ou vivos, aqueles que efetivamente conduzem corrente elétrica para o funcionamento dos equipamentos, ou seja, os condutores fase e neutro, sendo que o condutor de proteção (terra) não é considerado condutor vivo e conseqüentemente não deve ser levado em conta no carregamento dos circuitos.

A NBR 5410 esclarece, em complemento ao recomendado anteriormente, que “em particular, no caso de circuito trifásico com neutro, quando a circulação de corrente no neutro não for acompanhada de redução correspondente na carga dos condutores de fase, o neutro deve ser computado como condutor carregado. É o que acontece quando a corrente nos condutores de fase contém componentes harmônicas de ordem três e múltiplos numa taxa superior a 15%. Nessas

condições, o circuito trifásico com neutro deve ser considerado como constituído de quatro condutores carregados e a determinação da capacidade de condução de corrente dos condutores deve ser afetada do “fator de correção devido ao carregamento do neutro”. Tal fator, que em caráter geral é de 0,86, independentemente do método de instalação, é aplicável então às capacidades de condução de corrente válidas para três condutores carregados”.

Tabela 8 – Número de condutores carregados a ser considerado, em função do tipo de circuito.

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

Fonte: Adaptado de (NBR 5410, 2004).

A capacidade de condução de corrente dos condutores é alterada conforme a temperatura ambiente onde os mesmos forem instalados. As temperaturas características dos condutores com diferentes isolações são mostradas na Tabela 9, sendo que na Tabela 10 se mostram os fatores de correção aplicáveis quando da instalação dos condutores em locais com temperaturas ambientes diferentes de 30 °C. Em situações típicas para instalações de baixa tensão e uso residencial, na região Sul do Brasil, pode-se considerar as temperaturas ambiente como sendo de 30 °C, lembrando que temperaturas mais baixas são benéficas para o funcionamento da instalação elétrica.

Tabela 9 – Temperaturas características dos condutores.

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

Fonte: Adaptado de (NBR 5410, 2004).

Tabela 10 – Fatores de correção para temperaturas ambientes diferentes de 30 °C para linhas não-subterrâneas e de 20 °C (temperatura do solo) para linhas subterrâneas.

Temperatura ambiente (°C)	Isolação		Temperatura ambiente (°C)	Isolação	
	PVC	EPR ou XLPE		PVC	EPR ou XLPE
10	1,22	1,15	10	1,10	1,07
15	1,17	1,12	15	1,05	1,04
20	1,12	1,08	20	1,00	1,00
25	1,06	1,04	25	0,95	0,96
30	1,00	1,00	30	0,89	0,93
35	0,94	0,96	35	0,84	0,89
40	0,87	0,91	40	0,77	0,85
45	0,79	0,87	45	0,71	0,80
50	0,71	0,82	50	0,63	0,76
55	0,61	0,76	55	0,55	0,71
60	0,50	0,71	60	0,45	0,65
65	-	0,65	65	-	0,60
70	-	0,58	70	-	0,53
75	-	0,50	75	-	0,46
80	-	0,41	80	-	0,38

Fonte: Adaptado de (NBR 5410, 2004).

Além da correção na capacidade de condução dos condutores em função da temperatura de operação, também é necessário aplicar fatores de correção em virtude do número de condutores que estiverem acondicionados em um mesmo eletroduto, conforme mostrado na Tabela 11.

Tabela 11 – Fatores de correção aplicáveis a condutores agrupados em feixe (em linhas abertas ou fechadas) e a condutores agrupados num mesmo plano, em camada única.

Número de circuitos ou de cabos multipolares											
1	2	3	4	5	6	7	8	9 a 11	12 a 15	16 a 19	≥20
1,00	0,80	0,70	0,65	0,60	0,57	0,54	0,52	0,50	0,45	0,41	0,38

Fonte: Adaptado de (NBR 5410, 2004).

Além de se considerar a capacidade de corrente correta para cada condutor da instalação elétrica, devido a sua resistência elétrica, irá ocorrer uma queda de tensão ao longo da linha, que será maior quanto mais longos forem os cabos de conexão desde o quadro de distribuição até os equipamentos finais.

Assim, a NBR 5410 determina que a tensão no ponto de conexão do equipamento, em relação à tensão nominal para determinado tipo de fornecimento de energia elétrica, não poderá ser menor pelos percentuais dados a seguir:

- 7%, calculados a partir dos terminais secundários do transformador MT/BT, no caso de transformador de propriedade da(s) unidade(s) consumidora(s);
- 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.

Em nenhuma situação a queda de tensão nos circuitos terminais pode ser superior a 4%. A exceção é permitida para equipamentos com corrente de partida elevada, tais como motores elétricos, durante o período de partida dos mesmos e de acordo com as normas daquele elemento em particular.

A Figura 2 mostra em forma de diagrama, as quedas de tensão permitidas para instalações elétricas em baixa tensão, com fornecimento pela rede de distribuição secundária da concessionária de energia elétrica.

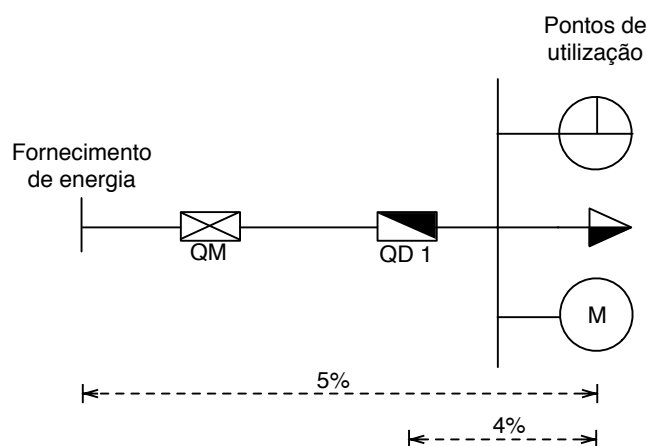


Figura 2 – Queda de tensão admitida em instalações de baixa tensão.

Em geral, é imprescindível se levar em conta o critério de escolha dos condutores pela queda de tensão máxima permitida ao se alimentar cargas de alta potência, tais como chuveiros, motobombas, aquecedores, equipamentos de ar-condicionado, etc; e quando instalados em distâncias longas da entrada de energia elétrica. Além disso, caso o quadro de distribuição da edificação fique consideravelmente afastado da entrada de fornecimento de energia elétrica, também se deverá levar em conta o critério da queda de tensão.

A rigor, em termos conservativos, deveria se dimensionar os condutores pela capacidade de condução de corrente elétrica e pelo critério da queda de tensão, e escolher os mesmos conforme a maior seção obtida.

A queda de tensão percentual pode ser calculada por:

$$\Delta V(\%) = \frac{\Delta V \cdot I \cdot L}{V_n} \cdot 100$$

Onde:

- $\Delta V(\%)$ – queda de tensão percentual;
- ΔV – queda de tensão nominal, obtida na Tabela 12;
- I – Corrente do circuito em ampères;
- L – Comprimento da linha elétrica em quilômetros;
- V_n - Tensão nominal do circuito em volts.

Tabela 12 – Queda de tensão nos condutores em V/A.km.

Seção do condutor (mm ²)	Queda de tensão (V/A.km)		
	Eletroduto não-magnético		Eletroduto magnético
	Circuito monofásico	Circuito trifásico	
1,5	23,3	20,2	23
2,5	14,3	12,4	14
4	8,96	7,79	9
6	6,03	5,25	5,87
10	3,63	3,17	3,54
16	2,32	2,03	2,27
25	1,51	1,33	1,5
35	1,12	0,98	1,12
50	0,85	0,76	0,86
70	0,62	0,55	0,64
95	0,48	0,43	0,5
120	0,4	0,36	0,42
150	0,35	0,31	0,37
185	0,3	0,27	0,32
240	0,26	0,23	0,29
300	0,23	0,21	0,27

Fonte: <https://sil.com.br>. Acessado em 03/06/2021.

2.8 Dimensionamento da proteção

A proteção da instalação elétrica, dos equipamentos e dos usuários, conforme visto na aula anterior, é realizada por meio de disjuntores termomagnéticos, disjuntores diferenciais-residuais (DR) e dispositivos de proteção contra surtos (DPS).

É importante ressaltar, conforme recomendações técnicas da literatura da área (Fonte: Prysmian, 2006¹):

¹ Prysmian. Instalações Elétricas Residenciais. Prysmian Cables & Systems. Disponível: <http://prysmiangroup.com>. Acesso versão atualizada em 03/06/2021.

- Os disjuntores termomagnéticos somente devem ser ligados aos condutores fase dos circuitos;
- Os disjuntores diferenciais-residuais devem ser ligados aos condutores fase e neutro dos circuitos, sendo que o neutro não pode ser aterrado após o disjuntor;
- Interruptores diferenciais-residuais devem ser utilizados nos circuitos em conjunto com dispositivos a sobrecorrente (disjuntor ou fusível), colocados antes do interruptor DR.

A corrente nominal dos disjuntores termomagnéticos é definida em função da corrente dos condutores utilizados na instalação. As Tabela 13 e Tabela 14 apresentam os valores máximos para a corrente nominal de disjuntores utilizados para proteção de circuitos de condutores de cobre, para os métodos de instalação B e C, nas condições normais e mais usuais de operação, isto é, temperatura ambiente de 30 °C e isolamento de PVC.

Ao se utilizar elementos de proteção nos circuitos elétricos, deve-se considerar a coordenação entre os dispositivos, que significa, de maneira simplificada, que os elementos mais próximos dos consumidores devem ter corrente menor do que aqueles elementos mais próximos das fontes de alimentação. Assim, pode-se considerar que deve haver uma hierarquia entre os elementos de proteção, onde os elementos a jusante (acima ou mais próximos da alimentação) devem ser dimensionados com uma corrente não superior a 40% da corrente dos elementos a montante (abaixo ou mais próximos dos consumidores), conforme (Mussoi, 2016²).

Tabela 13 – Corrente nominal máxima para disjuntores, com condutores de cobre embutidos em eletroduto em alvenaria (método de instalação B).

Seção do condutor (mm ²)	Corrente nominal máxima dos disjuntores (A)				
	2 condutores carregados (monofásico)	3 condutores carregados (trifásico)	4 condutores carregados (2 circuitos no eletroduto)	6 condutores carregados (3 circuitos no eletroduto)	6 condutores carregados (2 circuitos no eletroduto)
1,5	15	15	10	10	10
2,5	20	20	15	15	15
4	30	25	25	20	20
6	40	35	30	25	25
10	50	50	40	40	40
16	70	60	60	50	50
25	100	70	70	70	70
35	100	100	100	70	70
50	100	100	100	100	100

Fonte: Adaptado de (Mussoi, 2016, apud Bticino e Cotrim, 2009).

² Mussoi, Fernando L. R. *Instalações Elétricas. Apostila. Departamento Acadêmico de Eletrônica, Câmpus Florianópolis, Instituto Federal de Santa Catarina – IFSC, 2016.*

Tabela 14 – Corrente nominal máxima para disjuntores, com condutores de cobre embutidos em eletroduto sobre parede ou teto (método de instalação C).

Seção do condutor (mm ²)	Corrente nominal máxima dos disjuntores (A)				
	2 condutores carregados (monofásico)	3 condutores carregados (trifásico)	4 condutores carregados (2 circuitos no eletroduto)	6 condutores carregados (3 circuitos no eletroduto)	6 condutores carregados (2 circuitos no eletroduto)
1,5	15	15	15	10	10
2,5	25	20	20	15	15
4	35	30	25	25	25
6	40	40	35	30	30
10	60	50	50	40	40
16	70	70	60	60	60
25	100	90	90	70	70
35	100	100	100	90	90
50	100	100	100	100	100

Fonte: Adaptado de (Mussoi, 2016, apud Bticino e Cotrim, 2009).

A Tabela 15 mostra as correntes de disjuntores termomagnéticos levando em conta a relação de 40% (em torno de 2,5 vezes) entre os valores das correntes dos disjuntores menores (abaixo ou a jusante) em relação aquela dos disjuntores maiores (acima ou a montante) (Fonte: Mussoi, 2016, apud Cotrim, 2009). Nota-se na tabela que um disjuntor de 6 A para proteger um circuito terminal pode ser utilizado com qualquer disjuntor geral (que estiver acima ou antes do mesmo), enquanto um disjuntor de 40 A somente poderá ser utilizado com disjuntores gerais de 100 A.

A coordenação e seletividade entre dispositivos de proteção é realizada para que atue sempre, em primeiro momento, o elemento que estiver mais próximo do dispositivo ou local onde ocorre a falha, evitando que se desligue toda a instalação. Assim, se a coordenação for feita corretamente, o circuito sob falha será isolado dos demais, evitando o desligamento dos demais circuitos e equipamentos da instalação.

Tabela 15 – Valores de correntes nominais de disjuntores termomagnéticos usados sequencialmente em circuitos elétricos.

Disjuntor menor (abaixo ou a jusante) (A)	Disjuntor maior (acima ou a montante) (A)										
	15	20	25	30	35	40	50	60	70	90	100
6	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
10			x	x	x	x	x	x	x	x	x
15						x	x	x	x	x	x
20							x	x	x	x	x
25									x	x	x
30										x	x
35										x	x
40											x

Fonte: Adaptado de (Mussoi, 2016, apud Cotrim, 2009).

A NBR 5410 exige a utilização de proteção diferencial residual (disjuntor ou interruptor) de alta sensibilidade (corrente menor que 30 mA) em circuitos terminais para os seguintes casos especificados:

- Os circuitos que sirvam a pontos de utilização situados em locais contendo banheira ou chuveiro;
- Os circuitos que alimentem tomadas de corrente situadas em áreas externas à edificação;
- Os circuitos de tomadas de corrente situadas em áreas internas que possam vir a alimentar equipamentos no exterior;
- Os circuitos que, em locais de habitação, sirvam a pontos de utilização situados em cozinhas, copas-cozinhas, lavanderias, áreas de serviço, garagens e demais dependências internas molhadas em uso normal ou sujeitas a lavagens;
- Os circuitos que, em edificações não-residenciais, sirvam a pontos de tomada situados em cozinhas, copas-cozinhas, lavanderias, áreas de serviço, garagens e, no geral, em áreas internas molhadas em uso normal ou sujeitas a lavagens.

Em caso de utilização de interruptor diferencial-residual, este poderá ser dimensionado e instalado junto a proteção geral, neste caso servindo para a instalação elétrica como um todo. No entanto, ao ocorrer falha de isolamento ou choque elétrico, o dispositivo de proteção desligará a instalação toda, não sendo possível isolar o circuito sob falha, para manter os demais em funcionamento normal.

2.9 Quadro de distribuição

O(s) quadro(s) de distribuição deve(m) ser instalado(s) em local de fácil acesso, desimpedido e o mais próximo possível do medidor, visando diminuir a distância da fiação e as quedas de tensão no caminho; além do custo necessário para os condutores que conectam o circuito de medição no quadro de medição até o mesmo.

O tamanho do quadro de distribuição, isto é, levando em conta a quantidade de elementos que podem ser montados no mesmo, deve considerar a possibilidade de ampliação futura. Assim, deve-se prever a possibilidade de instalar 2 ou mais circuitos em ampliações quando da aquisição de novos equipamentos, alterações na edificação, dentre outras possibilidades de mudanças que ocorrem frequentemente ao longo do uso e do passar do tempo. Estes circuitos para fins de ampliação podem ser considerados de uso específico com potência intermediária ou alta, em consideração aos demais elementos da instalação elétrica.

É importante considerar que as potências previstas para os circuitos de ampliação,

também chamados de circuitos de reserva ou espera, deverão ser computadas na obtenção da potência total da instalação e conseqüentemente irão contribuir na definição da demanda especificada para a concessionária de energia elétrica e no tipo de fornecimento de energia elétrica. Assim, é necessário ter bom senso e ponderar sobre a área física do terreno do usuário, isto é, terrenos maiores ou sítios e chácaras, implicam em maiores possibilidades de ampliação da área construída no futuro.

2.10 Dimensionamento dos eletrodutos

O dimensionamento dos eletrodutos consiste em determinar sua seção ou diâmetro para cada trecho ou circuito da instalação elétrica. O tamanho nominal do eletroduto é seu diâmetro externo expresso em milímetros, conforme especificado em norma.

Em termos práticos, é recomendável que os condutores não ocupem mais do que 40% da área útil dos eletrodutos.

A Tabela 16 apresenta o diâmetro dos eletrodutos em função da seção nominal dos condutores e a quantidade de condutores carregados em seu interior. Ao se utilizar condutores de diferentes seções, deve-se considerar aquele de maior seção para a escolha do eletroduto.

Tabela 16 – Escolha do eletroduto em função da seção dos condutores e número de condutores carregados.

Seção nominal dos condutores (mm ²)	Diâmetro dos eletrodutos (mm)								
	Número de condutores carregados								
	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1,5	16	16	16	16	16	16	20	20	20
2,5	16	16	16	20	20	20	20	25	25
4	16	16	20	20	20	25	25	25	25
6	16	20	20	25	25	25	25	32	32
10	20	20	25	25	32	32	32	40	40
16	20	25	25	32	32	40	40	40	40
25	25	32	32	40	40	40	50	50	50
35	25	32	40	40	50	50	50	50	60
50	32	40	40	50	50	60	60	60	75
70	40	40	50	60	60	60	75	75	75
95	40	50	60	60	75	75	75	85	85
120	50	50	60	75	75	75	85	85	-
150	50	60	75	75	85	85	-	-	-
185	50	75	75	85	85	-	-	-	-
240	60	75	85	-	-	-	-	-	-

Fonte: Adaptado de (Prysmian, 2006).

2.11 Locação dos elementos sobre a planta baixa

A locação dos diversos elementos da instalação sobre a planta baixa é realizada utilizando a simbologia específica em termos de diagramas unifilares.

A distribuição dos elementos de iluminação (lâmpadas e interruptores) e tomadas deve ser feita de maneira racional e conforme a funcionalidade desejada, sendo importante consultar os usuários finais sobre as melhores localizações destes elementos, levando em conta as implicações e viabilidade técnica para cada caso em particular.

Os critérios estéticos são importantes, mas não devem prevalecer perante critérios técnicos, devendo-se fazer as escolhas adequadas conforme regulamentado pelas normas ou projeto realizado.

O quadro de distribuição deve ser localizado em local de fácil acesso e o mais próximo possível do quadro de medição, levando-se em conta também a distância para os circuitos terminais. Assim, é comum se localizar o quadro de distribuição no corredor principal da edificação, não sendo correto e seguro instalar o mesmo atrás de portas, por exemplo.

Ao locar os eletrodutos, partir do quadro de distribuição em direção aos elementos da instalação, traçando seu caminho buscando diminuir a distância entre os pontos de ligação. Em geral, parte-se do quadro de distribuição em direção ao ponto de luz no teto do cômodo, saindo daí em direção aos interruptores e tomadas.

Em termos práticos, não se recomenda instalar mais do que 6 ou 7 condutores por eletroduto, pois do contrário se teria dificuldades para realizar a instalação da fiação e se teria que aplicar fatores de correção devido ao agrupamento de circuitos no mesmo duto.

3 Metodologia de Projeto

A partir das recomendações técnicas, normativas e práticas apresentadas no capítulo anterior, pode-se realizar o projeto elétrico de uma instalação em baixa tensão e uso residencial, por exemplo.

A seguir serão apresentadas as etapas a serem adotadas para realizar o projeto elétrico, sendo que as mesmas podem ser adaptadas pelo projetista conforme melhor lhe convier.

3.1 Determinar os pontos de iluminação

A partir dos critérios técnicos e recomendados pela NBR 5410, determina-se a quantidade e potências das lâmpadas para cada ambiente da instalação elétrica.

A Tabela 17 pode ser utilizada para registrar a potência escolhida, após registrar na mesma o nome do ambiente (cômodo), sua área e perímetro, que auxiliarão na determinação dos elementos de iluminação e pontos de tomadas do projeto.

O fator de potência para as tomadas de uso específico deve ser obtido diretamente para o equipamento que será alimentado pelas mesmas.

Os valores obtidos podem ser registrados na Tabela 18.

3.5 Locar os elementos de iluminação e de conexão (tomadas)

É recomendável fazer a locação sobre a planta baixa dos elementos de iluminação e de força (tomadas), visando se fazer ajustes no quantitativo de pontos conforme as necessidades dos usuários ou funcionalidades desejadas em cada ambiente.

A Figura 3 mostra um exemplo de disposição dos elementos de iluminação e de força sobre a planta baixa da edificação.

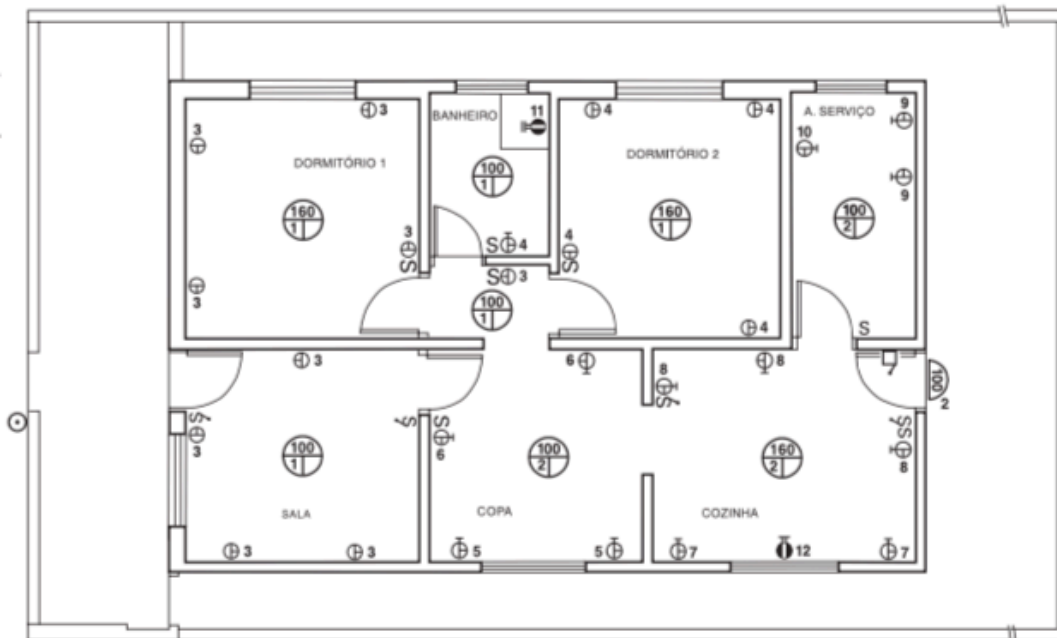


Figura 3 – Exemplo de locação dos elementos sobre a planta baixa.

Fonte: (Prysmian, 2006).

3.6 Calcular a potência total da instalação

Após o cálculo das potências ativas totais dos circuitos de iluminação e de força, considerando o fator de demanda aplicável ao projeto, pode-se obter a potência total demandada pela instalação elétrica.

3.7 Determinar o tipo de fornecimento de energia elétrica

A partir da potência ativa total demandada pela unidade consumidora, pode-se consultar a regulamentação da concessionária de energia elétrica e determinar o tipo de fornecimento de energia elétrica.

Em Santa Catarina, em geral, se deve consultar a Norma Técnica N-321.0001 da CELESC para definir o tipo de fornecimento de energia elétrica permitido para o projeto que está sendo realizado. Os dados obtidos na norma da concessionária de energia elétrica podem ser reproduzidos na Tabela 19, para serem anexados à documentação do projeto que está sendo realizado.

Tabela 19 – Dados da entrada de energia elétrica.

Potência ativa total demandada (kW)	
Potência aparente total demanda (kVA)	
Tipo de fornecimento	
Categoria do fornecimento	
Tensão de alimentação (V)	
Número de fases	
Número de fios	
Disjuntor geral (A)	
Ramal de ligação	
Ramais de entrada e saída	
Condutor de proteção	
Eletroduto	

Fonte: Adaptado de (Norma Técnica N-321.0001, CELESC, 2019).

3.8 Locar os quadros de medição e de distribuição

Em seguida pode-se localizar sobre a planta baixa da edificação os quadros de medição e de distribuição, seguindo as recomendações técnicas do capítulo anterior.

3.9 Divisão e agrupamento de circuitos

A partir da definição do tipo de fornecimento de energia elétrica e do número de condutores fase da instalação, pode-se fazer o grupo de circuitos parciais e sua divisão em diferentes circuitos terminais. Os resultados podem ser registrados em uma planilha, a exemplo da Tabela 20, que pode ser utilizada para elaboração do quadro de cargas, que deverá constar na documentação do projeto da instalação elétrica.

Tabela 20 – Exemplo para elaboração de quadro de cargas.

Circuitos terminais		Iluminação (VA)	Tomadas de uso geral (TUG) (VA)	Tomadas de uso específico (TUE) (W)	Fase	Condutor (mm ²)	Disjuntor termomagnético (A)	Disjuntor diferencial-residual (DR, I _{prot} <30 mA) (A)
Nº	Descrição							

Fonte: Adaptado de (Mussoi, 2016).

3.10 Representação dos eletrodutos e fiação na planta baixa

Após a definição do número de circuitos e dos agrupamentos necessários, pode-se realizar o traçado das linhas elétricas (eletrodutos) sobre a planta baixa e a seguir interconectar os elementos dos diversos circuitos.

O primeiro trecho de eletrodutos será saindo do quadro de medição até o quadro de distribuição, no interior da edificação.

A seguir são desenhados os trechos internos, isto é, aqueles entre o quadro de distribuição e os elementos terminais. Neste caso, em geral os eletrodutos são desenhados saindo do quadro de distribuição até o ponto de luz no teto e no centro do ambiente, para então derivar saídas para os diversos pontos na parede. Em alguns casos pode-se sair diretamente do quadro de distribuição até as caixas terminais na parede ou piso.

Os condutores são representados no diagrama unifilar, desenhado sobre a planta baixa da edificação, fazendo-se a interconexão dos diversos elementos da instalação elétrica, a exemplo do mostrado na Figura 4.

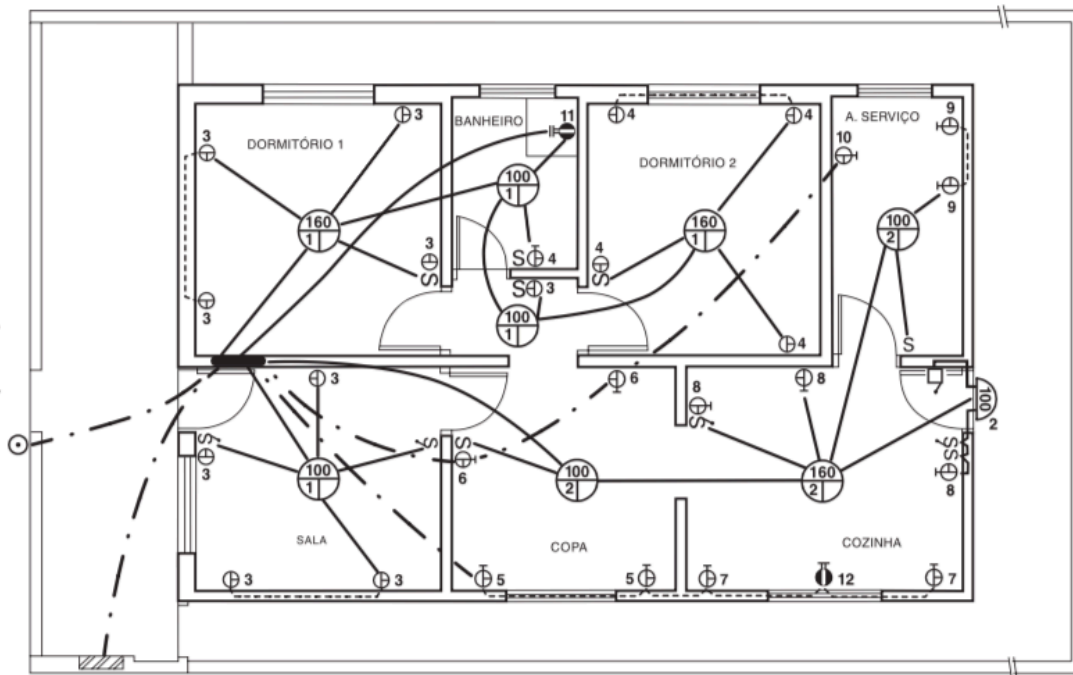


Figura 4 – Exemplo de diagrama unifilar de uma instalação elétrica.

Fonte: (Prysmian, 2006).

3.11 Dimensionamento dos condutores

O dimensionamento dos condutores para cada circuito terminal, após o agrupamento e divisão em subcircuitos, é realizado conforme apresentado no capítulo anterior.

3.12 Dimensionamento da proteção

Os elementos de proteção serão dimensionados a partir da potência do circuito terminal e dos condutores escolhidos para o mesmo. Os resultados podem ser registrados no quadro de cargas, isto é, na Tabela 20.

3.13 Dimensionamento dos eletrodutos

Os eletrodutos são dimensionados em função da seção e da quantidade de condutores em cada trecho da instalação, conforme visto no capítulo anterior.

3.14 Locação e previsão de circuitos auxiliares

Os circuitos auxiliares, tais como: alarme, sinalização, sinais de telefone, internet e televisão, podem ser previstos no projeto da instalação elétrica, sendo usual se utilizar cores diferentes para os pontos de tomadas e eletrodutos destes circuitos.

A representação em diagrama unifilar dos circuitos auxiliares pode ser feita no mesmo diagrama da instalação elétrica ou em planta separada, conforme convier ao projetista.

3.15 Elaborar diagrama unifilar do quadro de distribuição

O diagrama unifilar do quadro de distribuição deve ser elaborado para detalhar os elementos de proteção e sua interconexão e sequenciamento, evitando erros de montagem durante a execução do projeto, por exemplo.

3.16 Elaborar a legenda dos elementos da instalação

Após a representação das conexões dos elementos no diagrama unifilar, deve-se elaborar a legenda do projeto, que fará parte da documentação do mesmo.

3.17 Descrever detalhes e informações adicionais

O detalhamento sobre alguma parte específica, além das informações adicionais sobre o projeto realizado devem ser descritas na planta baixa, em quadros identificados, a exemplo do mostrado na Figura 1.

3.18 Elaborar memorial descritivo do projeto realizado

Ao final do projeto da instalação elétrica, deve ser elaborado um memorial descrito do trabalho realizado, que será incorporado à documentação completa da parte elétrica da edificação.

Ao memorial descritivo pode ser incorporado o memorial de cálculo, com o detalhamento dos cálculos utilizados ao longo do projeto e conseqüente valores obtidos.

4 Exemplo de Projeto

A título de exemplo, será realizado um projeto completo de uma edificação simples, com um dormitório, com sua planta baixa mostrada na Figura 5.

É importante ressaltar que esta edificação é fictícia, isto é, o projeto tem as dimensões típicas de uma planta residencial, mas tem apenas objetivos didáticos neste documento.

As escolhas realizadas e os valores obtidos podem variar conforme a metodologia utilizada por cada projetista, tendo-se inclusive possibilidade de erros ou melhorias a serem feitas no projeto ora apresentado.

4.1 Determinar os pontos de iluminação

Inicialmente, considerando a planta baixa da edificação e as medidas de cada ambiente, se preenchem na Tabela 21 a área e o perímetro dos cômodos da mesma.

A seguir, conforme as recomendações da NBR 5410, se determinaram as potências da iluminação considerando a área de cada ambiente, anotando-se os valores obtidos na Tabela 21.

Assim, se tem:

- Sala – Área de 14 m², atribuindo-se 100 VA para os primeiros 6 m² e 60 VA para cada 4 m² adicionais, resultando em 220 VA;
- Quarto – Área de 7,5 m², utilizando-se 100 VA pois não se tem 4 m² inteiros acima dos 6 m² iniciais;
- Cozinha – Área de 6 m², atribuindo-se 100 VA;
- Banheiro – Área de 5 m², atribuindo-se 100 VA;
- Corredor – Área de 3 m², atribuindo-se 100 VA;
- Área externa – Atribui-se 100 VA;
- Ampliação – Não possuirá iluminação.

Tabela 21 – Distribuição das cargas por ambiente da edificação.

Ambiente	Dimensões		Iluminação		Tomada de uso geral (TUG)			Tomada de uso específico (TUE)		
	Área (m ²)	Perímetro (m)	Potência mínima (VA)	Potência escolhida (VA)	Quantidade mínima	Quantidade escolhida	Potência (VA)	Quantidade	Identificação	Potência (W)
Sala	14	15	220	220	3	5	500	1	Ar-condicionado	1.400
Quarto	7,5	11	100	100	2	4	400	1	Ar-condicionado	1.400
Cozinha	6	10	100	100	3	4	1900	1	Secadora roupa	3.500
								1	Torneira elétrica	2.500
								1	Forno elétrico	3.000
Banheiro	5	9	100	100	1	1	600	1	Chuveiro	5.500
Corredor	3	8	100	100	1	1	100	-	-	-
Exterior	-	-	-	100	-	-	-	-	-	-
Ampliação	-	-	-	-	-	-	-	1	A definir	2.500
Totais	35,5	-	620	720	-	-	3500	7	-	19.800

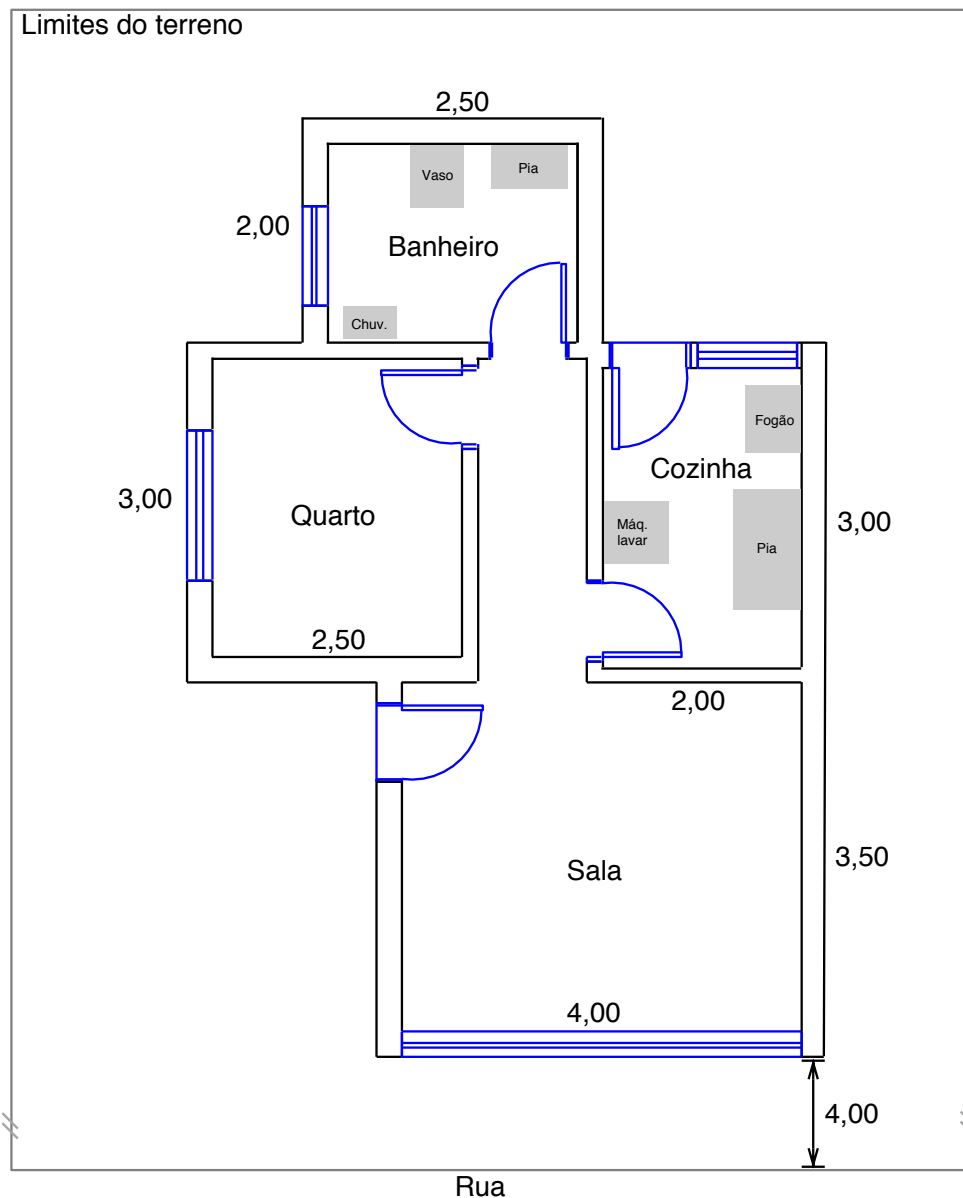


Figura 5 – Planta baixa simples de edificação típica.

4.2 Calcular a potência ativa da iluminação

A potência ativa da instalação é calculada aplicando-se fator de potência unitário, resultando no mesmo valor que a potência aparente, conforme registrado na Tabela 22.

Tabela 22 – Cálculo da potência ativa total da instalação.

Elemento	Potência aparente (VA)	Fator de potência	Potência ativa (W)
Iluminação	720	1	720
Tomadas de uso geral (TUG)	3.500	0,8	2.800
Tomadas de uso específico (TUE)	-	-	19.800
Total			23.320

4.3 Determinar os pontos de conexão (tomadas)

A partir dos critérios técnicos e recomendados pela NBR 5410, determina-se a quantidade e potências das tomadas de uso geral (TUG) e específicas (TUE) da instalação.

O número mínimo de pontos de tomadas, conforme a NBR 5410 será:

- Sala – Um ponto de tomada a cada 5 m de perímetro, tendo-se então 3 pontos para o perímetro de 15 m;
- Quarto – Um ponto de tomada a cada 5 m de perímetro, tendo-se então 2 pontos para o perímetro de 11 m;
- Cozinha – Um ponto de tomada a cada 3,5 m de perímetro, tendo-se então 3 pontos para o perímetro de 10 m, onde no mínimo 2 pontos devem estar acima da bancada da pia;
- Corredor – Ao menos um ponto de tomada;
- Banheiro – Ao menos um ponto de tomada afastado de 60 cm do boxe.

Em relação a potência mínima dos pontos de tomadas, se terá, conforme a NBR 5410:

- Sala – Pontos com potência mínima de 100 VA. Serão utilizados 5 pontos de tomadas de uso geral e um ponto de tomada de uso específico para ar-condicionado;
- Quarto – Pontos com potência mínima de 100 VA. Serão utilizados 4 pontos de tomadas de uso geral e um ponto de tomada de uso específico para ar-condicionado;
- Cozinha – Potência de 600 VA para os 3 primeiros pontos e 100 VA para os pontos excedentes. Serão utilizados 4 pontos de tomadas de uso geral e 3 pontos de tomadas de uso específico;
- Banheiro – Potência de 600 VA para os 3 primeiros pontos e 100 VA para os pontos excedentes. Será utilizado um ponto de tomada de uso geral e um ponto de tomada de uso específico para o chuveiro;
- Corredor – Pontos com potência mínima de 100 VA. Será utilizado 1 ponto de tomada de uso geral.

Utiliza-se a Tabela 21 para o registro da quantidade e potência dos pontos de tomadas para cada ambiente da edificação, onde pode-se notar que foi deixado um circuito independente para ampliações futuras.

4.4 Calcular a potência ativa do circuito de força (tomadas)

A potência ativa das tomadas de uso geral é calculada aplicando-se um fator de potência de 0,8, conforme mostrado na Tabela 22.

Por sua vez, as tomadas de uso específico são especificadas diretamente com sua potência ativa, não sendo necessário realizar o cálculo a partir do fator de potência das mesmas. No entanto, para determinar a corrente eficaz nestes circuitos se precisará obter o fator de potência para cada elemento alimentado por tomadas de uso específico.

4.5 Locar os elementos de iluminação e de conexão (tomadas)

Após de determinar os quantitativos para os elementos de iluminação e de conexão (tomadas), pode-se locar os mesmos sobre a planta baixa, visando ajustes necessários, caso se perceba alguma inconsistência ou incoerência no projeto realizado até o momento. Assim, a Figura 6 apresenta a planta baixa com os pontos de iluminação e tomadas locados sobre a mesma, onde se nota que para as tomadas de uso específico se especifica a potência ativa junto as mesmas, o que também é feito para a potência aparente superior a 100 VA para as tomadas de uso geral.

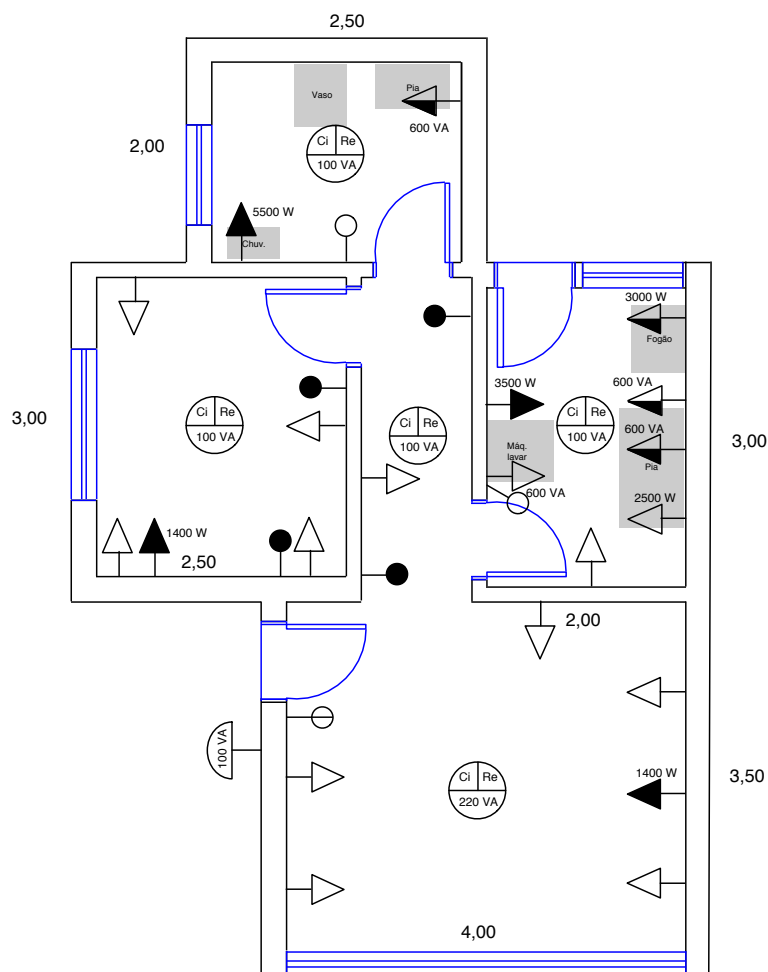


Figura 6 – Localização dos elementos pontos de iluminação e tomadas na planta baixa.

4.6 Calcular a potência total da instalação

A potência ativa total dos circuitos de iluminação e de tomadas de uso geral é de $720 + 2.800 = 3.520$ W. Assim, consultando a Tabela 1, obtém-se um fator de demanda de 0,59, o que implica em uma nova potência total para estes circuitos de 2.076,8 W, obtida pela multiplicação de 3.520 por 0,59.

Por sua vez, a potência total dos circuitos de tomadas de uso específico é de 19.800 W, obtido pela previsão de 7 pontos de tomadas. Assim, consultando a Tabela 2, obtém-se um fator de demanda de 0,60. Deste modo, a nova potência total dos circuitos de tomadas de uso específico será de 11.880 W, obtidos multiplicando-se 19.800 por 0,60.

Portanto, a potência ativa total da instalação será de $2.076,8 + 11.880$, resultando em 13.956,8 W, que será considerada como a potência demandada pela unidade consumidora.

4.7 Determinar o tipo de fornecimento de energia elétrica

A partir da potência ativa total demanda pela unidade consumidora, neste caso de 13.956,8 W, consultando a Norma Técnica N-321.0001 da CELESC, se determina que o fornecimento será monofásico, em 220 V, categoria A4. Os dados obtidos consultando-se a norma, com base na definição do tipo de fornecimento de energia elétrica, são apresentados na Tabela 23.

Tabela 23 – Dados da entrada de energia elétrica.

Potência ativa total demandada (kW)	13,96
Tipo de fornecimento	Monofásico 220 V
Categoria do fornecimento	A4
Tensão de alimentação (V)	220
Número de fases	1
Número de fios	2
Disjuntor geral (A)	70
Ramal de ligação (mm ²), condutor de cobre	10
Ramais de entrada e saída (mm ²), condutor de cobre e isolamento de PVC	16
Condutor de proteção (mm ²), cobre	16
Eletroduto (polegada)	1

4.8 Locar os quadros de medição e distribuição

A medição será localizada nos limites do terreno e considerando este ser um exemplo de projeto didático, ou seja, partindo-se de uma situação fictícia, não serão detalhados todos os elementos e aspectos técnicos relacionados com a entrada de energia elétrica e a medição.

O quadro de distribuição será localizado no corredor da edificação, ficando acessível facilmente dos diversos ambientes da mesma.

4.9 Divisão e agrupamento de circuitos

A partir da definição do tipo de fornecimento de energia, pode-se agrupar os diversos circuitos, visando a elaboração do quadro de cargas e também a definição dos condutores e da proteção. Os elementos de iluminação serão agrupados em um único circuito, visto a potência total ser baixa.

As tomadas de uso geral foram divididas em 2 circuitos, um para a cozinha e outro para os demais ambientes. As tomadas de uso específico constituem circuitos independentes.

Após a divisão e agrupamento em circuitos, podem-se identificar os elementos locados anteriormente na planta baixa, conforme mostrado na Figura 7. A Tabela 24 apresenta o agrupamento realizado, representando o quadro de cargas da instalação elétrica.

Tabela 24 – Quadro de cargas e agrupamento de circuitos.

Circuitos terminais		Iluminação (VA)	Tomadas de uso geral (TUG) (VA)	Tomadas de uso específico (TUE) (W)	Fase	Condutor (mm ²)	Disjuntor termomagnético (A)	Disjuntor diferencial-residual (DR, I _{prot} <30 mA) (A)
Nº	Descrição							
1	Iluminação	720	-	-	1	1,5	10	-
2	TUG geral	-	1.600	-	1	2,5	15	-
3	TUG cozinha	-	1.900	-	1	2,5	15	25
4	TUE sala	-	-	1.400	1	2,5	15	-
5	TUE quarto	-	-	1.400	1	2,5	15	-
6	TUE cozinha	-	-	3.500	1	2,5	20	25
7	TUE cozinha	-	-	2.500	1	2,5	15	25
8	TUE cozinha	-	-	3.000	1	2,5	15	25
9	TUE banheiro	-	-	5.500	1	6,0	30	40
10	TUE ampla	-	-	2.500	1	4,0	20	-
Geral						10	50	-

4.10 Representação dos eletrodutos e fiação

Ao se definir a divisão em circuitos e ter localizado os elementos de iluminação e de força na planta baixa, pode-se realizar o traçado dos eletrodutos e posteriormente a representação dos condutores em cada trecho da instalação, visando a interconexão dos elementos para a funcionalidade do circuito.

Os eletrodutos são traçados saindo do quadro de distribuição, em direção às caixas dos pontos de iluminação no teto e, em alguns casos em particular, diretamente para o ponto de alimentação.

A Figura 8 mostra o resultado da representação das linhas elétricas (eletrodutos) sobre a planta baixa da edificação. Observe que a seção dos pontos de iluminação está indicando para cada lâmpada, qual interruptor correspondente fará seu comando.

A Figura 9 apresenta o diagrama unifilar completo da instalação elétrica, ou seja, com a locação de todos os elementos, dos eletrodutos e dos condutores provendo a interconexão de todos os elementos dos circuitos previstos.

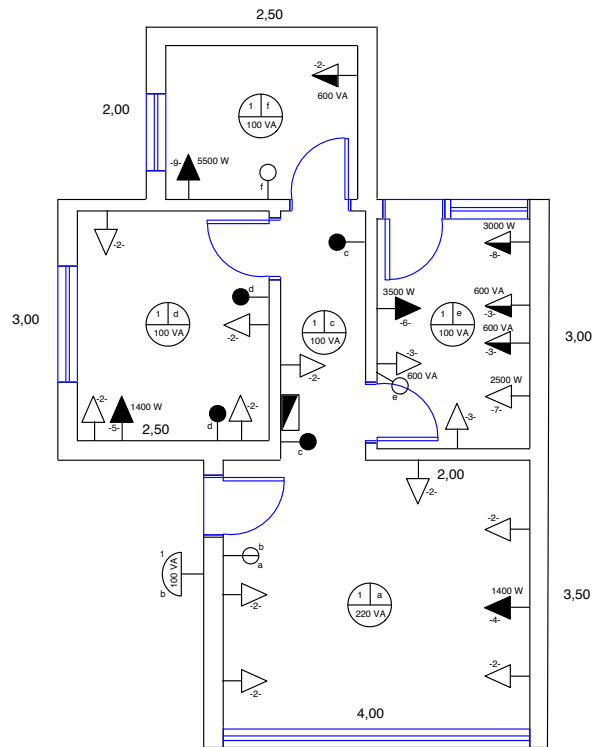


Figura 7 – Elementos identificados conforme dos circuitos terminais da instalação.

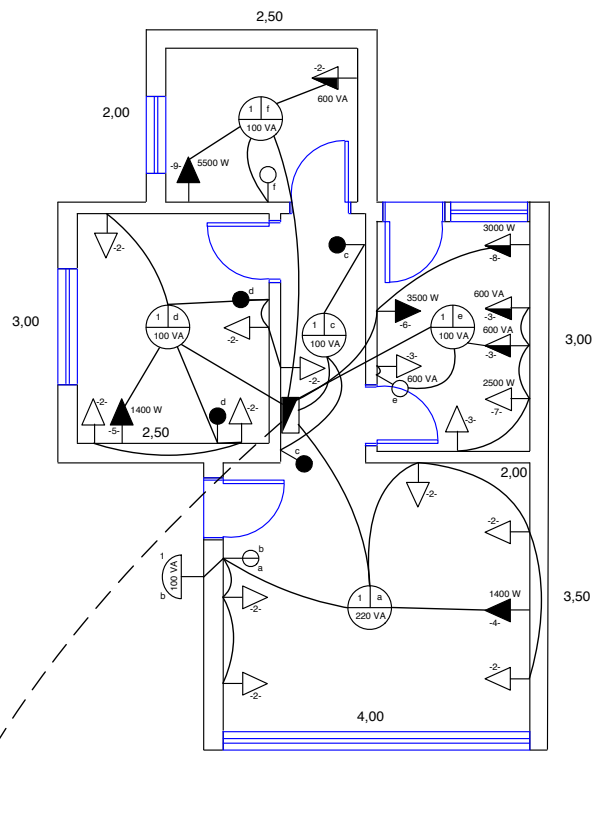


Figura 8 – Representação das linhas elétricas (eletrodutos) sobre a planta baixa.

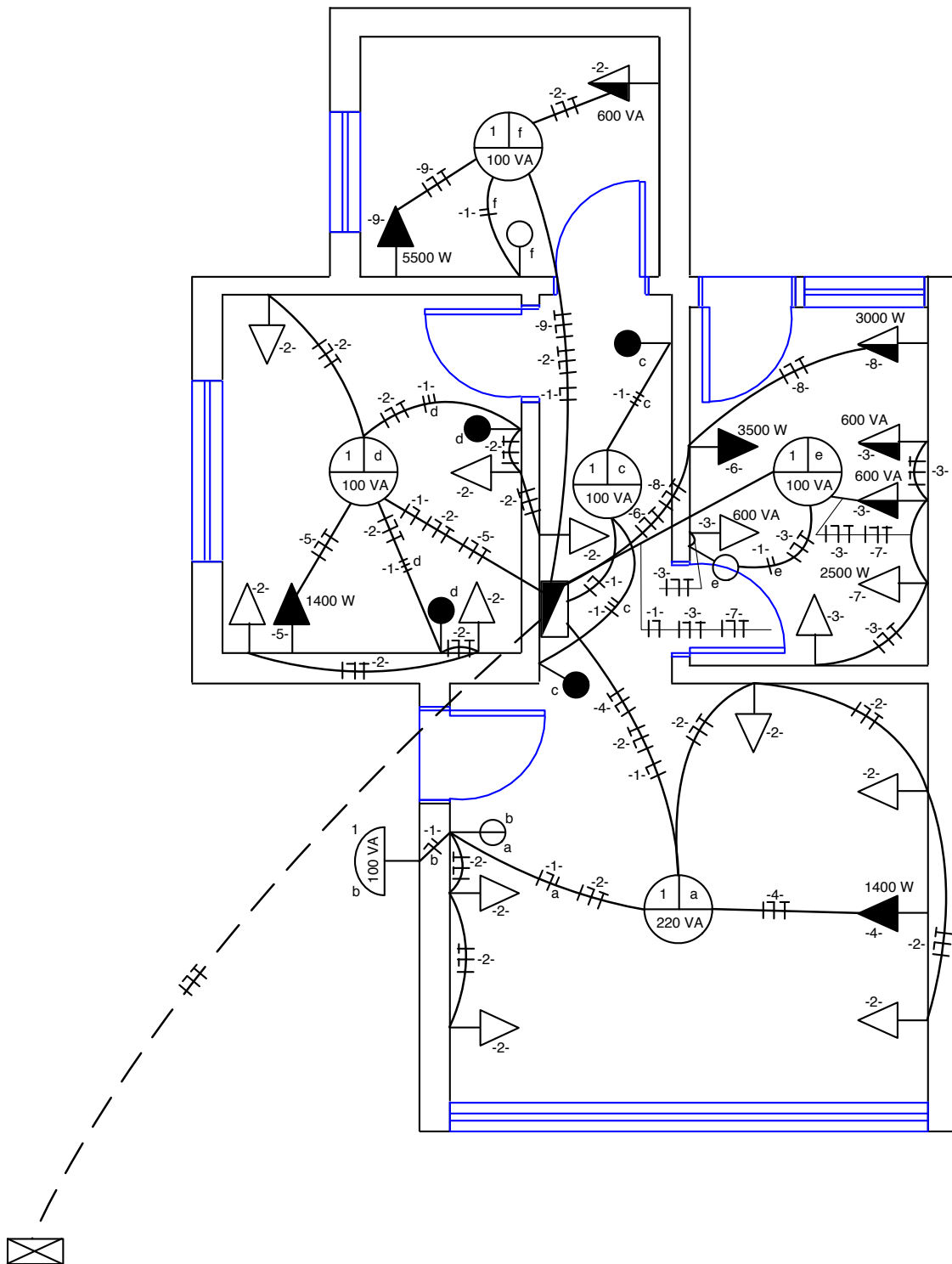


Figura 9 – Representação dos condutores e interconexões dos diferentes elementos da instalação elétrica.

4.11 Dimensionamento dos condutores

O dimensionamento dos condutores é realizado a partir das correntes dos diversos circuitos. Assim, a partir das potências aparentes dos circuitos agrupados, tem-se:

- Circuito 1 – Potência aparente de 720 VA, resultando em uma corrente eficaz de 3,27 A, obtida dividindo-se a potência aparente pela tensão de 220 V;

- Circuito 2 – Potência aparente de 1.600 VA, resultando em uma corrente eficaz de 7,27 A;
- Circuito 3 – Potência aparente de 1.900 VA, resultando em uma corrente eficaz de 8,64 A;
- Circuito 4 – Potência ativa de 1.400 W. Neste caso, precisa-se do fator de potência do equipamento, que para condicionadores de ar é considerado entre 0,6 e 0,8. Adotando-se o valor de 0,8, se obtém uma potência aparente de 2.000 VA, resultado de 1.400 divididos por 0,8. Assim, a corrente eficaz será de 9,09 A, obtida dividindo-se 2.000 por 220;
- Circuito 5 – Potência ativa de 1.400 W. Em sendo um condicionador de ar, adota-se o valor de 0,8 para o fator de potência, resultando em potência aparente de 2.000 VA e em uma corrente eficaz de 9,09 A;
- Circuito 6 – Potência ativa de 3.500 W. Em sendo uma secadora de roupas, será considerada uma carga resistiva, com fator de potência unitário, resultando em potência aparente de 3.500 VA e em uma corrente eficaz de 15,9 A;
- Circuito 7 – Potência ativa de 2.500 W. Em sendo uma torneira elétrica, será considerada uma carga resistiva, com fator de potência unitário, resultando em potência aparente de 2.500 VA e em uma corrente eficaz de 11,36 A;
- Circuito 8 – Potência ativa de 3.000 W. Em sendo um forno elétrico, será considerado uma carga resistiva, com fator de potência unitário, resultando em potência aparente de 3.000 VA e em uma corrente eficaz de 13,64 A;
- Circuito 9 – Potência ativa de 5.500 W. Em sendo um chuveiro elétrico, será considerado uma carga resistiva, com fator de potência unitário, resultando em potência aparente de 5.500 VA e em uma corrente eficaz de 25 A;
- Circuito 10 – Potência ativa de 2.500 W. Como este circuito é para expansão futura da instalação elétrica em função da aquisição de algum equipamento novo, por exemplo, será considerado um fator de potência de 0,7. Assim, a potência aparente será de 3571,43 VA e a corrente eficaz de 16,23 A.

O método de instalação será B1, com condutores de cobre com isolamento de PVC, acondicionados em eletrodutos embutidos em parede de alvenaria, considerando-se a temperatura ambiente de 30 °C.

A partir da Tabela 6, para o método B1 e para 2 condutores carregados, se obtém as seções dos condutores, para registro na Tabela 24, ou seja, no quadro de cargas da instalação

elétrica. Deve-se atentar para a seção mínima indicada na Tabela 3.

Ainda, a partir da Figura 9, pode-se perceber que em alguns trechos ocorre o agrupamento de 3 circuitos em um mesmo eletroduto. Assim, deve aplicar o fator de correção da Tabela 11, neste caso de 0,70.

Portanto se teria que:

- Condutor de 1,5 mm² – Tem capacidade de corrente de 17,5 A conforme a Tabela 6. Aplicando o fator de correção de 0,70, sua capacidade seria de 12,25 A, que ainda está muito acima de 3,27 A calculados para o circuito de iluminação (1);
- Condutor de 2,5 mm² – Tem capacidade de corrente de 24 A conforme a Tabela 6. Aplicando o fator de correção de 0,70, sua capacidade seria de 16,8 A, que ainda está acima de 15,9 A calculados para o circuito de tomadas de uso específico para alimentação de uma secadora de roupas (6), considerando-se que este seja o circuito com a maior corrente entre aqueles que utilizam condutor com seção de 2,5 mm². O circuito 10, para ampliação futura, havia sido previsto com condutores de 2,5 mm², no entanto, em virtude de não se conhecer os trechos de eletrodutos que poderão ser usados no futuro, é prudente alterar a seção do condutor para 4 mm² ;
- Condutor de 4 mm² – Tem capacidade de corrente de 32 A conforme a Tabela 6. Aplicando o fator de correção de 0,70, sua capacidade seria de 22,4 A, que está abaixo dos 25 A calculados para o circuito de alimentação do chuveiro (9). Assim, neste caso se precisa alterar a seção do circuito 9, aumentando a mesma para 6 mm².

A título de verificação, será realizado o cálculo do critério da queda de tensão para os condutores de alimentação do chuveiro, estimando-se uma distância de aproximadamente 5 metros entre o quadro de distribuição e o ponto de conexão do elemento terminal.

Assim, a queda de tensão máxima em V/A.km será:

$$\Delta V = \frac{\Delta V(\%) \cdot V_n}{I \cdot L \cdot 100} = \frac{4 \cdot 220}{25 \cdot 0,005 \cdot 100} = 70,4 \frac{V}{A \cdot km}$$

Consultando a Tabela 12, nota-se que para eletrodutos não-magnéticos e circuitos monofásicos, o condutor de 1,5 mm² resulta em uma queda de tensão de 23,3 V/A.km, significando que para o valor calculado seria possível utilizar condutores com seções inferiores aquelas apresentadas na tabela, o que não se aplica neste caso. Assim, quando as distâncias forem pequenas e as correntes com valores convencionais para as cargas típicas de uma instalação

residencial em baixa tensão, o critério da escolha dos condutores pela corrente eficaz ou pelo estipulado na norma levará a seção maior do que pelo critério da queda de tensão, não sendo necessário aplicar o mesmo.

Os condutores de proteção de todos os circuitos terminais terão a mesma seção dos condutores fase, conforme pode ser verificado na Tabela 4.

4.12 Dimensionamento da proteção

Os disjuntores termomagnéticos são escolhidos em função da seção dos condutores definida anteriormente e consultando-se a Tabela 13, preenchendo-se os valores obtidos diretamente na Tabela 24, isto é, no quadro de cargas do projeto. Considerou-se 3 circuitos para o mesmo eletroduto, conforme se pode observar na Figura 9.

Em específico para os circuitos terminais 6 (secadora de roupas e 9 (alimentação do chuveiro) se utilizou o disjuntor imediatamente acima daquele indicado na Tabela 13, pois do contrário a corrente do circuito estaria igual ou acima da corrente nominal do disjuntor, o que implicaria em funcionamento incorreto do circuito.

É importante destacar que na Tabela 13, ao se considerar 6 condutores carregados (3 circuitos no eletroduto), se está usando um critério conservador, isto é, que todos os condutores estariam conduzindo a corrente máxima do circuito que estão alimentando, o que, em geral, não ocorre durante o uso convencional da instalação elétrica em uma residência com finalidade residencial.

O disjuntor geral do quadro de distribuição será de 50 A, para estar abaixo do disjuntor geral da medição e acima do maior valor dos circuitos terminais. Neste caso não foi possível atender plenamente o critério de seletividade da Tabela 15. De todo modo se realizou a coordenação entre os elementos de proteção, visto os valores estarem escalonados dos circuitos terminais até a entrada de energia elétrica. A partir da escolha do disjuntor de 50 A, pode consultar a Tabela 14 e escolher a seção dos condutores que conectam o quadro de medição até o quadro de distribuição, sendo os mesmos de 10 mm².

A título de verificação, considerando-se uma distância de em torno de 15 metros do quadro de medição até o quadro de distribuição, aplicando-se o critério da queda de tensão se teria:

$$\Delta V = \frac{\Delta V(\%) \cdot V_n}{I \cdot L \cdot 100} = \frac{4 \cdot 220}{50 \cdot 0,015 \cdot 100} = 11,73 \frac{V}{A \cdot km}$$

Consultando a Tabela 12 se verifica que um condutor de 4 mm² atenderia ao critério da

queda de tensão com folga, o que implica em boa margem de segurança ao se utilizar o condutor de 10 mm².

Ainda, pela Tabela 6 se verifica que o condutor com seção de 10 mm² instalado em eletroduto em parede de alvenaria (método B1) suporta 57 A e se instalado em eletroduto enterrado (método D) suportaria 63 A, confirmando-se a escolha realizada anteriormente.

Os disjuntores diferenciais-residuais serão de 30 mA, sendo utilizados valores comerciais próximos aqueles dos disjuntores termomagnéticos escolhidos anteriormente, anotando-se os valores na Tabela 24. As menores correntes para disjuntores diferenciais-residuais bipolares (fase e neutro) são para 25 A, implicando que este disjuntor será colocado acima do disjuntor termomagnético.

Os dispositivos de proteção contra surtos serão instalados no quadro de distribuição, sendo de 275 V/15 kA, classe II.

4.13 Dimensionamento dos eletrodutos

Os eletrodutos são definidos a partir da Tabela 16, levando em conta a seção e o número de condutores carregados no interior dos mesmos.

É usual se utilizarem eletrodutos de $\frac{3}{4}$ de polegadas, ou seja, de 20 mm de diâmetro externo, que acondiciona, conforme a Tabela 16, 6 condutores carregados com seção de 4 mm². Em termos de área, o eletroduto de 20 mm de diâmetro terá uma área de 186,26 mm², sendo recomendado se utilizar apenas 40% para acondicionamento de condutores, que corresponde a 74,5 mm².

Assim, tomando como base o trecho do quadro de distribuição até o ponto de iluminação no banheiro, por onde passam os condutores da alimentação do chuveiro, que terá 2 condutores 1,5 mm², 3 condutores de 2,5 mm² e 3 condutores de 6 mm², que somam uma área de cobre de 28,5 mm², mas que em termos de área total, considerando a camada de isolamento para condutores flexíveis isolados em PVC, será de 94,3 mm², representará uma ocupação de em torno de 50% da área do eletroduto.

Neste caso se poderia utilizar eletrodutos de 25 mm para os trechos saindo do quadro de distribuição para a sala, quarto, cozinha e banheiro; sendo os demais trechos executados com eletrodutos de 20 mm. Também é usual se utilizar 2 eletrodutos de 20 mm nos trechos críticos, evitando o uso de bitolas diferentes e desperdício de material.

Deste modo, por facilidades práticas, serão utilizados eletrodutos flexíveis de 20 mm para todos os trechos da instalação, tanto internos como externos, neste último caso, do quadro de

medição até o quadro de distribuição; exceto para os trechos do quadro de distribuição até os pontos de iluminação no teto dos seguintes ambientes: sala, quarto, cozinha e banheiro.

4.14 Circuitos auxiliares

A título de exemplo, a Figura 10 apresenta o diagrama unifilar com a representação da entrada dos sinais de dados e imagem e sua distribuição em alguns ambientes da edificação. Normalmente, durante a fase de execução da obra, são instalados os eletrodutos e as caixas, deixando-se a passagem de cabos e instalação de conectores específicos quando da contratação do serviço de telefonia, internet e TV a cabo, por exemplo.

Outros elementos auxiliares, como sensores de presença, alarmes, campainha, interfone, dentre outros, não foram incluídos neste exemplo didático, ficando a critério do projetista inserir os mesmos em seus projetos em acordo com os usuários finais da edificação.

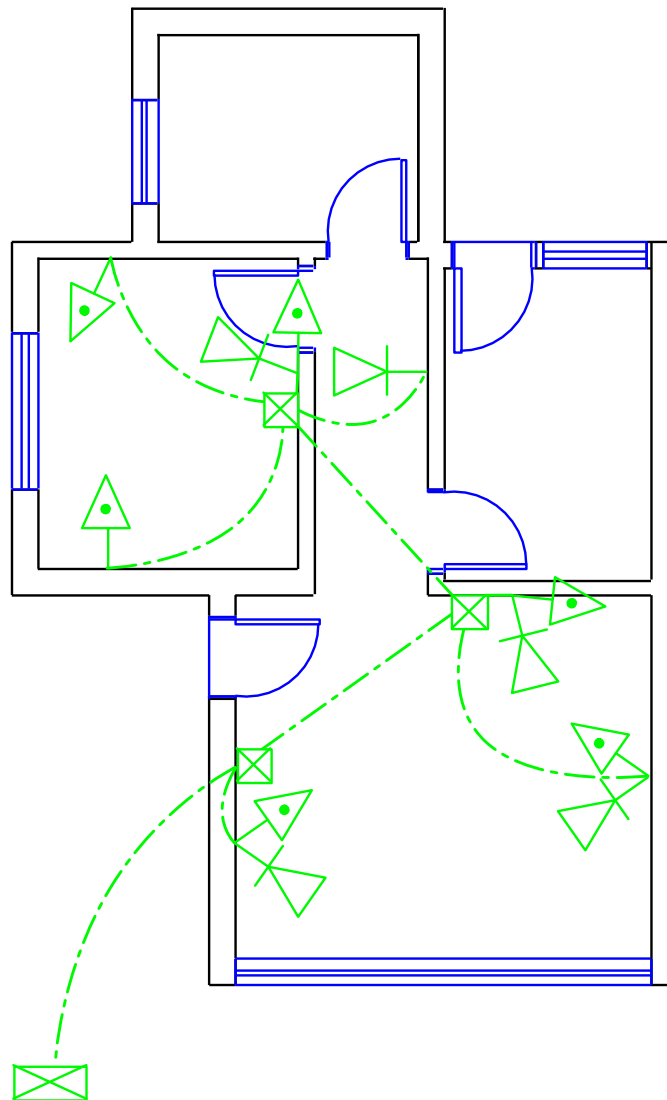
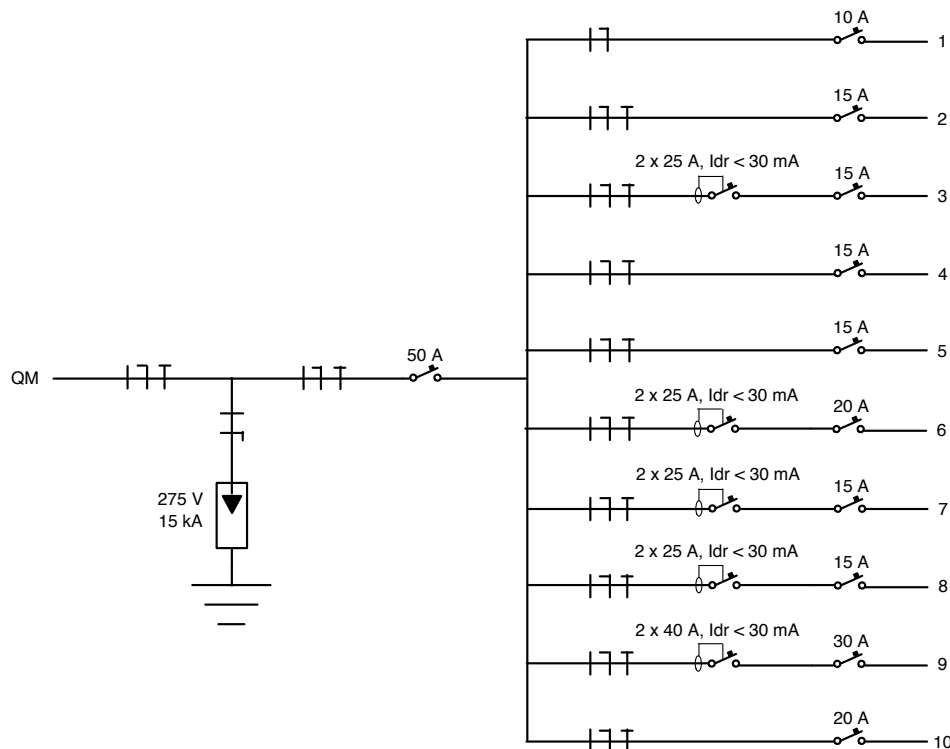


Figura 10 – Representação dos pontos para dados e imagem (internet e TV).

4.15 Diagrama unifilar do quadro de distribuição

É comum apresentar o diagrama unifilar do quadro de distribuição como parte da documentação e/ou da planta de um projeto elétrico de baixa tensão.

Assim, a Figura 11 apresenta o diagrama unifilar do quadro de distribuição do projeto didático realizado.



Nota 1: Nos disjuntores diferenciais-residuais são conectados os condutores fase e neutro.

Nota 2: Nos disjuntores termomagnéticos são conectados apenas os condutores fase.

Figura 11 – Diagrama unifilar do quadro de distribuição.

4.16 Elaboração da legenda









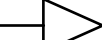












A legenda com os símbolos utilizados no projeto elaborado como exemplo didático é apresentada na Tabela 25.

4.17 Considerações finais sobre o projeto realizado

Este projeto foi apresentado aqui com fins didáticos, não servindo como modelo ou para ser aplicado aos órgãos oficiais para fins de aprovação e execução.

Os procedimentos adotados e as escolhas realizadas podem ser alterados, otimizados e ajustados conforme convier ao projetista. Eventualmente podem ser encontrados erros ou equívocos, visto ser esta uma versão primeira deste documento.

Tabela 25 – Legenda com a simbologia utilizada no projeto.

Legenda	
Símbolo	Significado
	Eletroduto flexível no teto ou parede
	Eletroduto flexível no piso
	Condutores fase, neutro, proteção e retorno
	Ponto de luz no teto
	Ponto de luz na parede
	Interruptor simples
	Interruptor duplo
	Interruptor paralelo
	Tomada baixa na parede (altura de 30 cm)
	Tomada média na parede (altura de 120 cm)
	Tomada alta na parede (altura de 180 cm)
	Quadro de medição
	Quadro de distribuição
	Disjuntor termomagnético
	Disjuntor diferencial residual
	Dispositivo supressor de surtos
	Caixa de entrada de sinal de dados e imagem
	Caixa de distribuição de sinal de dados e imagem (4 x 4)
	Ponto de telefone (altura de 30 cm)
	Ponto de sinal de imagem (altura de 30 cm)
	Tubulação de dados e imagem no piso

5 Exercícios

Exercícios Resolvidos

ER 01. Cite dois elementos que devem constar em uma planta de um projeto elétrico?

Diagrama unifilar sobre a planta baixa e legenda.

ER 02. A potência ativa total demandada por uma unidade consumidora foi calculada como sendo de 16 kW. Qual o tipo de fornecimento definido pela concessionária de energia elétrica em Santa Catarina?

Para 16 kW, o fornecimento será bifásico, 220/380 V, categoria B1.

ER 03. Qual o critério recomendado pela norma NBR 5410 em termos de potência mínima de

iluminação nos ambientes?

A potência mínima a ser considerada no projeto é de 100 VA por ambiente.

ER 04. Qual fator de potência deve ser aplicado aos circuitos de iluminação?

Ao circuito de iluminação e a seus elementos se aplica o fator de potência unitário (1).

ER 05. Cite um elemento ou local onde deve ser utilizado o disjuntor diferencial-residual?

No circuito de alimentação de chuveiros, para proteção dos usuários, deve-se utilizar disjuntor diferencial-residual.

Exercícios Propostos

EP 01. O que indica a norma NBR 5410 em termos de número de tomadas para uma cozinha?

EP 02. Qual fator de potência deve ser aplicado no cálculo da potência aparente de uma torneira elétrica?

EP 03. Em quais locais de uma residência é adequado a instalação do quadro de distribuição?

EP 04. Explique como é realizado o dimensionamento de um disjuntor termomagnético.

EP 05. O que é o quadro de cargas de um projeto elétrico?

6 Atividade Avaliativa

6.1 Introdução – O que preciso saber

Ao final deste objetivo de aprendizagem são apresentadas cinco questões, que devem ser respondidas sem consultar o material. Se você conseguir responder as questões e conferir as respostas com o gabarito abaixo, parabéns, você concluiu com êxito este tópico. Caso tenha errado alguma questão, revise o conteúdo relacionado com a mesma e refaça a questão, procurando se concentrar mais desta vez, para acertar o exercício e fixar bem o conteúdo.

AA 01. Qual a potência mínima a ser considerada para tomadas em cozinhas, se o número de tomadas for igual a 3?

AA 02. O que é o fator de demanda em uma instalação elétrica?

AA 03. Qual fator de potência deve ser aplicado no cálculo da potência aparente de um condicionador de ar?

AA 04. O dimensionamento de um disjuntor termomagnético resultou no valor de 20 A. Se pretende

utilizar um disjuntor diferencial-residual de 25 A na proteção do mesmo circuito terminal. Como deve ser o sequenciamento na instalação dos dois disjuntores, isto é, qual deve ser instalado à montante e qual deve ser instalado à jusante?

AA 05. Em geral, ao traçar os trechos de linhas elétricas (eletrodutos) na planta baixa, parte-se do quadro de distribuição para qual elemento do circuito?

de luz no teto, no centro do ambiente.
AA 05. Ao traçar as linhas elétricas (eletrodutos), parte-se do quadro de distribuição até os pontos enquanto o disjuntor termomagnético de 20 A deve ser instalado à jusante (abaixo).
AA 04. Neste caso, o disjuntor diferencial residual de 25 A deve ser instalado à montante (acima), 0,7 ou 0,8.
AA 03. O fator de potência de um condicionador de ar, é entre 0,6 e 0,8, utilizando-se tipicamente estarão ligados ao mesmo tempo.
estará sendo utilizada simultaneamente pelos usuários, visto que nem todos os equipamentos
AA 02. O fator de demanda representa, em valor percentual, quanto da potência total projetada
AA 01. A potência mínima para tomadas na cozinha, até 3 pontos, é de 600 VA.

GUIA DE ESTUDO

- OBJETIVO DE APRENDIZAGEM -
REVISÃO DE ELETROMAGNETISMO

REVISÃO DE ELETROMAGNETISMO

Objetivo de Aprendizagem

Estudar os principais conceitos e princípios do eletromagnetismo.

Objetivos parciais

- Conhecer os princípios de eletromagnetismo;
- Conhecer as principais leis do eletromagnetismo;
- Entender as principais grandezas e dispositivos eletromagnéticos.

Aulas relacionadas

Este objetivo de aprendizagem está relacionado com a aula 04 da disciplina.

Pré-requisitos

Ter estudado o objetivo de aprendizagem 03 relacionado ao projeto de instalações elétricas.

Continuidade dos Estudos

O próximo objetivo de aprendizagem será o estudo de transformadores.

Roteiro para estudos

Os estudos referentes a este objetivo de aprendizagem consistem em:

1. Estudar este documento resumo, realizando as atividades propostas no mesmo;
2. Responder o quiz relacionado a este objetivo de aprendizagem;
3. Caso perceba necessidade, estudar a apresentação deste assunto ou consultar os livros texto indicados para esta disciplina;
4. Realizar os exercícios deste tópico da matéria;
5. Realizar a avaliação final para progredir ao próximo conteúdo.

Referências

- Material disponibilizado para a disciplina de Acionamentos Eletrônicos – 2021/1.
Departamento Acadêmico de Eletrônica, Instituto Federal de Santa Catarina, Campus Florianópolis.
- BOYLESTAD, Robert. Introdução à análise de circuitos. Tradução de Daniel Vieira, Jorge Ritter. 12ª ed. São Paulo: Pearson, 2012.

Check-list

Caro estudante, verifique se você completou as atividades deste objetivo de aprendizagem e obteve êxito para continuar seus estudos.

Assinale as atividades realizadas:

Estudo do documento resumo:

- Leitura do documento resumo;
- Exercícios do documento resumo;
- Atividade avaliativa do documento resumo.
- Obtive êxito e entendi o conteúdo deste documento;
- Ainda não entendi bem o conteúdo e estudarei o mesmo com mais profundidade.

Estou com dúvidas, irei estudar com mais detalhes este conteúdo:

- Assistir a apresentação relacionada ao conteúdo (apresentação 04);
- Ler este guia de estudo (objetivo de aprendizagem 04).

Ainda estou com dúvidas:

- Entrarei em contato com o professor.

Obtive êxito, então seguirei em frente:

- Responder ao quiz deste conteúdo no Moodle;
- Informar ao professor que estou avançando com o conteúdo.

Parabéns, continue estudando com afinco e vamos em frente!!

CONTEÚDO

**- OBJETIVO DE APRENDIZAGEM -
REVISÃO DE ELETROMAGNETISMO**

1 Introdução

O conteúdo a ser estudado neste tópico da disciplina está relacionado aos princípios básicos do eletromagnetismo, para posteriormente se estudar transformadores e motores elétricos.

Assim, o objetivo aqui será realizar uma revisão das principais grandezas do eletromagnetismo e apresentar os fundamentos para posteriormente se estudar as máquinas elétricas (transformadores e motores).

1.1 Conteúdo – O que irei estudar

Estudaremos neste tópico:

- Revisão de eletromagnetismo;
- Princípios do eletromagnetismo;
- Aspectos gerais de eletromagnetismo.

1.2 Metodologia – O que devo fazer e como fazer

Leia com atenção o conteúdo a seguir. Ao final deste tópico são apresentados exercícios resolvidos. Após são apresentados alguns exercícios propostos.

Ao realizar estas atividades e se sentir confiante para progredir, siga os passos indicados na primeira página deste documento.

Espera-se que após estudar este assunto, você consiga:

- Descrever com suas palavras as principais grandezas do eletromagnetismo;
- Entender os principais aspectos relacionados com os dispositivos eletromagnéticos.

A atividade avaliativa deste objetivo de aprendizagem consistirá em perguntar ao estudante para descrever as principais grandezas do eletromagnetismo.

Exemplo de atividade avaliativa:

1. Explicar com suas palavras o que é campo elétrico.
2. Explicar a curva $B \times H$ de um material magnético.
3. Descrever os princípios motor e gerador.
4. Explicar o que são indutores e transformadores.

2 Eletromagnetismo

2.1 Introdução

O entendimento dos dispositivos eletromagnéticos, como máquinas elétricas (transformadores e motores), contadores, relés, disjuntores, dentre outros elementos, é possível a partir da compreensão dos princípios do eletromagnetismo e seus fenômenos.

Assim, neste capítulo será realizada uma breve revisão sobre as principais grandezas do eletromagnetismo e aspectos importantes relacionados ao mesmo.

2.2 Magnetismo Atômico

Em termos eletromagnéticos, os menores elementos presentes nos materiais magnéticos são denominados de dipolos magnéticos; e em menor escala, um elétron se apresenta como um dipolo magnético, ou seja, apresenta um polo norte e um polo sul, conforme mostrado na Figura 1.

Acima do nível eletrônico (considerando o magnetismo dos elétrons), em termos de escala dimensional, se tem o magnetismo atômico (considerando o átomo), ou seja, a nível de um átomo, que conforme a quantidade de cargas na camada de valência, especialmente, poderá apresentar ou não um momento magnético, isto é, ter um pequeno campo magnético resultante dos dipolos magnéticos de cada elétron que forma o átomo, conforme mostrado na Figura 2.

Ainda subindo mais na escala dimensional, considerando agora a construção de núcleos magnéticos utilizados na implementação de dispositivos eletromagnéticos (indutores, transformadores, motores, contadores, etc.) se tem os domínios magnéticos, que são pequenas regiões do material, que podem ter orientação preferencial ou não, conforme mostra a Figura 3.

Os domínios magnéticos são os elementos que constituem o núcleo ferromagnético de um dispositivo eletromagnético, os quais devem ser orientados conforme a direção das linhas de campo magnético, para que em conjunto formem um campo magnético mais intenso ou não. Um ímã é um elemento físico no qual os domínios estão orientados em uma mesma direção, formando assim um campo magnético intenso; daí a denominação de que um ímã é um elemento magnetizado. Por sua vez, um material desmagnetizado tem os domínios orientados aleatoriamente (desorientados), ou seja, sem uma direção preferencial, fazendo com o que o campo magnético resultante seja nulo.

Em geral, os dispositivos eletromagnéticos utilizam núcleos de material ferromagnético para se ter uma orientação dos domínios magnéticos de maneira intensa, e com isso, se conseguir efeitos (fenômenos) eletromagnéticos de maior intensidade em menores volumes e pesos.

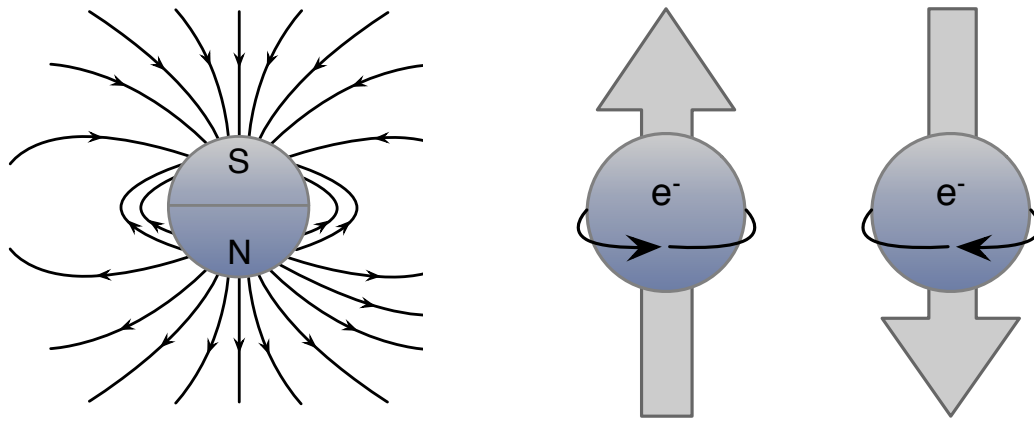


Figura 1 – Dipolos magnéticos.

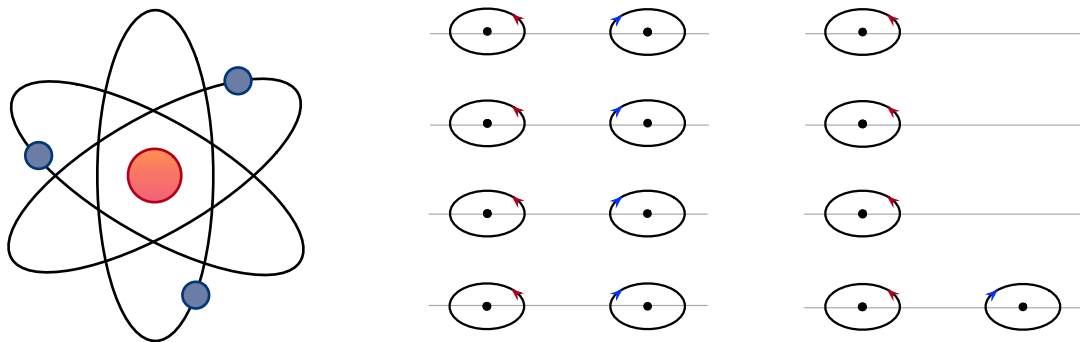


Figura 2 – Magnetismo em um átomo.

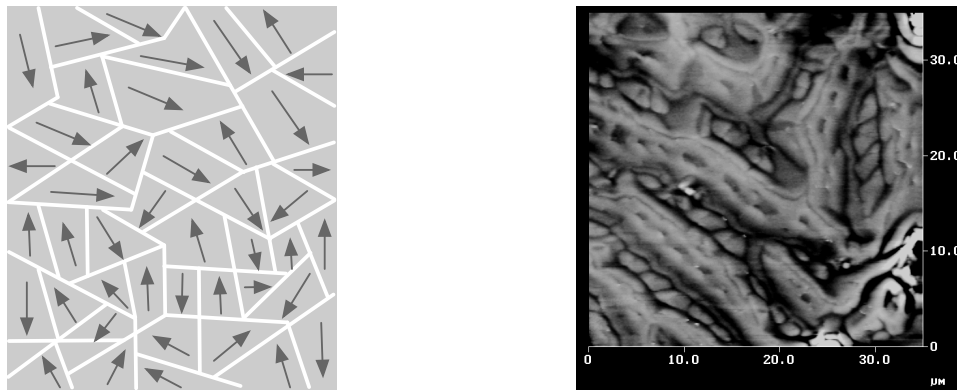


Figura 3 – Domínios magnéticos de um material.

Fonte: <http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx> e www.geociencias.unam.mx. Acesso em: 28/09/2014.

2.3 Campo Magnético

O campo magnético é uma região do espaço onde se tem a presença de fenômenos magnéticos, especificamente linhas de campo, conforme mostrado na Figura 4. O campo pode ser uniforme, conforme as linhas de campo estiverem distribuídas com mesma intensidade e direção, ou não-uniforme, se as linhas de campo estiverem concentradas ou espalhadas, fazendo variar sua intensidade e direção ao longo do espaço.

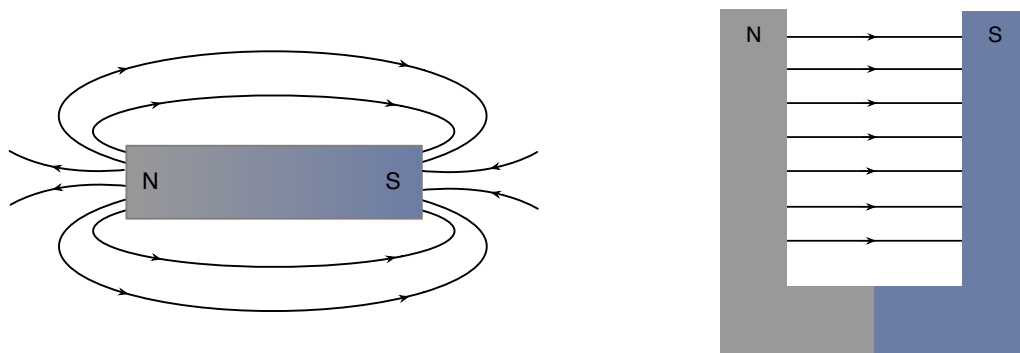


Figura 4 – Campo magnético.

Fonte: (Ramalho, 2006)¹.

Em resumo, se utilizam núcleos de material ferromagnético nos dispositivos eletromagnéticos utilizados em eletrônica para promover a concentração das linhas de campo, fazendo com que as mesmas se limitem ao volume ocupado pelo núcleo.

O campo magnético pode ser originado pela corrente elétrica circulando por um condutor retilíneo, em forma de espira (volta) ou bobina. A diferença é que o campo magnético criado por um pedaço pequeno de condutor, com um comprimento reduzido (delta de comprimento), será pequeno, enquanto que, na medida que se aumentar o comprimento do condutor (soma de vários deltas de comprimento, isto é, soma de pequenos pedaços de comprimento de condutor) se aumentará o campo resultante. Do mesmo modo, se o condutor for enrolado na forma de uma espira (volta), o campo no interior da espira será somado, ou seja, os vetores de campo magnético se somam na parte central da espira, resultando em um campo com maior intensidade e dependente da geometria da espira. Por fim, se for construída uma bobina (ou enrolamento) com diversas espiras, o efeito será novamente de soma, ou seja, o campo resultante será mais intenso conforme se aumentar o número de espiras do indutor construído.

O campo magnético pode ser gerado pela passagem da corrente elétrica em um condutor, sendo que as linhas de campo em um condutor retilíneo são perpendiculares ao mesmo, como mostrado na Figura 5. Quando se enrola o fio condutor em forma de espira (volta), se tem um efeito de somatório das linhas de força (vetores) na parte interna da espira, como mostrado na Figura 6, o que resulta em um campo mais intenso. Por sua vez, se diversas espiras forem enroladas lado a lado, como mostrado na Figura 7 se tem o somatório do campo de cada espira, resultando em uma bobina com um campo mais intenso ainda, proporcional ao seu número de espiras (N). Este efeito é usado para a construção de indutores, transformadores, eletroímãs, motores e outros dispositivos eletromagnéticos.

¹ RAMALHO, R. J. FERRARO, N. J. e SOARES, P. A. T. *Os Fundamentos da Física. Volume 3.* São Paulo: Editora Moderna, 2006.

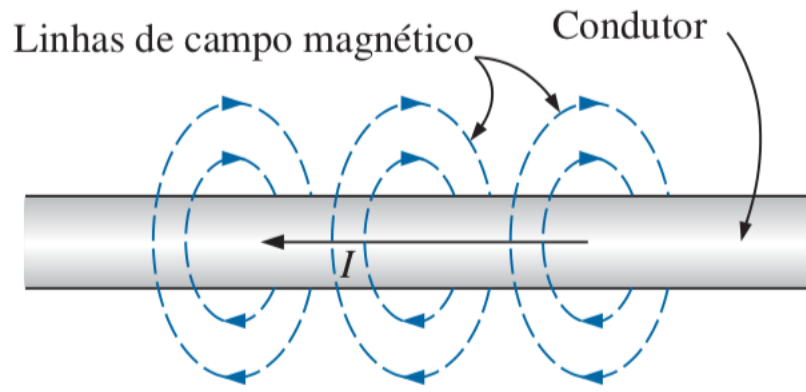


Figura 5 – Linhas de campo em um condutor percorrido por uma corrente elétrica.

Fonte: (Boylestad, 2012).

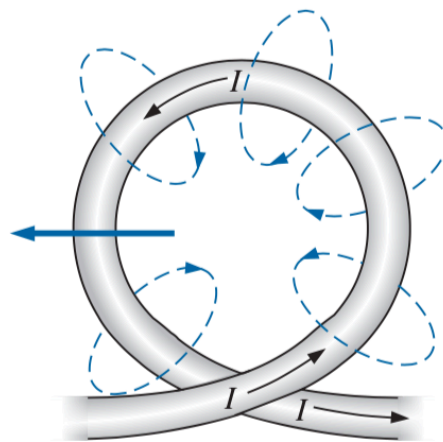


Figura 6 – Linhas de campo em uma espira (volta).

Fonte: (Boylestad, 2012).

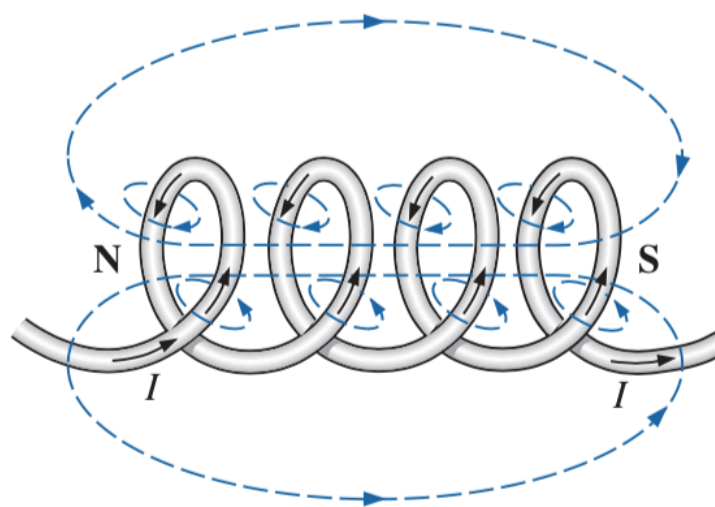


Figura 7 – Linhas de campo em uma bobina.

Fonte: (Boylestad, 2012).

O sentido das linhas de campo pode ser determinado utilizando uma regra prática, com o auxílio da mão direita, como mostrado na Figura 8. A mão e os dedos acompanham o sentido de enrolamento das espiras, neste de caso por cima do núcleo, e o sentido de circulação da corrente elétrica, entrando pelo fio no lado esquerdo. Assim, o dedo polegar da mão direita irá indicar o sentido do fluxo magnético e o polo norte do eletroímã obtido. A mesma Figura 8, ao lado direito, indica os vetores entrando e saindo, para a corrente elétrica nas espiras, respectivamente na parte superior e na parte inferior. Note que se utiliza flechas, onde a parte da frente indica o vetor apontando para o observador (um ponto), enquanto a parte traseira indica um vetor entrando no plano da figura, ou seja, saindo do observador (um x).

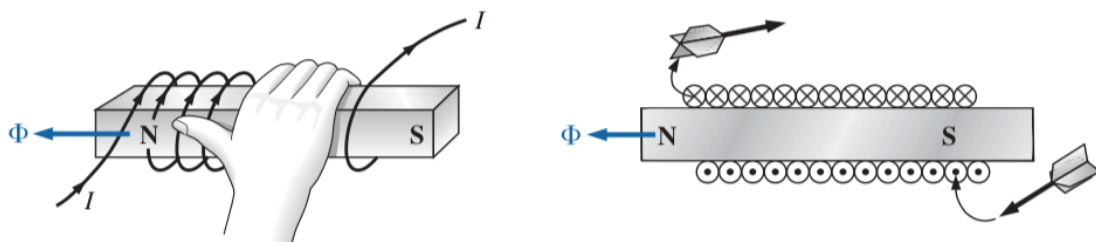


Figura 8 – Regra prática para determinar o sentido das linhas de campo.

Fonte: (Boylestad, 2012).

2.4 Densidade de Fluxo Magnético e Fluxo Magnético

A densidade de fluxo (B) é número de linhas de campo por unidade de área. Sua unidade é Tesla [T], onde um Tesla é igual a 1 Weber por metro quadrado de área.

Por sua vez, o fluxo magnético (ϕ) é o conjunto de todas as linhas de campo que atingem perpendicularmente uma área. Tem como unidade o weber [Wb], sendo que 1 Weber corresponde a 1×10^8 linhas de campo. O fluxo magnético (ϕ) em um área (A) corresponde a densidade de fluxo magnético (B), conforme mostrado na Figura 9.

A densidade de fluxo magnético é obtida por:

$$B = \frac{\phi}{A} \left[T = \frac{Wb}{m^2} \right]$$

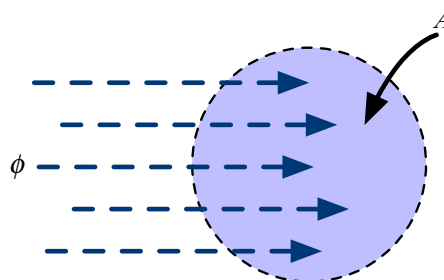


Figura 9 – Fluxo magnético (ϕ) em uma área A .

Fonte: Adaptado de (Boylestad, 2012).

2.5 Força Magnetizante

A alteração nos domínios magnéticos do material, quando presentes, é caracterizada pela sua reação ao campo magnético, denominada de força magnetizante (H), sendo dependente da corrente elétrica, do número de espiras e da geometria do elemento magnético. A Figura 10 mostra diferentes curvas, para diferentes tipos de materiais, podendo se observar que a inclinação da curva é dependente do material, o que significa que se consegue diferentes intensidades de campo magnético (B) para a mesma força magnética (H).

A força magnetizante é calculada por:

$$H = (I, N, l) [A / m]$$

A inclinação da curva pode ser alterada e ajustada usando-se diferentes materiais para construir o núcleo magnético ou então inserindo-se elementos diferentes no caminho magnético, alterando assim a relutância magnética.

Assim, quando se realiza o projeto do elemento magnético, deve-se calcular o entreferro, que é uma distância entre dois elementos ferromagnéticos (núcleo) em um caminho magnético, onde se coloca material sem propriedades ferromagnéticas, como por exemplo papel, plástico, fenolite, etc.

As curvas da Figura 10 mostram que ao aplicar no material forças magnéticas de grande intensidade, a curva de resposta do material não altera sua inclinação ou intensidade, entrando em uma região onde se aumenta a força (H) e o campo (B) não aumenta mais; neste caso se tem a saturação do material magnético, ou seja, onde todos os seus domínios magnéticos foram orientados. Ao se utilizar um indutor em um circuito prático, por exemplo, ao ocorrer sua saturação, sua indutância tenderá a zero, fazendo com que sua reatância indutiva tenda a zero também, restando apenas sua resistência ôhmica, isto é, o indutor passa a se comportar como um resistor com resistência do fio utilizado para a construção do mesmo. Assim, se este indutor estiver sendo utilizado em um conversor cc-cc, então a corrente elétrica irá aumentar, pois nestes conversores, a taxa de crescimento (derivada) da corrente elétrica é dada pela relação entre a tensão sobre indutor pela indutância ($i = V / L$); implicando que se a indutância tende a zero, a corrente tenderá a infinito.

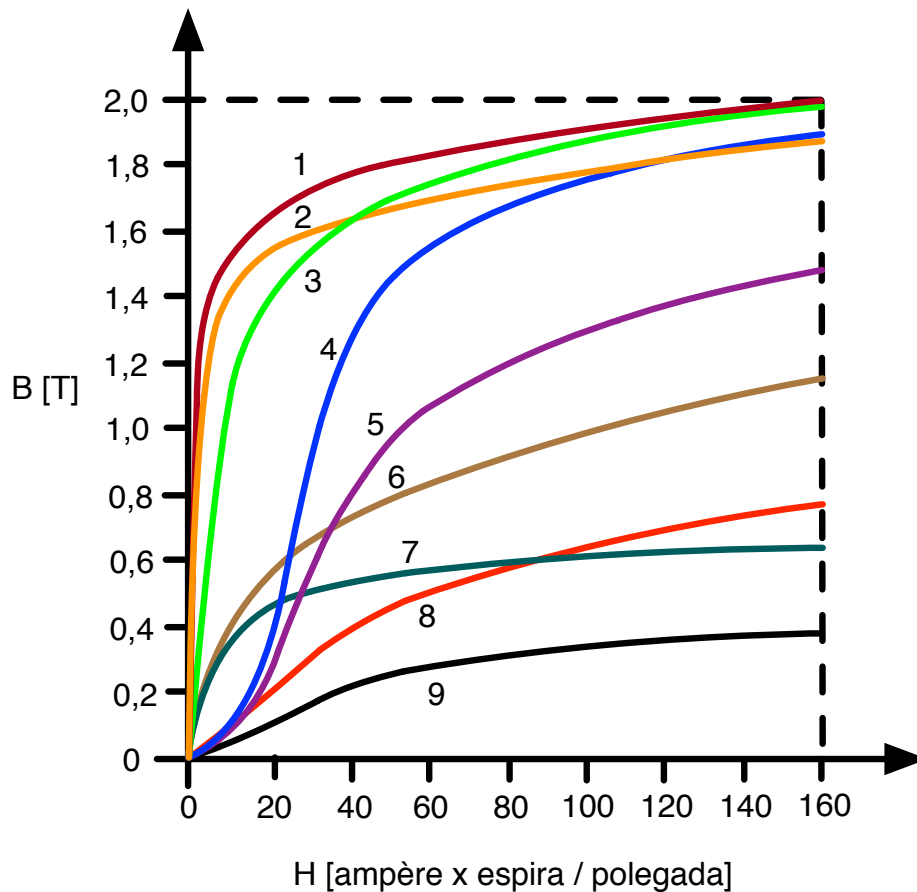


Figura 10 – Curva $B \times H$ para diferentes materiais (1 – chapa de aço, 2 – aço silício, 3 – aço fundido, 4 – aço tungstênio, 5 – aço magnético, 6 – ferro fundido, 7 – níquel, 8 – cobalto, 9 – magnetita).

Fonte: Adaptado de (Wikipédia, 2014).

2.6 Permeabilidade Magnética

A permeabilidade magnética (μ) é a relação entre a densidade de campo magnético (B) e a força magnética (H). Os materiais, magnéticos ou não, são classificados justamente conforme sua permeabilidade magnética, ou seja, seu comportamento quando imerso em um campo magnético, concentrando ou não as linhas de campo.

A permeabilidade magnética é dada por:

$$\mu = \frac{B}{H} \left[\frac{Wb}{A/m} \right]$$

Os materiais são classificados em relação a permeabilidade do vácuo, como sendo:

$$\mu = \mu_r \cdot \mu_o$$

$$\mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Wb}{A/m}$$

O comportamento dos domínios magnéticos dos diferentes materiais, em termos de permeabilidade magnética, pode variar muito, como está mostrado na Tabela 1, onde o uso de materiais com maior permeabilidade relativa implica em menor volume e peso, pois se obterá o mesmo fenômeno eletromagnético (indutância, por exemplo) com um número de espiras muito menor. A grosso modo, comparando-se o ar com o ferrite, pode-se estimar que seriam necessárias 2.000 espiras para obter a mesma indutância caso se utilize como núcleo o ar, ao invés do ferrite. Por sua vez, os materiais elaborados a partir das terras raras, tem permeabilidades muito altas, como o permalloy, por exemplo.

A maneira como o material se comporta quando imerso em um campo magnético é representado pela sua curva $B \times H$, como mostrado na Figura 11. Esta curva é conhecida como curva de histerese, pois mostra que as curvas de magnetização e desmagnetização do material são diferentes; pois ao se diminuir a corrente elétrica (força magnética H), os domínios devem ficar desorientados, ou seja, orientados de maneira aleatória; no entanto, alguns domínios permanecem orientados, fazendo com que mesmo com corrente zero (força H nula), o campo (B) resultante não seja zero, caracterizando a presença de magnetismo residual ou remanescente. Deste modo, a curva $B \times H$ forma um laço, chamado de laço de histerese, e representa a energia necessária para orientar e desorientar os domínios magnéticos.

Em comparação com a curva da Figura 11, o ar tem a curva na forma de uma reta, sem apresentar o efeito de saturação e de magnetismo residual.

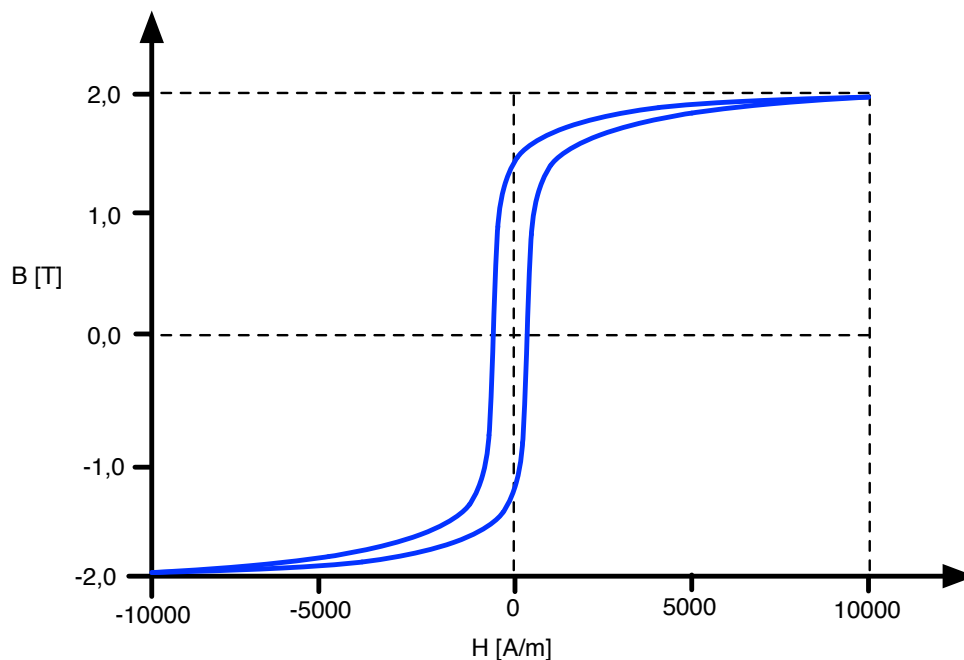


Figura 11 – Curva $B \times H$ (histerese) de um material magnético.

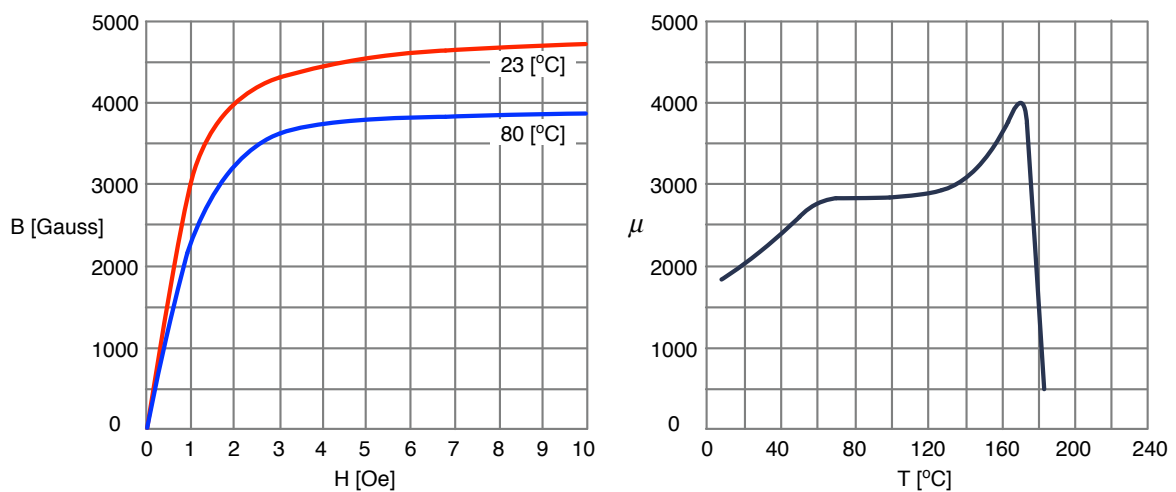
Fonte: Adaptado de (Boylestad, 2012).

Tabela 1 - Permeabilidade relativa de diferentes materiais.

Material	Permeabilidade relativa (μ_r)
Ar	1
Papel, plástico, fenolite	1
Ferrite	2.000
Ferro comercial	9.000
Ferro silício	55.000
Permalloy	1.000.000
Super permalloy	10.000.000

A Figura 12 apresenta a curva $B \times H$ de materiais magnéticos utilizados para implementação de dispositivos eletromagnéticos (indutores, transformadores e motores) operando em alta frequência. Nota-se pela Figura 12 que a curva $B \times H$ é alterada pela temperatura do material, devendo-se evitar temperaturas acima de 140 °C, pois a permeabilidade muda abruptamente e logo acima de 160 °C se tem a temperatura de Curie, onde a permeabilidade tende a zero, ou seja, o material perde suas propriedades magnéticas.

A partir da Figura 12, costuma-se utilizar em projetos a curva para temperatura de 80 °C, colocando-se o ponto de operação na região abaixo de 4 Oe de força magnetizante, para evitar a saturação do elemento magnético, isso quando se está projetando indutores e transformadores, por exemplo.

Figura 12 – Curva $B \times H$ para ferrites.

Fonte: Adaptado de <http://www.thornton.com.br>. Acesso em: 23/09/2020.

Em termos de curva de permeabilidade, os materiais podem ser classificados como moles ou duros, dependendo de sua curva de histerese. Os materiais com curva larga e valor alto de magnetismo residual (remanente ou remanescente) são utilizados com ímãs permanentes para a construção de motores, alto falantes, etc., mostrados na Figura 13. Já os materiais com curva

estreita e baixo valor de magnetismo residual são empregados para a construção de dispositivos com campo magnético variável, como indutores, motores de indução, etc., mostrados na Figura 14.

Além desta classificação, os materiais mais empregados atualmente para a construção de dispositivos são o ferro silício, ferrite e pós metálicos. O primeiro é obtido com a mistura de silício com o ferro. O segundo e terceiro são materiais compostos pela mistura de diferentes elementos, visando se obter as características desejadas. Os núcleos de ferro silício são laminados, enquanto os de ferrite e pós metálicos são compactos. A Figura 15 mostra exemplos destes materiais.

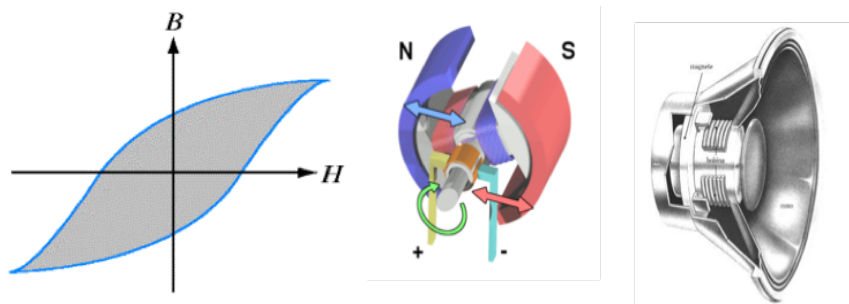


Figura 13 – Curva de histerese de materiais duros e exemplos de aplicação.

Fonte: (Boylestad, 2012).

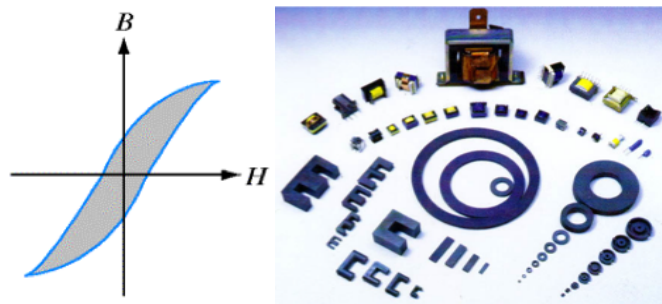


Figura 14 – Curva de histerese de materiais moles e exemplos de aplicação.

Fonte: (Boylestad, 2012).



Figura 15 – Materiais magnéticos empregados para construção de dispositivos eletromagnéticos.

Fonte: <http://www.maqnoepaula.com.br>; <http://www.thornton.com.br> e <http://www.maqmattec.com>.

Acesso em: 28/09/2014.

2.7 Circuitos Magnéticos

A exemplo dos circuitos elétricos, formados, por exemplo, por fontes e elementos passivos (resistores, indutores e capacitores), também se tem os circuitos magnéticos, formados pelas forças e relutâncias magnéticas.

A força magnetomotriz (\mathfrak{F}) é equivalente a tensão elétrica, representando a pressão ou força para o estabelecimento das linhas magnéticas (fluxo magnético), sendo diretamente relacionada com o número de espiras e a corrente aplicada ao elemento.

$$\mathfrak{F} = N \cdot I [Ae]$$

Onde:

- F – Força magnetomotriz em ampères-espiras (Ae);
- N – Número de espiras (e);
- I – Corrente elétrica em ampères (A).

A relutância magnética (\mathfrak{R}) é a oposição ao estabelecimento das linhas de campo, equivalente à resistência elétrica em circuitos eletroeletrônicos, sendo dada por:

$$\mathfrak{R} = \frac{l}{\mu \cdot A} [rels, ou Ae / Wb]$$

Onde:

- l – Comprimento do caminho magnético em metros (m);
- μ – Permeabilidade magnética em Wb/Am;
- A – área da seção transversal em m².

É importante destacar que a relutância do material é inversamente proporcional à permeabilidade magnética, isto é, ao se utilizar materiais com altas permeabilidades (ferromagnéticos), se terá baixas relutâncias magnéticas. Por outro lado, materiais como o ar, papel, plástico, dentre outros, terão baixas permeabilidades magnéticas (na verdade praticamente igual a permeabilidade do vácuo (1)) e, portanto, altas relutâncias magnéticas.

A relutância é utilizada em termos práticos, para ajustar a inclinação da curva $B \times H$ conforme visto anteriormente.

A força magnetizante H é a relação entre a força magnetomotriz e o comprimento do caminho magnético, conforme:

$$H = \frac{\mathfrak{S}}{l} [Ae/m]$$

Assim, se tem:

$$H = \frac{\mathfrak{S}}{l} = \frac{N \cdot I}{l} [Ae/m]$$

A título de exemplo, a Figura 16 mostra um circuito magnético, formado por um núcleo toroidal e um conjunto de espiras enrolado envolta do mesmo. Neste caso, se a corrente elétrica for de 2 A e o número de espiras for 20, considerando um comprimento de 20 cm, se terá:

$$H = \frac{N \cdot I}{l} = \frac{20 \cdot 2}{0,2} = 200 [Ae/m]$$

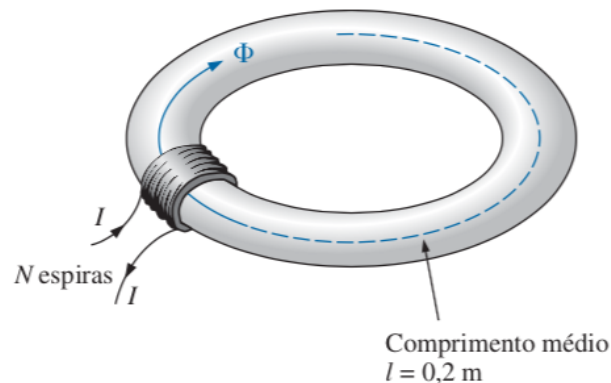


Figura 16 – Exemplo de circuito magnético e força magnetizante.

Fonte: (Boylestad, 2012).

A Lei Circuital de Ampère determina que a soma das forças magnetomotrizes ao longo de um caminho fechado deve ser nula, similarmente ao que determina a Lei de Kirchhoff das Tensões para um circuito elétrico.

Assim:

$$\sum_{\leftrightarrow} V = 0 \rightarrow (\text{para circuitos elétricos})$$

$$\sum_{\leftrightarrow} \mathfrak{S} = 0 \rightarrow (\text{para circuitos magnéticos})$$

A Tabela 2 mostra a relação de causa e efeito para circuitos elétricos e circuitos magnéticos. Assim, o fluxo magnético é resultado da força magnetomotriz diminuída ou atenuada pela relutância magnética do circuito.

Assim, em termos de circuitos magnéticos, por similaridade, se pode escrever que:

$$V = R \cdot I \rightarrow (\text{para circuitos elétricos})$$

$$\mathfrak{S} = \mathcal{R} \cdot \phi \rightarrow (\text{para circuitos magnéticos})$$

Tabela 2 – Relações de causa e efeito para circuitos elétricos e magnéticos.

	Circuitos elétricos	Circuitos magnéticos
Causa	E	\mathfrak{S}
Oposição	R	\mathcal{R}
Efeito	I	ϕ

Fonte: (Boylestad, 2012).

A Figura 17 mostra um exemplo de circuito magnético com diferentes elementos no caminho magnético, ou seja, que tem diferentes permeabilidades magnéticas. Ao aplicar a Lei Circuital de Ampère se terá:

$$\sum_{\leftrightarrow\updownarrow} \mathfrak{S} = 0$$

$$+N \cdot I - H_{ab} \cdot l_{ab} - H_{bc} \cdot l_{bc} - H_{ca} \cdot l_{ca} = 0$$

$$N \cdot I = H_{ab} \cdot l_{ab} + H_{bc} \cdot l_{bc} + H_{ca} \cdot l_{ca}$$

A Figura 18 mostra um exemplo de dispositivo eletromagnético prático, neste caso um relé eletromecânico, onde se tem o emprego de aço fundido como material ferromagnético, e o espaço de manobra, entre a parte fixa e a parte móvel do núcleo, ocupada pelo ar, é caracterizada como um entreferro, com relutância magnética muito diferente daquela do restante do caminho magnético formado pelo aço.

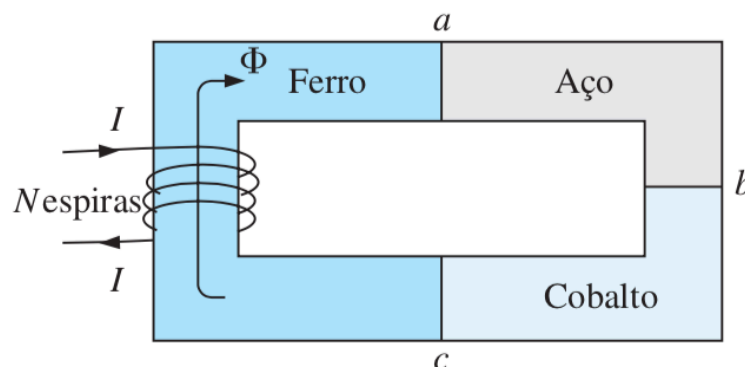


Figura 17 – Circuito magnético exemplo para aplicação da Lei Circuital de Ampère.

Fonte: (Boylestad, 2012).

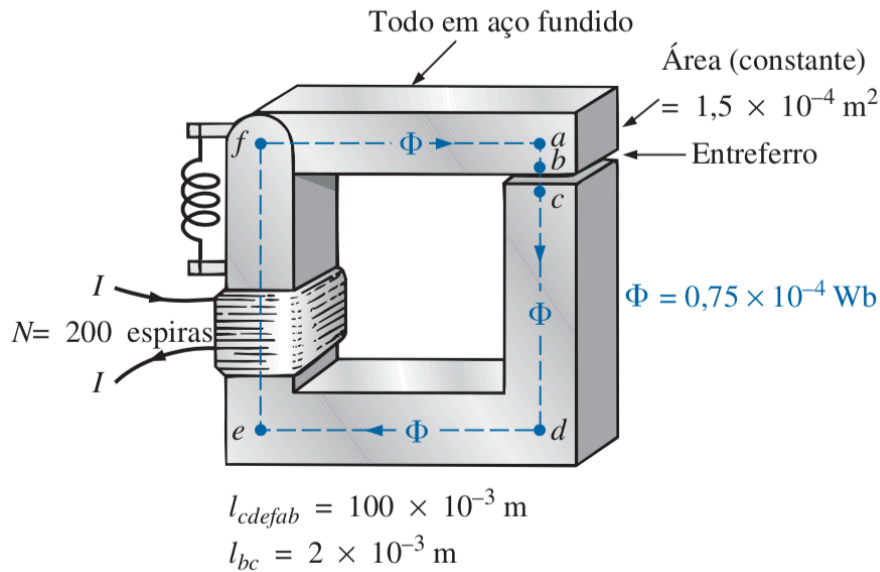


Figura 18 – Exemplo de circuito magnético em um relé eletromecânico.

Fonte: (Boylestad, 2012).

3 Indutância

3.1 Introdução

Os indutores, juntamente com os resistores e capacitores, formam os elementos de circuitos eletroeletrônicos denominados de passivos.

A seguir será apresentado, resumidamente, o conceito de indutância e o modelo equivalente para circuitos eletrônicos de um indutor.

3.2 Indutância

A Lei de Faraday explicita que em todo condutor enquanto sujeito a uma variação de fluxo magnético é estabelecida uma força eletromotriz (tensão) induzida.

$$\varepsilon = N \frac{d\phi}{dt} [V]$$

Já a Lei de Lenz impõe que o sentido da corrente induzida é tal que origina um fluxo magnético induzido, que se opõe à variação do fluxo magnético indutor.

$$\varepsilon = -N \frac{d\phi}{dt} [V]$$

A partir destas duas leis pode-se definir que autoindutância é a propriedade de uma bobina de se opor a qualquer variação de corrente (L). A unidade de medida de indutância é o Henry (H).

É importante destacar que a indutância é uma propriedade dos componentes, ou seja, é um fenômeno que ocorre na presença de variação de corrente elétrica. Assim, todos os componentes apresentam indutância, sendo esta maximizada nos indutores, em virtude de suas características construtivas e pelo emprego de materiais ferromagnéticos.

A indutância de um indutor com núcleo com comprimento muito maior do que seu diâmetro será:

$$L = \frac{N^2 \cdot \mu \cdot A}{l}$$

Esta expressão pode ser utilizada para o cálculo da indutância de indutores com núcleos retilíneos ou toroidais, conforme mostrado na Figura 19.

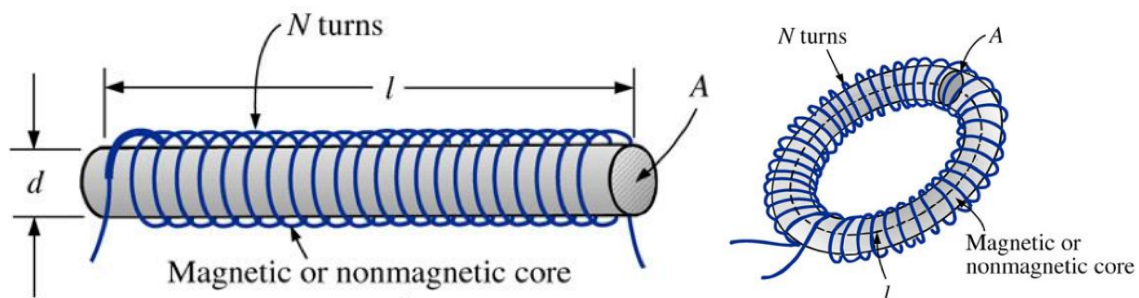


Figura 19 – Indutor com núcleo retilíneo ou toroidal.

Fonte: (Boylestad, 2012).

3.3 Modelo elétrico do indutor

O circuito elétrico equivalente de um indutor, em termos práticos, é mostrado na Figura 20. Idealmente se teria apenas a indutância L, mas na prática sempre se terá a resistência do condutor, então é comum se representar também este parâmetro.

Em circuitos que operam em frequências mais altas, por exemplo em centenas de kHz, pode ser necessário representar o indutor pelo seu circuito elétrico completo, conforme mostrado na Figura 21, pois neste caso, a capacitância parasita pode ter um efeito considerável no comportamento elétrico do componente, o que também vale para resistores e capacitores.

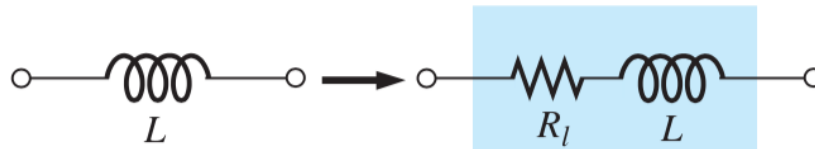


Figura 20 – Circuito elétrico equivalente prático de um indutor.

Fonte: (Boylestad, 2012).

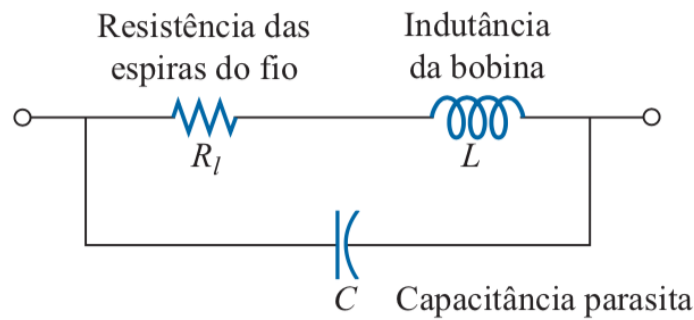


Figura 21 – Circuito elétrico equivalente completo de um indutor.

Fonte: (Boylestad, 2012).

4 Transformadores

4.1 Introdução

Uma das aplicações do eletromagnetismo é na implementação de transformadores, dispositivos utilizados para aumentar ou diminuir tensões alternadas, por exemplo.

A seguir será apresentado resumidamente o princípio da indução eletromagnética, pois na sequência deste curso serão estudados os transformadores em detalhe.

4.2 Indução eletromagnética

O cientista Hans Christian Oersted em torno de 1820 descobriu que uma corrente elétrica tinha a capacidade de gerar um campo magnético. No entanto, o fenômeno da geração de correntes elétricas a partir de campos magnéticos foi observado por Michael Faraday em 1831, permitindo, em conjunto com os estudos de Oersted, derivar conclusões importantes para o desenvolvimento da área de eletromagnetismo e seus dispositivos.

Assim, a indução eletromagnética foi estudada por Faraday, ao realizar o experimento mostrado na Figura 22, e perceber que:

- No momento que a chave é fechada, o galvanômetro acusa uma pequena corrente de curta duração;
- Após a corrente cessar e durante o tempo em que a chave permanecer fechada,

o galvanômetro não mais acusa corrente;

- Ao abrir-se a chave, o galvanômetro volta a indicar uma corrente de curta duração, em sentido oposto ao observado no momento de fechamento da chave.

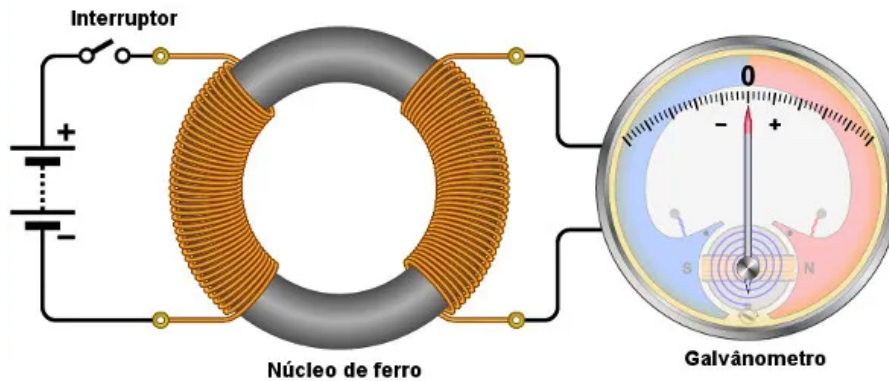


Figura 22 – Experimento de Faraday.

Fonte: <https://brasilecola.uol.com.br>. Acessado em 17/06/2021.

As Leis de Faraday e de Lenz se aplicam aos transformadores, do mesmo modo que se aplicam aos indutores e demais dispositivos eletromagnéticos.

A tensão induzida (e) sobre um número de espiras (N), a partir da variação do fluxo (ϕ) é resultado da Lei de Faraday da Indução Eletromagnética, como mostrado na Figura 23, sendo dada por:

$$e = N \cdot \frac{d(\phi)}{d(t)} [V]$$

A contribuição de Lenz foi concluir que o sentido da corrente induzida é tal que origina um fluxo magnético induzido, que se opõe à variação do fluxo magnético indutor.

$$e = -N \cdot \frac{d(\phi)}{d(t)} [V]$$

As Figura 24 e Figura 25 mostram, respectivamente, a indução de corrente elétrica em um condutor retilíneo e em uma bobina, ambos em movimento em região de presença de linhas de campo, ou seja, imersos em um campo magnético. Note que neste caso, a variação de fluxo é provocada pelo movimento do condutor ou da bobina.

Por outro lado, a Figura 23 mostra a indução de corrente elétrica em uma bobina imersa em um campo magnético variável, isto é, neste caso, as linhas de campo é que estão variando de intensidade ou de direção, por exemplo.

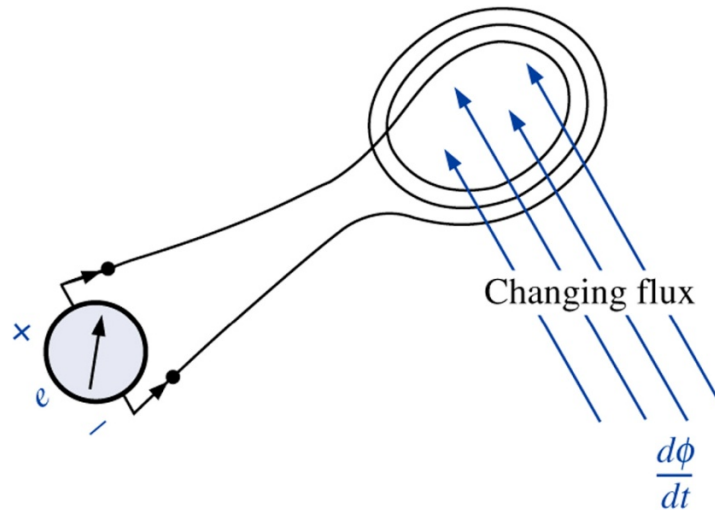


Figura 23 – Indução em uma bobina imersa em um campo magnético variável.

Fonte: (Boylestad, 2012).

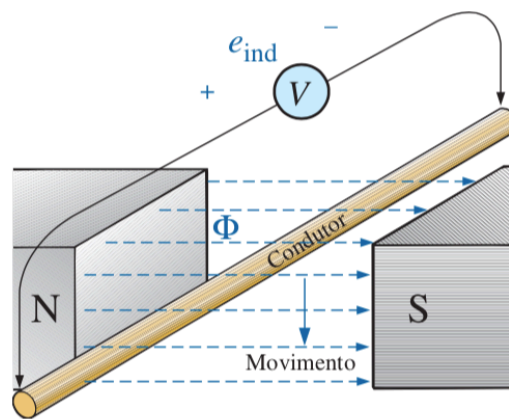


Figura 24 – Indução de corrente elétrica em um condutor em movimento em um campo magnético.

Fonte: (Boylestad, 2012).

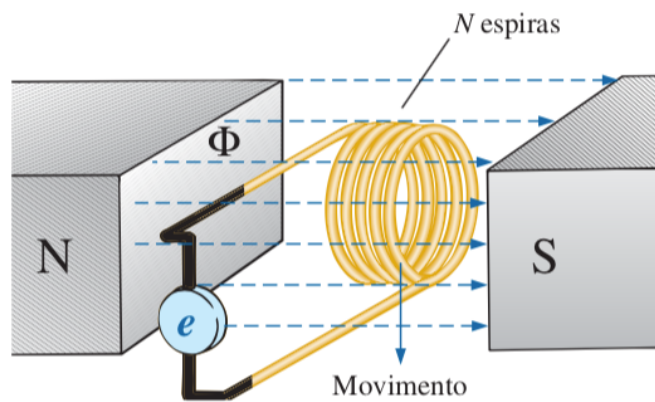


Figura 25 – Indução de corrente elétrica em uma bobina em movimento em um campo magnético.

Fonte: (Boylestad, 2012).

4.3 Transformadores

A Figura 26 mostra um transformador com núcleo de material ferromagnético, como ferro-silício, por exemplo.

O fluxo criado pelo enrolamento primário, a partir da corrente elétrica aplicada neste enrolamento, é denominado de Φ_p e o fluxo que envolve o secundário é denominado de fluxo mútuo Φ_m . Idealmente pode-se considerar que todo o fluxo criado no enrolamento primário passará pelo enrolamento secundário, isto é, que o acoplamento entre os fluxos, provocado pela presença do núcleo ferromagnético, é unitário.

Assim, a partir da Lei de Faraday, tem-se que a tensão induzida sobre o enrolamento primário será:

$$e_p(t) = N_p \frac{d\phi_p}{dt}$$

Por sua vez, a tensão induzida no enrolamento secundário será dada por:

$$e_s(t) = N_s \frac{d\phi_p}{dt}$$

As expressões anteriores serão utilizadas na próxima aula para se estudar o transformador e se obter a relação entre as tensões nos dois enrolamentos, que seria:

$$\begin{cases} e_p(t) = N_p \cdot \frac{d\phi_p}{dt} \rightarrow \frac{d\phi_p}{dt} = \frac{e_p(t)}{N_p} \\ e_s(t) = N_s \cdot \frac{d\phi_p}{dt} \rightarrow \frac{d\phi_p}{dt} = \frac{e_s(t)}{N_s} \end{cases} \rightarrow \frac{e_p(t)}{N_p} = \frac{e_s(t)}{N_s}$$

$$\frac{e_p(t)}{e_s(t)} = \frac{N_p}{N_s}$$

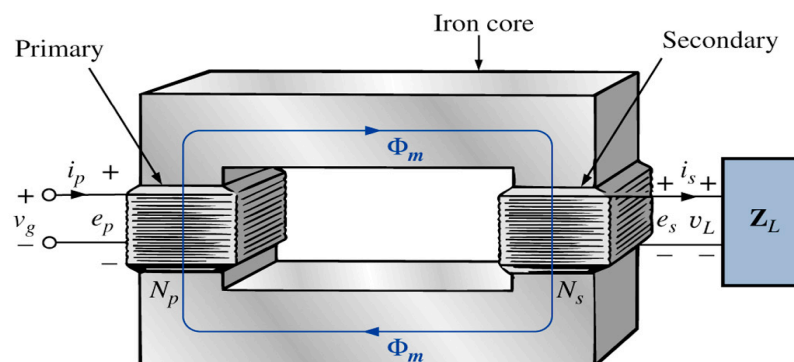


Figura 26 – Transformador com núcleo ferromagnético.

Fonte: (Boylestad, 2012).

4.4 Modelo elétrico do transformador

O circuito elétrico equivalente simplificado e representando um transformador ideal é mostrado na Figura 27, onde se tem a tensão do primário (v_p) e a tensão do secundário (v_s), relacionadas pela relação de transformação entre o número de espiras do primário e do secundário do elemento (T_1).

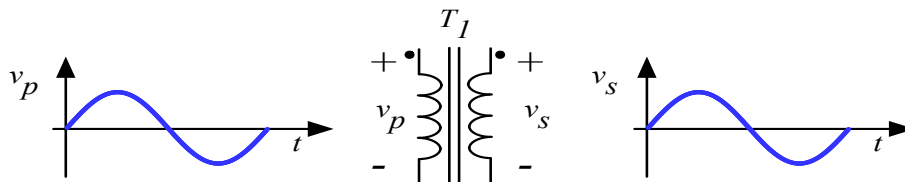


Figura 27 – Circuito elétrico equivalente e simplificado de um transformador.

5 Força Eletromagnética

5.1 Introdução

A força produzida sobre cargas, condutores ou elementos, na presença de campos magnéticos, é um fenômeno importante de ampla utilidade prática na área de eletroeletrônica.

Este tópico apresentará de maneira resumida os princípios envolvidos na geração de forças e que possibilitam a construção de motores e geradores.

5.2 Força Eletromagnética

Um condutor percorrido por uma corrente elétrica e imerso em um campo magnético sofre a ação de uma força eletromagnética.

A Figura 28 mostra a força resultante (F_B) sobre cargas elétricas em movimento com velocidade (v) em um campo magnético (B).

A força poderá ocorrer sobre:

- Uma partícula (carga);
- Um condutor retilíneo;
- Condutores paralelos;
- Em uma espira.

A força é perpendicular aos vetores velocidade (v) e campo magnético (B). O vetor velocidade está associado ao movimento das cargas elétricas, isto é, a corrente elétrica. Assim, onde se tem o vetor velocidade, pode-se inserir a corrente elétrica, como observado na Figura 29.

Deste modo, a força sobre um condutor retilíneo, em termos de módulo, será:

$$F = B \cdot I \cdot l \cdot \text{seno}(\theta)$$

Onde:

- F – Intensidade da força eletromagnética (N);
- B – Densidade de campo magnético (T);
- l – Comprimento do condutor inserido no campo magnético (m);
- θ – Ângulo entre as linhas de campo e a superfície longitudinal do condutor (rad).

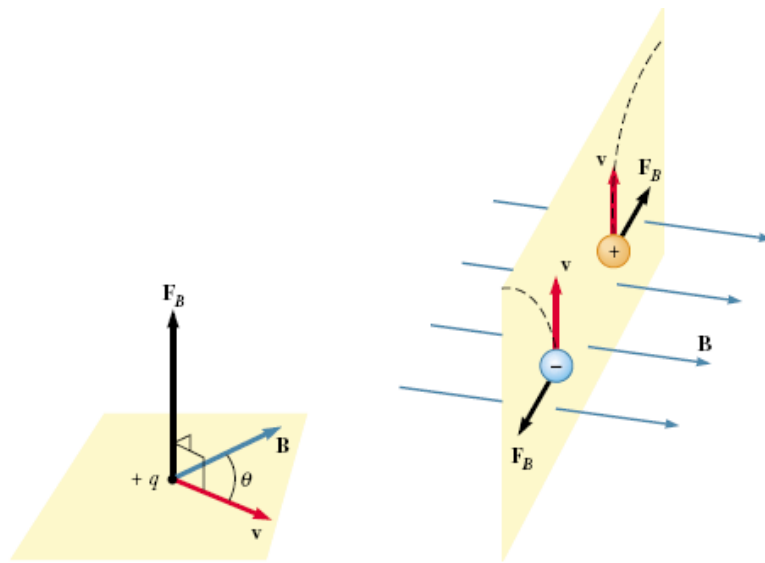


Figura 28 – Força sobre cargas elétricas. Regra para cargas positivas.

Fonte: (Halliday, 1984)².

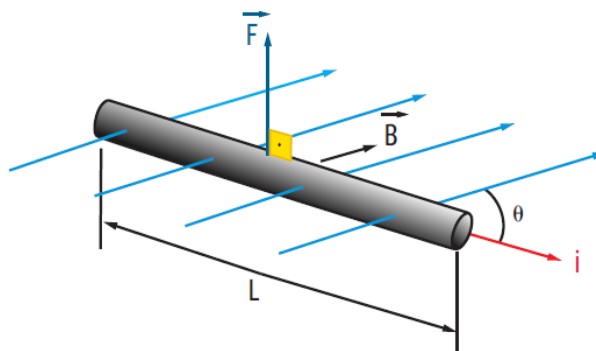


Figura 29 – Força em um condutor retilíneo.

Fonte: <https://guiadoestudante.abril.com.br>. Acessado em 17/06/2021.

² HALLIDAY D. e RESNICK R. Física III. 4. Ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos S.A., 1984.

5.3 Regra de Fleming

A Regra de Fleming permite obter a relação entre os vetores da força magnética, do campo magnético e da corrente elétrica, conforme mostrado na Figura 30. A Regra de Fleming é considerada para cargas positivas. Assim, caso a carga seja negativa, deve-se inverter o sentido da força resultante.

Pode-se ter duas situações distintas, denominadas de ação motora e ação geradora:

- Ação motora – ao circular corrente elétrica em um condutor imerso em um campo elétrico, resultará em uma força sobre este condutor. Aplica-se a Regra de Fleming utilizando a mão esquerda;
- Ação geradora – o movimento de um condutor em um campo magnético resulta em uma corrente elétrica. Aplica-se a Regra de Fleming utilizando a mão direita.

A Figura 31 mostra a aplicação da Regra de Fleming em um condutor imerso em um campo magnético, onde se tem três situações: sem corrente circulando, corrente circulando da direita para a esquerda e corrente circulando da esquerda para a direita. Para determinar a força aplica-se a Regra de Fleming, considerando que a corrente elétrica é representada pelo sentido convencional de circulação das cargas elétricas, isto é, no sentido inverso ao da circulação dos elétrons de fato. Note que se for aplicada a regra da mão direita da Figura 30, de maneira invertida, isto é, aplicando-a com a mão esquerda, por exemplo.

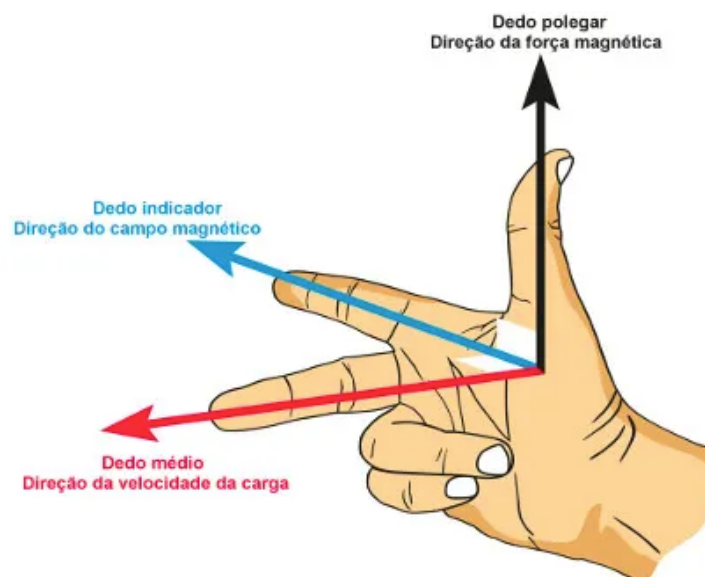


Figura 30 – Regra de Fleming para cargas negativas.

Fonte: <https://brasilecola.uol.com.br>. Acessado em 17/06/2021.

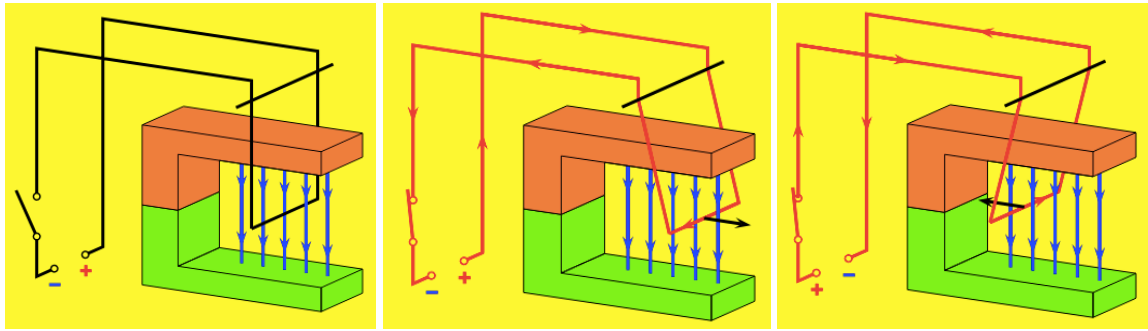


Figura 31 – Força sobre um condutor imerso em um campo magnético.

Fonte: <https://www.walter-fendt.de>. Acessado em 17/06/2021.

5.4 Princípio motor e o princípio gerador

A relação entre o campo magnético e as cargas elétricas (corrente elétrica) pode gerar uma força ou a partir da variação do campo se gerar uma corrente elétrica. Estes efeitos são utilizados para se construir motores e geradores.

Assim, o princípio motor determina que um conjunto de espiras imerso em um campo magnético estará sujeito a uma força, denominada de Força de Lorentz, em decorrência dos estudos e descobertas de Hendrik Antoon Lorentz, por volta do ano 1892.

A força resultante sobre uma espira ou conjunto de espiras pode ser observada na Figura 32, onde se nota que próximo ao polo norte do ímã permanente a força apontará para baixo, enquanto que nas proximidades do polo sul a força apontará para cima. Deste modo, observando a espira como um elemento único, com a devida rigidez mecânica, se terá um movimento da espira no sentido anti-horário, pois em um lado a força a empurra para baixo, enquanto do outro lado a força a empurra para cima. Assim, uma espira imersa em um campo magnético, ao ser submetida a circulação de corrente elétrica, irá girar, caracterizando o funcionamento do motor de corrente contínua, conforme mostrado na Figura 33.

Ao se observar a Figura 33 se nota que ao ocorrer alinhamento entre a espira e as linhas do campo magnético, se terá a força máxima, enquanto que, ao estarem perpendiculares entre si, a espira e o campo magnético, a força resultante será nula. Neste caso, como se utilizam comutadores e escovas para conexão da parte móvel (espiras e bobinas) com o circuito externo (parte fixa, fonte de alimentação), se configura o sistema para se ter a conexão mais efetiva durante os instantes em que se tem alinhamento entre o campo e a espira, para se ter força e torque máximo no rotor.

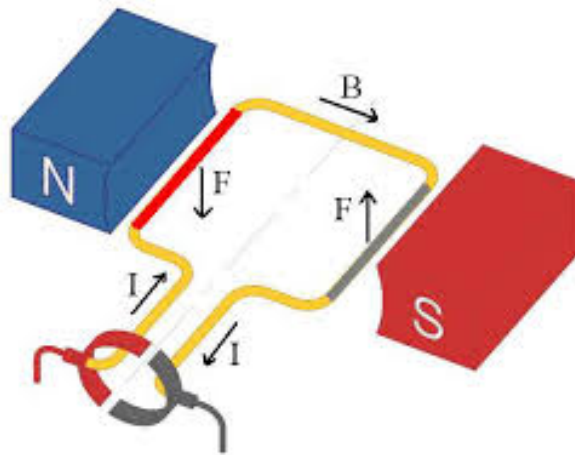


Figura 32 – Espira imersa em um campo magnética.

Fonte: <https://www.dt.fee.unicamp.br>. Acessado em 17/06/2021.

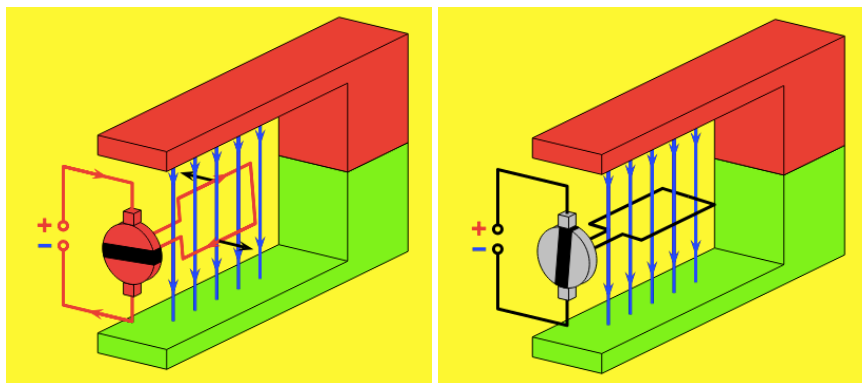


Figura 33 – Funcionamento do motor de corrente contínua.

Fonte: <https://www.walter-fendt.de>. Acessado em 17/06/2021.

O princípio gerador, por sua vez, determina que uma espira ou bobina, imersa em um campo magnético variante no tempo, estará sujeita a uma corrente induzida, constituindo um gerador eletromagnético, como mostrado nas Figura 34 e Figura 35.

O gerador mostrado nas Figura 34 e Figura 35 tem o campo magnético constante e fixo, mas a espira é movimentada, o que origina a variação de fluxo magnético na mesma, conforme sua posição relativa às linhas de campo magnético. Assim, ao se conectar os terminais da espira ao circuito externo e se medir a tensão induzida, se terá a geração de uma forma de onda senoidal, conforme se observa nas figuras.

As Figura 34 e Figura 35 mostram que ao se ter a espira em posição perpendicular às linhas de campo magnético, se terá tensão induzida nula, observada pela passagem por zero na forma de onda das figuras. Por outro lado, quando se tem o alinhamento entre a espira e as linhas de campo magnético, se tem indução máxima, caracterizada pelos valores máximos (picos) na amplitude da tensão gerada. Além disso, é importante observar pelas Figura 34 e Figura 35 que conforme a

posição da espira, visto não se estar utilizando comutadores e escovas, mas escovas e anéis de conexão fixos, se tem ora tensão positiva, ora tensão negativa, ou seja, ocorre a inversão da corrente induzida, conforme o alinhamento entre espira e campo magnético.

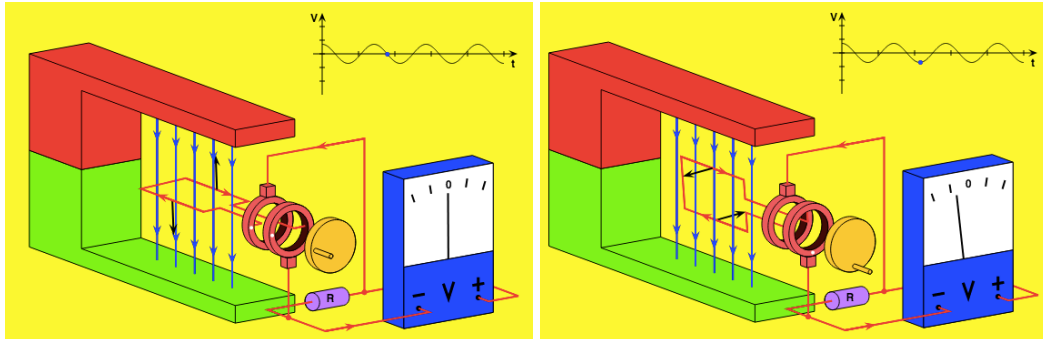


Figura 34 – Funcionamento do gerador de corrente alternada.

Fonte: <https://www.walter-fendt.de>. Acessado em 17/06/2021.

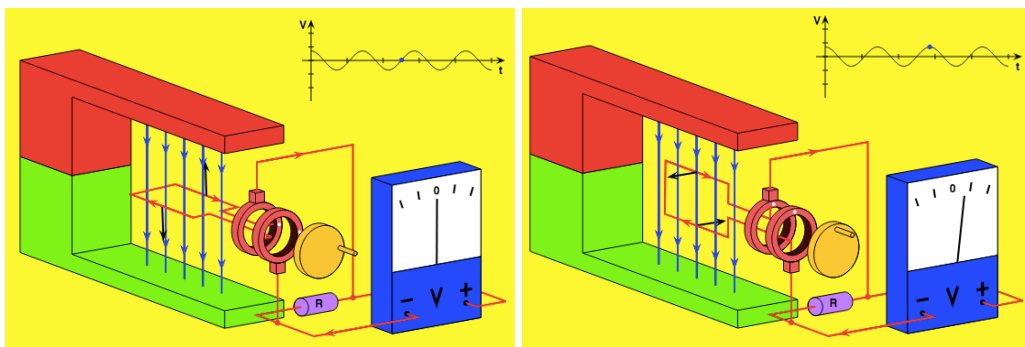


Figura 35 – Funcionamento do gerador de corrente alternada.

Fonte: <https://www.walter-fendt.de>. Acessado em 17/06/2021.

6 Características de Elementos Magnéticos

6.1 Introdução

Este tópico tem por objetivo apresentar alguns aspectos importantes de elementos magnéticos, como por exemplo os tipos de núcleos magnéticos e os efeitos que devem ser levados em conta em termos de escolha de condutores para os diferentes dispositivos eletromagnéticos.

6.2 Tipos de núcleos magnéticos

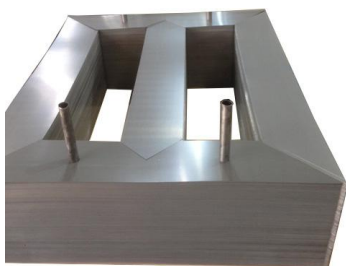
Os núcleos magnéticos mais utilizados na área eletroeletrônica são ferro-silício, ferrite e pós-metálicos. A Figura 36 mostra alguns exemplos dos diferentes materiais utilizados como núcleos magnéticos, onde se nota que o núcleo de ferrite é do tipo E, enquanto o núcleo de pós-metálicos é do tipo toroidal.

O material a ser utilizado em cada núcleo é escolhido em função da frequência de operação do elemento magnético e das perdas no mesmo, pois a medida que a frequência aumenta as perdas, em geral, devem aumentar também. Assim, em baixas frequências (da ordem de 60 Hz), se utilizam núcleos de ferro-silício, que possuem alta permeabilidade, mas tem maiores perdas em alta frequência inviabilizando seu uso em conversores cc-cc, por exemplo. Por outro lado, em baixas frequências não é vantajoso usar núcleos de ferrite, pois estes tem permeabilidade menor que os núcleos de ferro-silício. Já em altas frequências se utilizam os núcleos de ferrite e pós-metálicos, que tem permeabilidade menor que o ferro-silício, mas apresentam menores perdas em alta frequência.

Assim, os materiais magnéticos podem ser utilizados em baixas e altas frequências, no entanto, a escolha do material mais adequado levará a um projeto com menor peso e volume, implicando também em redução de custo e conseqüentemente um produto final mais competitivo.

Em resumo, os principais materiais empregados para construção de núcleos magnéticos e suas características são:

- Ferro: alta permeabilidade, ciclo histerético estreito e baixa resistividade;
- Ligas de ferro-silício: até 6,5% de silício, mas se torna quebradiço. Máquinas estáticas usam mais Si do que máquinas girantes;
- Imãs permanentes: devem ter elevado magnetismo residual, por isso usam materiais duros;
- Ferrites: sinterização de óxidos metálicos possuindo alta resistividade. Usados em altas frequências devido a alta resistividade;
- Ligas ferro-níquel: permalloy (78,5% de Ni) tem alta permeabilidade, baixas perdas por histerese e força magnetizante fraca. Deltamax – orthonic (48% de Ni) tem alta permeabilidade e laço de histerese retangular na direção da laminação.



núcleo de ferro-silício



núcleos de ferrite



núcleos de pós-metálicos

Figura 36 – Tipos de núcleos magnéticos.

Fonte: <http://www.tessin.com.br>; <http://www.thornton.com.br> e <http://www.magmattec.com>.

Acesso em: 22/09/2020.

6.3 Perdas nos dispositivos eletromagnéticos

As perdas em um elemento magnético, por exemplo um indutor ou transformador, serão no núcleo e no enrolamento, sendo conhecidas como perdas no núcleo e perdas no fio.

As perdas no núcleo se devem a energia necessária para orientar os domínios magnéticos durante as fases de magnetização e desmagnetização do material magnético e também devido as correntes parasitas, pois se o núcleo for de material condutor ou semicondutor, se terá correntes induzidas no mesmo e conseqüentemente circulação de corrente e efeito Joule, provocando também aquecimento no material magnético.

As espiras que constituem o enrolamento (bobinado) do dispositivo magnético (indutor, transformador, motor, relé, etc.) terão resistência ôhmica e dissiparão potência na forma de calor, devido ao efeito Joule que irá ocorrer em função da circulação das cargas elétricas nos condutores.

Assim, em síntese se tem que as perdas em um dispositivo magnético são:

- Perdas no enrolamento – perdas por efeito Joule nos condutores (espiras);
- Perdas no núcleo:
 - Perdas por histerese – perdas para a orientação dos domínios magnéticos;
 - Perdas por correntes parasitas – perdas por efeito Joule pela indução de correntes no próprio núcleo.

6.4 Efeitos nos condutores dos elementos magnéticos

A escolha dos condutores para a construção do elemento magnético não é apenas realizada em função da corrente que irá circular pelo mesmo, mas levando em conta também outros efeitos que podem ocorrer na presença de campos magnéticos e/ou altas frequências.

O campo magnético produzido nas espiras do elemento magnético origina o efeito de proximidade, que representa a força a qual as cargas elétricas ficam submetidas devido às espiras que estão próximas a esta. Em correntes da ordem de centenas de ampères o efeito de proximidade se torna significativo e deve ser levado em conta.

Por sua vez, o efeito pelicular (*skin*) faz com que a corrente se concentre na periferia do condutor quando se opera em frequências altas. Este efeito restringe a seção do condutor para frequências elevadas. O efeito pelicular restringe a área útil do condutor em relação à frequência de operação. Isso significa que se deve utilizar condutores com seção menor do que a profundidade de penetração da corrente, dada pela expressão a seguir, que especifica o raio máximo que o condutor deverá possuir para que a corrente ocupe toda a sua área útil.

7 Exercícios

Exercícios Resolvidos

ER 01. Cite dois exemplos de dispositivos eletromagnéticos.

Indutores e transformadores.

ER 02. Em geral se utilizam materiais magnéticos de alta permeabilidade para a construção de dispositivos eletromagnéticos. Qual a razão para isso?

Para que se tenha campos magnéticos mais intensos com menor número de espiras, menor peso e volume.

ER 03. Quais são as principais perdas em um elemento magnético?

As perdas no núcleo (histerese e correntes parasitas) e as perdas nos condutores.

ER 04. A Lei de Faraday determina que todo condutor imerso em um campo magnético que está variando fica sujeito a uma força eletromotriz. Cite elementos práticos onde se aplica a Lei de Faraday.

Indutores, transformadores e motores.

ER 05. Como é chamada a relação entre o número de espiras do primário e do secundário de um transformador?

Relação de transformação.

Exercícios Propostos

EP 01. Explique com suas palavras o que é campo magnético?

EP 02. Cite tipos de materiais utilizados para fabricação de núcleos magnéticos.

EP 03. Explique com suas palavras o que é relutância magnético?

EP 04. O que é o princípio motor?

EP 05. Qual unidade de medida de indutância?

8 Atividade Avaliativa

8.1 Introdução – O que preciso saber

Ao final deste objetivo de aprendizagem são apresentadas cinco questões, que devem ser respondidas sem consultar o material. Se você conseguir responder as questões e conferir as respostas com o gabarito abaixo, parabéns, você concluiu com êxito este tópico. Caso tenha errado alguma questão, revise o conteúdo relacionado com a mesma e refaça a questão, procurando se concentrar mais desta vez, para acertar o exercício e fixar bem o conteúdo.

AA 01. O que é campo magnético?

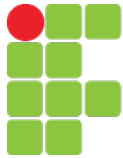
AA 02. Cite exemplos de dispositivos onde se utiliza a força eletromagnética.

AA 03. A tensão induzida sobre um elemento a partir da variação do fluxo magnético é expressa por qual Lei?

AA 04. O que são perdas de histerese?

AA 05. O que significa a saturação de um elemento magnético?

AA 01. Campo magnético é a região do espaço onde se tem a presença de linhas de campo e fenômenos magnéticos.
AA 02. Motores elétricos, geradores elétricos, relés, contadores, campainhas, etc.
AA 03. Lei de Faraday.
AA 04. As perdas por histerese representam a energia necessária para orientar e desorientar os domínios magnéticos do material.
AA 05. A saturação do material magnético ocorre quando todos os domínios estão orientados. Neste caso, ao se aumentar a corrente, a densidade de campo magnético não aumenta proporcionalmente.



INSTITUTO FEDERAL
SANTA CATARINA

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA

DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA

CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM ELETRÔNICA INDUSTRIAL

Acionamentos Eletrônicos



GUIA DE ESTUDO

- OBJETIVO DE APRENDIZAGEM - TRANSFORMADORES

Prof. Clóvis Antônio Petry.

Florianópolis, junho de 2021.

TRANSFORMADORES

Objetivo de Aprendizagem

Estudar transformadores de baixa tensão.

Objetivos parciais

- Conhecer o princípio de funcionamento dos transformadores;
- Conhecer os principais tipos de transformadores;
- Realizar cálculos envolvendo transformadores.

Aulas relacionadas

Este objetivo de aprendizagem está relacionado com a aula 05 da disciplina.

Pré-requisitos

Ter estudado o objetivo de aprendizagem 04 relacionado a revisão de eletromagnetismo.

Continuidade dos Estudos

O próximo objetivo de aprendizagem será o estudo dos princípios das máquinas rotativas.

Roteiro para estudos

Os estudos referentes a este objetivo de aprendizagem consistem em:

1. Estudar este documento resumo, realizando as atividades propostas no mesmo;
2. Responder o quiz relacionado a este objetivo de aprendizagem;
3. Caso perceba necessidade, estudar a apresentação deste assunto ou consultar os livros texto indicados para esta disciplina;
4. Realizar os exercícios deste tópico da matéria;
5. Realizar a avaliação final para progredir ao próximo conteúdo.

Referências

- Material disponibilizado para a disciplina de Acionamentos Eletrônicos – 2021/1.
Departamento Acadêmico de Eletrônica, Instituto Federal de Santa Catarina, Campus Florianópolis.
- BOYLESTAD, Robert. Introdução à análise de circuitos. Tradução de Daniel Vieira, Jorge Ritter. 12ª ed. São Paulo: Pearson, 2012.

Check-list

Caro estudante, verifique se você completou as atividades deste objetivo de aprendizagem e obteve êxito para continuar seus estudos.

Assinale as atividades realizadas:

Estudo do documento resumo:

- Leitura do documento resumo;
- Exercícios do documento resumo;
- Atividade avaliativa do documento resumo.
- Obtive êxito e entendi o conteúdo deste documento;
- Ainda não entendi bem o conteúdo e estudarei o mesmo com mais profundidade.

Estou com dúvidas, irei estudar com mais detalhes este conteúdo:

- Assistir a apresentação relacionada ao conteúdo (apresentação 05);
- Ler este guia de estudo (objetivo de aprendizagem 05).

Ainda estou com dúvidas:

- Entrarei em contato com o professor.

Obtive êxito, então seguirei em frente:

- Responder ao quiz deste conteúdo no Moodle;
- Informar ao professor que estou avançando com o conteúdo.

Parabéns, continue estudando com afinco e vamos em frente!!

CONTEÚDO

- OBJETIVO DE APRENDIZAGEM - TRANSFORMADORES

1 Introdução

O capítulo anterior versou sobre os princípios e conceitos do eletromagnetismo, onde se estudou as Leis de Faraday e Lenz.

Este capítulo tem como objetivo o estudo dos transformadores, dispositivos eletromagnéticos onde se aplica diretamente os princípios do eletromagnetismo e suas leis.

1.1 Conteúdo – O que irei estudar

Estudaremos neste tópico:

- Princípio de funcionamento dos transformadores;
- Tipos de transformadores;
- Cálculos envolvendo transformadores.

1.2 Metodologia – O que devo fazer e como fazer

Leia com atenção o conteúdo a seguir. Ao final deste tópico são apresentados exercícios resolvidos. Após são apresentados alguns exercícios propostos.

Ao realizar estas atividades e se sentir confiante para progredir, siga os passos indicados na primeira página deste documento.

Espera-se que após estudar este assunto, você consiga:

- Descrever o funcionamento de um transformador;
- Citar tipos de transformadores;
- Realizar cálculos simples envolvendo transformadores.

A atividade avaliativa deste objetivo de aprendizagem consistirá em perguntar ao estudante para descrever o funcionamento de um transformador, por exemplo.

Exemplo de atividade avaliativa:

1. Explicar com suas palavras o funcionamento de um transformador.
2. Citar tipos de transformadores.
3. Citar os principais parâmetros de transformadores.
4. Realizar cálculos envolvendo transformadores.
5. Citar aplicações dos transformadores.

2 Princípio de Funcionamento dos Transformadores

2.1 Introdução

Os transformadores são dispositivos eletromagnéticos amplamente utilizados em eletricidade e eletrônica, desde o início do processo de uso da energia elétrica pelos seres humanos.

Assim, neste capítulo será estudado o princípio de funcionamento dos transformadores, para na sequência se estudar os tipos de transformadores e os principais cálculos relacionados com os mesmos.

2.2 Princípio de funcionamento do transformador

As Leis de Faraday e de Lenz se aplicam aos transformadores, do mesmo modo que se aplicam aos indutores. Considere o transformador da Figura 1, onde se tem o acoplamento entre os dois enrolamentos realizado pelo ar. Lembre que o enrolamento no qual a fonte é conectada é denominado primário, e o enrolamento no qual a carga é conectada é chamado de secundário.

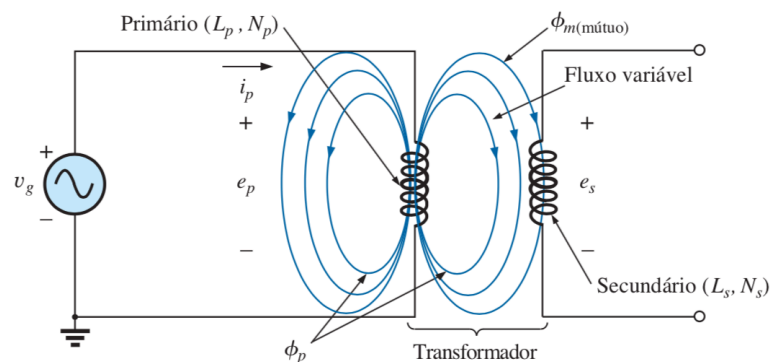


Figura 1 – Transformador com núcleo de ar.

Fonte: (Boylestad, 2012).

O fluxo criado pelo enrolamento primário é denominado de Φ_p e o fluxo que envolve o secundário é denominado de fluxo mútuo Φ_m .

A tensão induzida sobre o enrolamento primário será:

$$e_p(t) = N_p \frac{d\phi_p}{dt}$$

$$e_p(t) = L_p \frac{di_p}{dt}$$

Para o enrolamento secundário se terá:

$$e_s(t) = N_s \frac{d\phi_s}{dt}$$

$$e_s(t) = L_s \frac{di_s}{dt}$$

Como o fluxo se mantém tem-se:

$$\phi_m = \phi_s$$

Então:

$$e_s(t) = N_s \frac{d\phi_p}{dt}$$

A relação entre o fluxo do primário e o fluxo mútuo é o coeficiente de acoplamento do transformador, que idealmente seria unitário. Quanto melhor acoplados estiverem os enrolamentos, mais próximo da unidade será este fator.

$$k = \frac{\phi_m}{\phi_p}$$

Para transformadores com núcleo de material ferromagnético, conforme mostrado na Figura 2, considerando operação com tensão de entrada senoidal:

$$i_p(t) = \sqrt{2} \cdot I_p \cdot \text{sen}(\omega t)$$

$$\phi_m = \Phi_m \cdot \text{sen}(\omega t)$$

A tensão induzida no primário será:

$$e_p(t) = N_p \frac{d\phi_p}{dt} = N_p \frac{d\phi_m}{dt}$$

$$e_p(t) = N_p \frac{d(\Phi_m \cdot \text{sen}(\omega t))}{dt} = \omega \cdot N_p \cdot \Phi_m \cdot \cos(\omega t) = \omega \cdot N_p \cdot \Phi_m \cdot \text{sen}(\omega t + 90^\circ)$$

O valor eficaz da tensão no primário será:

$$E_{p(ef)} = \frac{\omega \cdot N_p \cdot \Phi_m}{\sqrt{2}}$$

Portanto:

$$E_{p(ef)} = 4,44 \cdot f \cdot N_p \cdot \Phi_m$$

Esta relação pode ser utilizada para o projeto de transformadores operando em baixa frequência e com tensão senoidal na entrada.

Considerando que o fluxo no primário e secundário será igual, isto é, que o acoplamento entre os enrolamentos seja unitário, se tem:

$$E_{s(ef)} = 4,44 \cdot f \cdot N_s \cdot \Phi_m$$

Portanto:

$$\frac{E_{p(ef)}}{E_{s(ef)}} = \frac{4,44 \cdot f \cdot N_p \cdot \Phi_m}{4,44 \cdot f \cdot N_s \cdot \Phi_m}$$

$$\frac{E_{p(ef)}}{E_{s(ef)}} = \frac{N_p}{N_s}$$

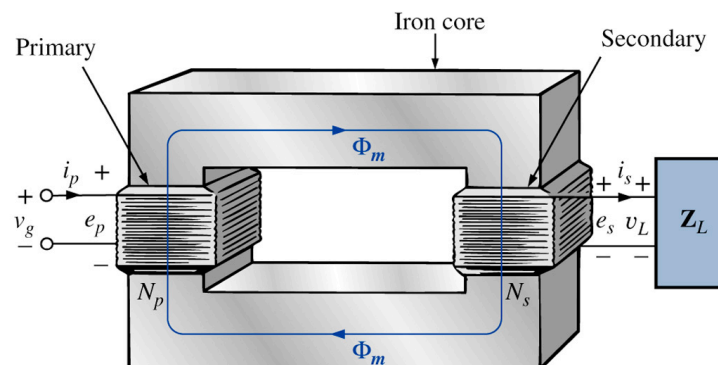


Figura 2 – Transformador com núcleo ferromagnético.

Fonte: (Boylestad, 2012).

2.3 Modelo elétrico do transformador

O circuito elétrico equivalente completo de um transformador é mostrado na Figura 3 onde se pode notar as capacitâncias dos enrolamentos (C_p e C_s), a resistência do enrolamento primário (R_p) e do enrolamento secundário (R_s), a indutância de dispersão (devida ao fluxo disperso/não-acoplado) do primário (L_p) e do secundário (L_s), as perdas no núcleo representadas por uma resistência (R_c), a indutância de magnetização (L_m) responsável por criar o campo magnético para o funcionamento do elemento magnético, e finalmente as indutâncias do primário e secundário representadas por N_p e N_s .

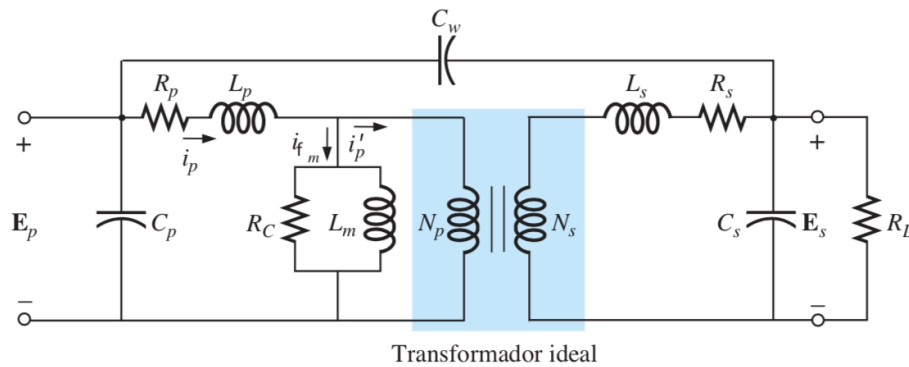


Figura 3 – Circuito elétrico equivalente de um transformador.

Fonte: (Boylestad, 2012).

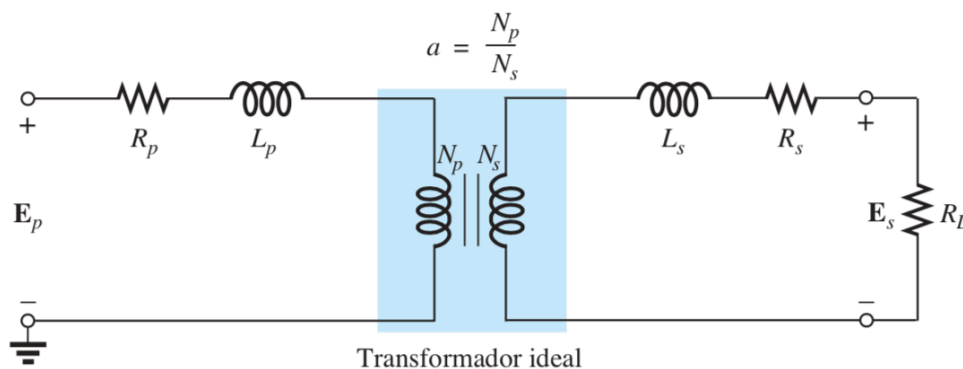


Figura 4 – Circuito elétrico equivalente e simplificado de um transformador.

Fonte: (Boylestad, 2012).

Em geral o circuito da Figura 3 será simplificado, usando-se o circuito da Figura 4. Isso é feito pelo fato de que em frequências baixas (60 Hz) e médias (<500 kHz) pode-se ignorar as capacitâncias dos enrolamentos. Além disso, a corrente de magnetização normalmente é menor do que 10% da corrente nominal do transformador, sendo desprezada quando se opera em baixa frequência (60 Hz), assim a indutância L_m é retirada do circuito. Por fim, as perdas podem ser calculadas em separado, tirando-se também a resistência R_c .

2.4 Polaridade dos enrolamentos de um transformador

Um transformador possui dois ou mais enrolamentos e isso implica que as tensões induzidas e correntes que circulam pelos mesmos tem sentidos e polaridades determinadas pela forma como as espiras são bobinadas (enroladas) no carretel. Deste modo, é muito importante durante a construção do transformador, que sejam identificadas as polaridades dos enrolamentos. Isso pode ser feito por meio de marcações nos fios, indicando o início e fim de cada bobina.

A Figura 5 mostra um transformador com um sinal alternado aplicado no enrolamento primário. A forma de onda obtida em sua saída (enrolamento secundário) é mostrada na mesma

figura. Atente para a fase dos sinais de entrada e de saída.

Por sua vez, na Figura 6 se tem um transformador com a polaridade trocada entre primário e secundário. Verifique que os sinais estão em anti-fase.

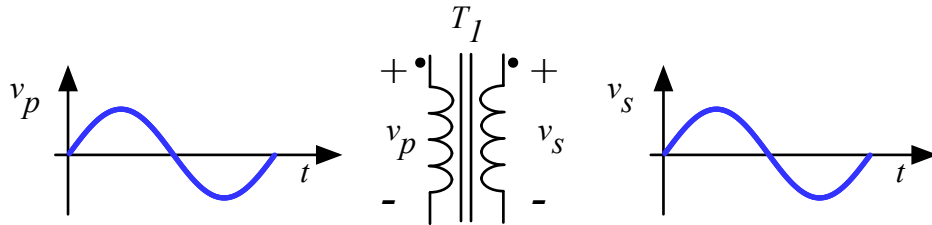


Figura 5 – Transformador com sinais em fase (polaridade igual).

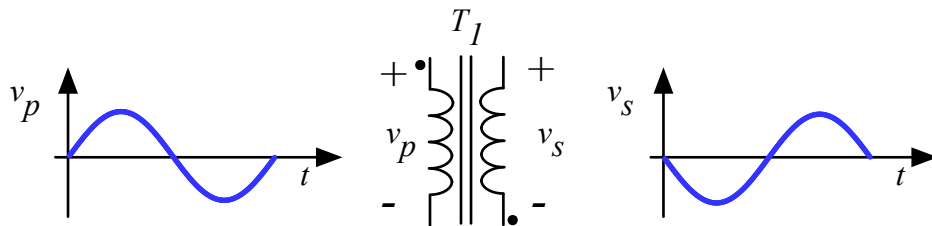


Figura 6 – Transformador com sinais defasados (polaridade diferente).

A polaridade (ponto ao lado dos enrolamentos) é definida no momento de se enrolar as espiras no carretel. Para demonstrar como isso ocorre, mostra-se na Figura 7 um transformador com núcleo cilíndrico e três enrolamentos. Pode-se verificar que os enrolamentos N_1 e N_2 estão com as polaridades iguais (mesmo sentido do enrolamento), enquanto o enrolamento N_3 está com a polaridade trocada, pois foi enrolado em sentido contrário. Atente para a fase dos sinais mostrados na figura.

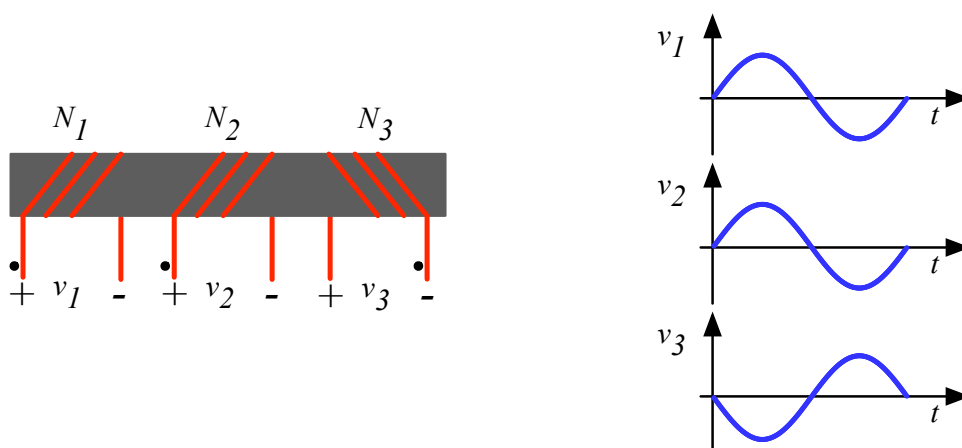


Figura 7 – Transformador com núcleo cilíndrico e identificação da polaridade das bobinas.

3 Principais Relações em um Transformador

3.1 Introdução

As principais relações entre as grandezas na entrada e na saída de um transformador caracterizam seu funcionamento e as diversas aplicações onde os transformadores são utilizados.

Este tópico tem por objetivo apresentar, para transformadores ideais, as principais relações entre as tensões, correntes e potências na entrada e na saída dos transformadores.

3.2 Relação de transformação

A relação de transformação é uma das principais características de um transformador, pois a mesma especifica se o elemento é elevador, abaixador ou apenas isolador, por exemplo.

Em termos de número de espiras entre os enrolamentos primário (entrada) e secundário (saída), considerando um transformador com dois enrolamentos, como mostrado na Figura 8, se tem:

$$RT = \frac{N_p}{N_s}$$

Assim, um transformador que tem relação entre o número de espiras do primário e secundário de 10:1, terá:

$$RT = \frac{N_p}{N_s} = \frac{10}{1}$$

É importante destacar que a relação de transformação não apresenta o número de espiras real, mas apenas a relação entre os enrolamentos.

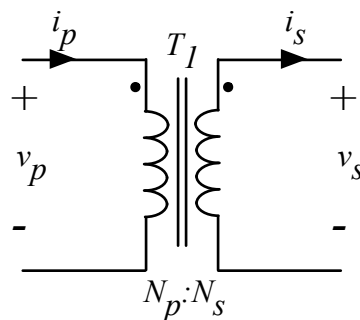


Figura 8 – Transformador com dois enrolamentos.

Um transformador de dois enrolamentos, pode ter as seguintes relações de transformação:

- $RT = 1$ – transformador isolador, onde a tensão de entrada é igual a tensão de saída;
- $RT > 1$ – Transformador abaixador, onde a tensão de entrada (primário) é maior que a tensão de saída (secundário);
- $RT < 1$ – Transformador elevador, onde a tensão de entrada (primário) é menor do que a tensão de saída (secundário).

É oportuno destacar que os enrolamentos de um transformador podem ser usados tanto como entrada ou saída, sendo comumente chamado de primário (entrada) o enrolamento onde se conecta a fonte de alimentação e secundário (saída) o enrolamento onde se conectam as cargas.

Transformadores com mais enrolamentos terão diferentes relações de transformação. Assim, para um transformador de três enrolamentos, como mostrado na Figura 9, se terá:

$$RT_1 = \frac{N_p}{N_s}$$

$$RT_2 = \frac{N_p}{N_t}$$

O transformador da Figura 9 tem um enrolamento primário e dois enrolamentos secundários, neste caso identificados como secundário e terciário.

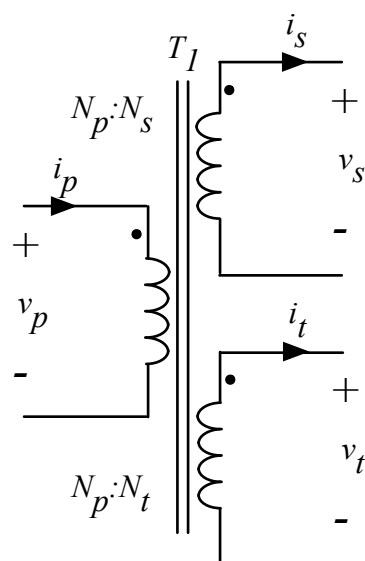


Figura 9 – Transformador com três enrolamentos.

3.3 Relação entre as tensões de entrada e de saída

A partir das Leis de Faraday e Lenz, para o transformador da Figura 8, se tem:

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

Assim, a relação entre a tensão do primário e a tensão do secundário é dada diretamente pela relação entre o número de espiras entre os enrolamentos, isto é, pela relação de transformação. Para um transformador com mais enrolamentos, se aplica a mesma regra, tendo-se então:

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

$$\frac{V_p}{V_t} = \frac{N_p}{N_t}$$

3.4 Relação entre as potências de entrada e de saída

Em um transformador ideal, as perdas são consideradas iguais a zero. Assim, o rendimento, que é a relação entre a potência de entrada e de saída será unitário, portanto:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_s}{P_p}$$

$$\eta = 1 \rightarrow P_p = P_s [W]$$

Em termos práticos o rendimento de um transformador não será zero, mas em geral é maior que 90%. Assim, a potência de entrada será superior a potência de saída, pois se tem a corrente de magnetização e as perdas nos fios e no núcleo, que elevam a corrente no primário, em relação ao secundário.

A potência aparente de um transformador é calculada pelo produto da tensão eficaz pela corrente eficaz em cada enrolamento, tendo-se então:

$$S_s = V_s \cdot I_s [VA]$$

$$S_p = V_p \cdot I_p [VA]$$

Para o transformador ideal, a potência aparente no primário (S_p) é igual a potência aparente no secundário (S_s).

3.5 Relação entre as correntes de entrada e de saída

A partir do princípio da conservação da energia, considerando um transformador ideal, onde a potência na entrada é igual a saída, se terá:

$$\begin{cases} S_s = V_s \cdot I_s \\ S_p = V_p \cdot I_p \end{cases} \rightarrow \eta = 1 \rightarrow S_p = S_s \rightarrow V_p \cdot I_p = V_s \cdot I_s$$

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{I_s}{I_p}$$

Note que a relação entre as correntes é o inverso da relação de transformação, enquanto a relação entre as tensões é a própria relação de transformação:

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

$$\frac{I_p}{I_s} = \frac{N_s}{N_p}$$

4 Tipos de Transformadores

4.1 Introdução

As aplicações dos transformadores são inúmeras, desde elementos pequenos até centenas de kVA nos sistemas de geração e distribuição de energia elétrica.

Os transformadores podem ser classificados, em resumo, como:

- Relação de transformação – Em termos de relação de transformação, os transformadores podem ser abaixadores ou elevadores, ou ainda, ter relação de transformação unitário, como exemplo dos transformadores isoladores;
- Frequência de operação – Em termos de frequência de operação, em geral, os transformadores são classificados como de baixa frequência (60 Hz) ou alta frequência (> 1 kHz);
- Potência de operação – Os transformadores podem ter diversas potências de operação desde mW até centenas de kW;
- Número de fases – Em relação ao número de fases, um transformador pode ser monofásico (1 fase), bifásico (2 fases), trifásico (3 fases) ou polifásico (n-fases);
- Aplicações – As aplicações dos transformadores são as mais diversas, desde fontes de alimentação, sistemas de geração, transmissão e distribuição de

energia elétrica, equipamentos médicos e odontológicos, máquinas de soldas, dentre outras.

A seguir serão apresentados alguns tipos de transformadores, comumente aplicados na área de eletrônica.

4.2 Transformadores abaixadores

Os transformadores mais comuns são aqueles utilizados em fontes de alimentação lineares, que operam com frequência de 60 Hz e reduzem a tensão da rede de energia elétrica de 110 ou 220 V para tensões da ordem de 12 V, por exemplo.

A Figura 10 mostra um transformador com entrada em 110/220 V e saída de 12 V com corrente de 2 A.

A corrente apresentada pelo fabricante na etiqueta de identificação pode não ser a corrente eficaz do transformador. Assim, deve-se consultar as tabelas de informações do fabricante para obter a corrente específica de cada elemento.



Figura 10 – Transformador abaixador.

Fonte: <https://www.filipeflop.com>. Acesso em 23/06/2021.

4.3 Transformadores elevadores

Os transformadores elevadores de tensão podem ser utilizados nos sistemas de geração e transmissão de energia elétrica, ou em aplicações específicas. A Figura 11 mostra o exemplo de um transformador elevador utilizado em esteiras transportadoras.

4.1 Transformadores isoladores

Em aplicações onde se faz necessário o isolamento entre a entrada e a saída, mesmo sem alteração na amplitude das tensões, se utilizam os transformadores isoladores, como mostrado na Figura 12.

Este transformador tem a mesma tensão na entrada e na saída, mas permite obter isolamento elétrico entre os enrolamentos, podendo ser utilizado para a proteção dos usuários contra choques elétricos ou para a conexão de instrumentos de medição, por exemplo.



Figura 11 – Transformador elevador.

Fonte: <https://www.solucoesindustriais.com.br>. Acesso em 23/06/2021.



Figura 12 – Transformador isolador.

Fonte: <https://www.eletopecas.com>. Acesso em 23/06/2021.

4.2 Autotransformadores

Os autotransformadores são transformadores com apenas um enrolamento, podendo ter diversas derivações (*taps*) para a saída ou entrada de diferentes tensões.

A vantagem de se utilizar autotransformadores é a redução de custo e volume, visto este elemento empregar apenas um enrolamento. Por outro lado, não se tem mais o isolamento entre a entrada e a saída do transformador.

Os autotransformadores são utilizados, por exemplo, na partida de motores trifásicos, na implementação de estabilizadores de tensão, dentre outras aplicações.

A Figura 14 mostra o exemplo de um autotransformador simples, com um enrolamento com derivação central, isto é, o número de espiras N_1 seria igual ao número de espiras N_2 .

Neste exemplo, o transformador poderia ser utilizado para a conversão de 220 V em 110 V, pois a tensão de entrada (v_i) será o dobro da tensão de saída (v_o).

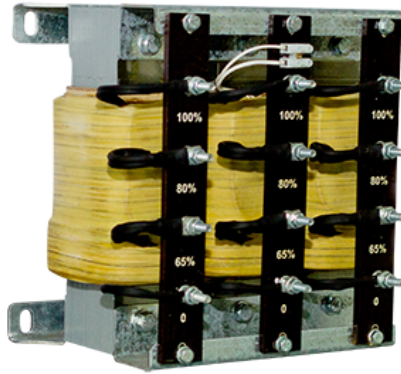


Figura 13 – Autotransformador trifásico.

Fonte: <https://www.wisetransformadores.com.br>. Acesso em 23/06/2021.

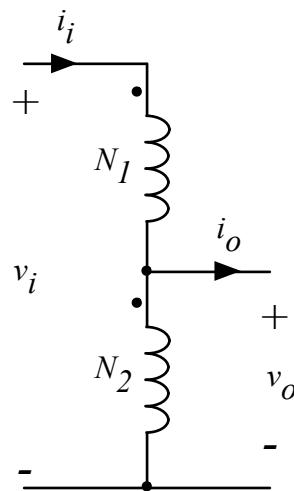


Figura 14 – Autotransformador simples.

4.3 Transformadores para fontes chaveadas

Os transformadores utilizados em fontes chaveadas são para operação em alta frequência (dezenas de kHz), como mostrado na Figura 15. Neste caso utilizam núcleos de ferrite, por exemplo.

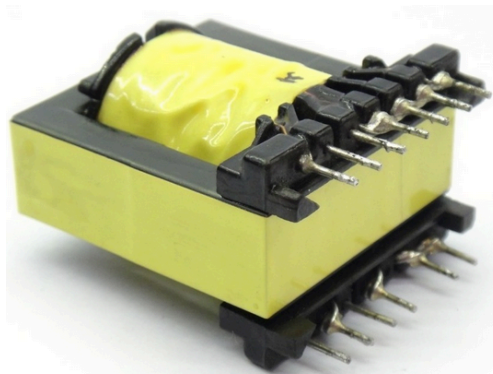


Figura 15 – Autotransformador trifásico.

Fonte: <https://labdegaragem.com>. Acesso em 23/06/2021.

4.4 Transformadores para casamento de impedância

Em aplicações específicas, como áudio, por exemplo, pode ser necessário realizar o casamento da impedância entre diferentes elementos. Nestes casos se utilizam transformadores especialmente projetados para estas aplicações, como mostrado na Figura 16, também conhecidos como transformadores de linha.

O exemplo mostrado na Figura 16 tem impedância de entrada de 500 Ω e saída de 4 Ω ou 8 Ω .

A relação entre a impedância de entrada e de saída é obtida a partir do quadrado da relação de transformação, conforme seja:

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{I_s}{I_p} \cdot \frac{I_p}{I_s} = \frac{N_s}{N_p}$$

$$Z_p = \frac{V_p}{I_p}; Z_s = \frac{V_s}{I_s}$$

$$V_p = V_s \cdot \frac{N_p}{N_s}; I_p = I_s \cdot \frac{N_s}{N_p}$$

$$Z_p = \frac{V_p}{I_p} = \frac{V_s \cdot \frac{N_p}{N_s}}{I_s \cdot \frac{N_s}{N_p}} = \frac{V_s}{I_s} \cdot \frac{N_p}{N_s} \cdot \frac{N_p}{N_s} = Z_s \cdot \left(\frac{N_p}{N_s} \right)^2 = Z_s \cdot (RT)^2$$



Figura 16 – Transformador para casamento de impedância.

Fonte: <https://www.hayama.com.br/>. Acesso em 23/06/2021.

4.5 Transformadores para medição

Os transformadores podem ser utilizados para medição de tensão ou corrente, visando reduzir altas amplitudes para baixas amplitudes, que podem ser processadas por circuitos eletrônicos em baixas tensões.

A Figura 17 mostra exemplos de transformadores de potencial (TP), utilizados para medições de altas tensões, tipicamente do sistema de transmissão de energia elétrica.

Já a Figura 18 mostra exemplos de transformadores de corrente, que podem ser utilizados tanto no sistema de energia elétrica como em uso industrial.

Os transformadores de corrente podem ser utilizados para medição ou para proteção de circuitos, quando são associados com elementos que desligam o circuito ao se ultrapassar a corrente previamente especificada pelo projetista. Assim, para proteção dos circuitos e das cargas ligadas aos mesmos, é comum em aplicações industriais, se medir a corrente elétrica para se desligar o circuito caso seu valor ultrapasse os valores normais de funcionamento do circuito.



Figura 17 – Transformador de potencial (TP).

Fonte: <https://www.rehtom.com.br>. Acesso em 23/06/2021.

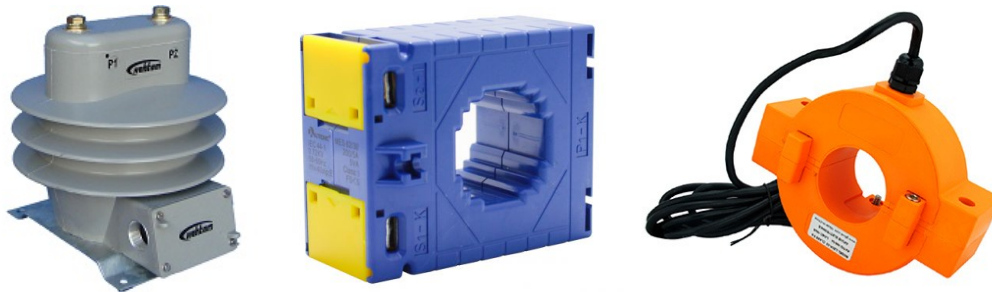


Figura 18 – Transformadores de corrente (TC).

Fonte: <https://www.rehtom.com.br>; <https://www.viewtech.ind.br>; <https://www.choicetech.com.br>. Acesso em 23/06/2021.

4.6 Transformadores de pulsos

Os transformadores de pulsos são elementos para operarem com baixas tensões e correntes, mas projetados para funcionarem em altas frequências, em dezenas de kHz. Tem aplicações em eletrônica de potência, por exemplo, em fontes chaveadas, acionamento de interruptores de potência, expansão de circuitos de acionamento de interruptores, dentre outras.

A Figura 19 mostra um exemplo de transformador de pulsos utilizado em eletrônica de potência, que opera com tensões abaixo de 30 V, correntes abaixo de 100 mA e frequência da ordem de 500 kHz.

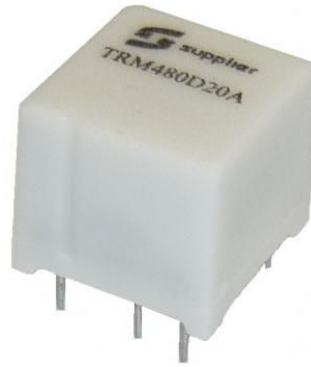


Figura 19 – Transformador de pulso.

Fonte: <https://www.supplier.ind.br>. Acesso em 23/06/2021.

5 Parâmetros e Ensaio de Transformadores

5.1 Introdução

Ao utilizar transformadores em aplicações de eletroeletrônica, é importante se conhecer os principais parâmetros dos mesmos, além dos ensaios básicos que podem ser realizados para se determinar o modelo equivalente de um transformador.

A seguir serão apresentados os principais parâmetros e ensaios simples envolvendo transformadores de baixa tensão.

5.2 Modelo elétrico prático de um transformador de baixa tensão

Em aplicações de baixa tensão, pode-se utilizar um modelo elétrico equivalente para o transformador, conforme mostrado na Figura 20.

Os elementos apresentados neste circuito elétrico equivalente são:

- R_p – Resistência dos condutores do primário;
- R_s – Resistência dos condutores do secundário;
- L_d – Indutância de dispersão total do transformador, referida ao primário;
- L_m – Indutância magnetizante do transformador, referida ao primário;
- $N_p:N_s$ – Transformador ideal com a relação de transformação nominal.

As indutâncias, tanto de dispersão como magnetizante, foram representadas (referidas) no lado primário para fins de simplificação e, considerando a facilidade para medição destes parâmetros em laboratório.

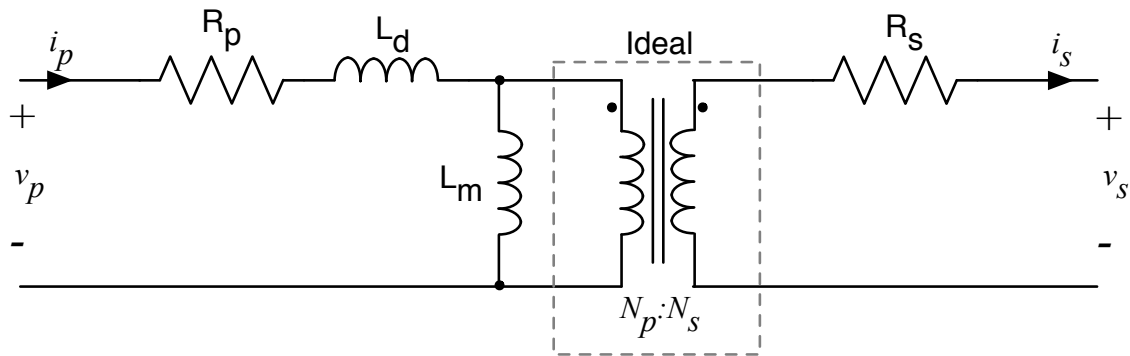


Figura 20 – Modelo elétrico equivalente de um transformador de baixa tensão.

5.3 Ensaios de transformadores

Os ensaios a serem realizados com transformadores tem diferentes objetivos, tais como: obter os elementos do circuito elétrico equivalente, verificar o correto funcionamento do transformador, verificar a operação com carga e sem carga, medir a elevação de temperatura das diferentes partes do transformador, dentre outros.

Em geral, quando se projeta e posteriormente fabrica um transformador, se realizam ensaios para obter os parâmetros do circuito elétrico equivalente e verificar se o elemento construído corresponde ao projeto realizado.

Assim, os elementos mostrados no Figura 20 são medidos como descrito a seguir, considerando o transformador desligado e retirado do circuito elétrico onde será utilizado:

- R_p – Resistência dos condutores do primário será medida com um multímetro na escala de resistência, diretamente no primário;
- R_s – Resistência dos condutores do secundário será medida com um multímetro na escala de resistência, diretamente no secundário;
- L_d – Indutância de dispersão total do transformador, referida ao primário, deve ser medida curto-circuitando os terminais do secundário, medindo-se a indutância com um medidor RLC (multímetro ou ponte de medição de resistência, indutância e capacitância) pelo lado primário;
- L_m – Indutância magnetizante do transformador, referida ao primário, será medida com um medidor RLC pelo lado primário, com o secundário em aberto;
- $N_p:N_s$ – Transformador ideal com a relação de transformação nominal, obtida dividindo-se a tensão de entrada nominal pela tensão de saída nominal.

As grandezas medidas conforme descrito anteriormente podem também ser medidas e calculadas a partir do ensaio de circuito aberto e de curto-circuito do transformador, como usualmente descrito na literatura.

A resistência dos condutores do primário e secundário dependerá do número de espiras e do fio utilizado, sendo que transformadores de baixa potência apresentam valores da ordem de alguns ohms, enquanto transformadores de alta potência tem resistências nos enrolamentos de alguns miliohms, por exemplo.

A indutância de dispersão geralmente é baixa, da ordem de alguns microhenrys, enquanto a indutância magnetizante possui valores de indutância altos, da ordem de dezenas ou centenas de milihenrys.

5.4 Regulação de transformadores

Em virtude da presença de impedância no primário e secundário do transformador, devido as resistências dos enrolamentos e a indutância de dispersão, a tensão de saída do transformador será menor quando se tiver a conexão de carga ao mesmo, ou seja, quando ocorrer a circulação de corrente pelos enrolamentos do transformador.

A relação entre a tensão do secundário a vazio (sem carga) e a plena carga é denominada de regulação de um transformador, sendo que idealmente, as tensões deveriam ser iguais nas duas situações.

A regulação em termos percentuais é calculada por:

$$R_{eg} = \left| \frac{V_{s(vazio)} - V_{s(carga)}}{V_{s(vazio)}} \right| \cdot 100 \text{ [\%]}$$

Onde:

- R_{eg} – Regulação percentual do transformador;
- $V_{s(vazio)}$ – Tensão no secundário do transformador sem carga;
- $V_{s(carga)}$ – Tensão no secundário do transformador com plena carga.

A título de exemplo, considere um transformador de 220 V para 12 V. Ao se medir sua tensão sem carga, se obteve o valor de 14 V. Por outro lado, ao se conectar uma carga para operar com a potência nominal do transformador, se mediu uma tensão de saída de 11 V. Neste caso, a regulação será:

$$R_{eg} = \left| \frac{V_{s(vazio)} - V_{s(carga)}}{V_{s(vazio)}} \right| \cdot 100 = \left| \frac{14 - 11}{14} \right| \cdot 100 = 21,4\%$$

6 Exercícios

Exercícios Resolvidos

ER 01. Explique o que é a relação de transformação de um transformador?

A relação de transformação é a relação entre o número de espiras do primário e do secundário, que também é válida para a relação entre a tensão do primário em relação ao secundário.

ER 02. Cite diferentes tipos de transformadores?

Transformadores isoladores, elevadores, para medição, etc.

ER 03. Um transformador tem relação de transformação de 10:1, sendo que sua tensão de entrada é de 220 V. Qual sua tensão de saída?

A tensão de saída será de $220/10 = 22$ V, pois este transformador é abaixador com relação de 10.

ER 04. A tensão a vazio no secundário de um transformador é de 15 V e com plena carga é de 13 V. Qual a regulação deste transformador?

A regulação será: $R_{eg} = (V_{vazio} - V_{carga})/V_{vazio} \times 100 = (15-13)/15 \times 100 = 13,33\%$.

ER 05. O que é um transformador isolador?

Transformadores isoladores tem a finalidade de isolar eletricamente o secundário do primário, para fins de proteção dos usuários ou medição, podendo ter relação de transformação unitária.

Exercícios Propostos

EP 01. Explique com suas palavras como funciona um transformador?

EP 02. O que são autotransformadores?

EP 03. A tensão de entrada de um transformador é de 220 V e de saída é de 12 V. Qual sua relação de transformação?

EP 04. Explique o que é regulação de um transformador.

EP 05. Cite aplicações para os transformadores.

7 Atividade Avaliativa

7.1 Introdução – O que preciso saber

Ao final deste objetivo de aprendizagem são apresentadas cinco questões, que devem ser respondidas sem consultar o material. Se você conseguir responder as questões e conferir as respostas com o gabarito abaixo, parabéns, você concluiu com êxito este tópico. Caso tenha errado alguma questão, revise o conteúdo relacionado com a mesma e refaça a questão, procurando se concentrar mais desta vez, para acertar o exercício e fixar bem o conteúdo.

AA 01. O que são transformadores de corrente?

AA 02. Um transformador tem relação de transformação de 1:5. Sua tensão de entrada é de 100 V. Qual sua tensão de saída?

AA 03. O que são transformadores para casamento de impedância?

AA 04. Um transformador tem tensão de saída de 7 V a vazio e de 5 V com carga. Qual sua regulação?

AA 05. Cite três tipos de transformadores.

AA 01. Transformadores de corrente são transformadores para medição, geralmente utilizados para obter correntes menores em circuitos de correntes elevadas, como no sistema de transmissão de energia elétrica, por exemplo.

AA 02. Um transformador com relação de transformação de 1:5 é elevador, então sua tensão de saída será de $100 \times 5 = 500$ V.

AA 03. Transformadores para casamento de impedância são elementos que permitem conectar dois circuitos com impedâncias diferentes, com relação dada pelo quadrado da relação de transformação, geralmente utilizados em áudio, por exemplo, e também chamados de transformadores de linha.

AA 04. A regulação será: $R_{eg} = (V_{vazio} - V_{carga}) / V_{vazio} \times 100 = (7 - 5) / 7 \times 100 = 28,6\%$.

AA 05. Exemplos de diferentes tipos de transformadores são: abaixadores, de pulso, de alta frequência.

GUIA DE ESTUDO

- OBJETIVO DE APRENDIZAGEM -
PRINCÍPIOS DE MÁQUINAS ELÉTRICAS
ROTATIVAS

PRINCÍPIOS DE MÁQUINAS ELÉTRICAS ROTATIVAS

Objetivo de Aprendizagem

Estudar os princípios dos motores elétricos.

Objetivos parciais

- Conhecer o princípio de funcionamento dos motores elétricos;
- Conhecer os principais tipos de motores elétricos;
- Conhecer as aplicações dos diferentes tipos de motores elétricos.

Aulas relacionadas

Este objetivo de aprendizagem está relacionado com a aula 06 da disciplina.

Pré-requisitos

Ter estudado o objetivo de aprendizagem 05 relacionado a transformadores.

Continuidade dos Estudos

O próximo objetivo de aprendizagem será o estudo dos motores de corrente contínua.

Roteiro para estudos

Os estudos referentes a este objetivo de aprendizagem consistem em:

1. Estudar este documento resumo, realizando as atividades propostas no mesmo;
2. Responder o quiz relacionado a este objetivo de aprendizagem;
3. Caso perceba necessidade, estudar a apresentação deste assunto ou consultar os livros texto indicados para esta disciplina;
4. Realizar os exercícios deste tópico da matéria;
5. Realizar a avaliação final para progredir ao próximo conteúdo.

Referências

- Material disponibilizado para a disciplina de Acionamentos Eletrônicos – 2021/1.
Departamento Acadêmico de Eletrônica, Instituto Federal de Santa Catarina, Campus Florianópolis.
- STEPHAN, Richard M. Acionamento Comando e Controle de Máquinas Elétricas. Rio de Janeiro: UFRJ, 2009.

Check-list

Caro estudante, verifique se você completou as atividades deste objetivo de aprendizagem e obteve êxito para continuar seus estudos.

Assinale as atividades realizadas:

Estudo do documento resumo:

- Leitura do documento resumo;
- Exercícios do documento resumo;
- Atividade avaliativa do documento resumo.
- Obtive êxito e entendi o conteúdo deste documento;
- Ainda não entendi bem o conteúdo e estudarei o mesmo com mais profundidade.

Estou com dúvidas, irei estudar com mais detalhes este conteúdo:

- Assistir a apresentação relacionada ao conteúdo (apresentação 06);
- Ler este guia de estudo (objetivo de aprendizagem 06).

Ainda estou com dúvidas:

- Entrarei em contato com o professor.

Obtive êxito, então seguirei em frente:

- Responder ao quiz deste conteúdo no Moodle;
- Informar ao professor que estou avançando com o conteúdo.

Parabéns, continue estudando com afinco e vamos em frente!!

CONTEÚDO

**- OBJETIVO DE APRENDIZAGEM -
PRINCÍPIOS DE MÁQUINAS ELÉTRICAS
ROTATIVAS**

1 Introdução

Anteriormente neste curso estudamos os princípios do eletromagnetismo e os transformadores, importantes componentes de circuitos eletroeletrônicos.

Este capítulo tem como objetivo o estudo dos princípios das máquinas elétricas rotativas, ou seja, dos motores elétricos.

1.1 Conteúdo – O que irei estudar

Estudaremos neste tópico:

- Princípio de funcionamento dos motores elétricos;
- Tipos de motores elétricos;
- Aplicações dos principais tipos de motores elétricos.

1.2 Metodologia – O que devo fazer e como fazer

Leia com atenção o conteúdo a seguir. Ao final deste tópico são apresentados exercícios resolvidos. Após são apresentados alguns exercícios propostos.

Ao realizar estas atividades e se sentir confiante para progredir, siga os passos indicados na primeira página deste documento.

Espera-se que após estudar este assunto, você consiga:

- Descrever o funcionamento de um motor elétrico;
- Citar tipos de motores elétricos;
- Explicar as principais aplicações dos motores elétricos.

A atividade avaliativa deste objetivo de aprendizagem consistirá em perguntar ao estudante para descrever o funcionamento de um motor elétrico, por exemplo.

Exemplo de atividade avaliativa:

1. Explicar com suas palavras o funcionamento de um motor elétrico.
2. Citar tipos de motores elétricos.
3. Citar os principais parâmetros dos motores elétricos.
4. Citar as principais grandezas elétricas relacionadas aos motores elétricos.
5. Citar aplicações dos motores elétricos.

2 Princípio de Funcionamento dos Motores Elétricos

2.1 Introdução

Os motores elétricos são dispositivos eletromagnéticos amplamente utilizados em eletricidade e eletrônica, desde o início do processo de uso da energia elétrica pelos seres humanos, para as mais diversas aplicações relacionadas com a necessidade de movimento de cargas.

Assim, neste capítulo será estudado o princípio de funcionamento dos motores elétricos, para na sequência se estudar seus tipos e as principais aplicações destas máquinas elétricas.

2.1 Definição de motor elétrico

O transformador é uma máquina elétrica estática, ou seja, que converte energia na forma elétrica, mas sem elementos que tenham movimento mecânico.

Por sua vez, os motores elétricos são conhecidos como máquinas elétricas rotativas, pois convertem a energia elétrica em movimento, no eixo do mesmo, para acionar alguma carga que utilize este movimento para deslocar objetos, por exemplo.

Em resumo, a definição de motor elétrico, no contexto das máquinas elétricas, é o dispositivo que transforma energia elétrica em mecânica.

Máquina elétrica é um termo mais amplo, que engloba diferentes dispositivos, como motores, geradores e transformadores. Assim, máquinas elétricas rotativas são os motores e geradores elétricos.

2.2 Princípio de funcionamento do motor elétrico

Estudou-se no capítulo sobre revisão de eletromagnetismo, que um condutor percorrido por uma corrente elétrica e imerso em um campo magnético sofre a ação de uma força eletromagnética, conforme mostrado na Figura 1. A partir deste fenômeno tem-se o princípio motor, que determina que um conjunto de espiras imerso em um campo magnético estará sujeito a uma força, denominada de Força de Lorentz, conforme estudado por Hendrik Antoon Lorentz, por volta do ano 1892.

A força resultante sobre uma espira ou conjunto de espiras (bobina) conforme se observa na Figura 2, apontará para baixo na proximidade do polo norte do ímã permanente, enquanto apontará para cima nas proximidades do polo sul do ímã. A partir daí, a espira constituindo um elemento rotativo (rotor), estará sujeita a um movimento de giro, no sentido anti-horário, visto que de um lado a força a empurra para baixo, enquanto do outro lado a força a empurra para cima. Por conseguinte, uma bobina acoplada a um elemento mecânico de suporte, formando um rotor,

quando imersa em um campo magnético e pela qual estiver circulando uma corrente elétrica, irá girar, caracterizando o funcionamento do motor de corrente contínua, conforme mostrado na Figura 3.

A Figura 3 mostra diferentes posicionamentos para a espira ou bobina no interior do campo magnético, verificando-se que ao ocorrer alinhamento entre a espira e as linhas do campo magnético, se terá a força máxima, enquanto que, se a espira e o campo magnético estiverem perpendiculares entre si, a força resultante será nula. Ao se utilizarem comutadores e escovas para conexão da parte móvel (espiras e bobinas) com o circuito externo (parte fixa, fonte de alimentação), o sistema é montado de forma tal que, se deve ter a conexão mais efetiva durante os instantes em que se tem alinhamento entre o campo e a espira, visando força e torque máximos no rotor.

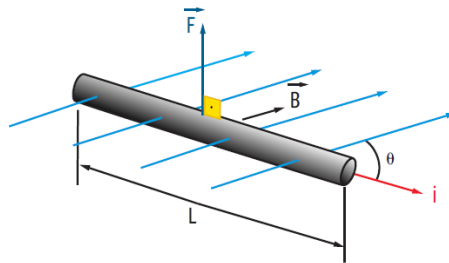


Figura 1 – Força em um condutor retilíneo.

Fonte: <https://guiadoestudante.abril.com.br>. Acessado em 17/06/2021.

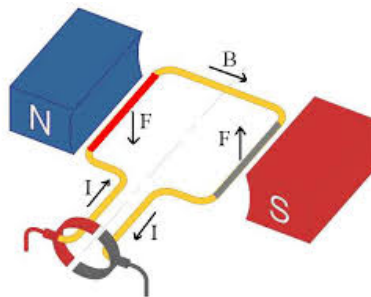


Figura 2 – Espira imersa em um campo magnética.

Fonte: <https://www.dt.fee.unicamp.br>. Acessado em 17/06/2021.

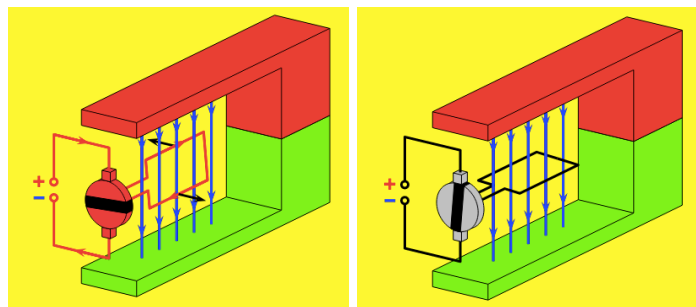


Figura 3 – Funcionamento do motor de corrente contínua.

Fonte: <https://www.walter-fendt.de>. Acessado em 17/06/2021.

2.3 Símbolo elétrico do motor

Os motores elétricos podem ter diferentes símbolos, mas em geral são representados por um círculo com a letra M de motor. Na Figura 4 mostra o símbolo típico para um motor elétrico, identificando-se sua tensão e corrente.

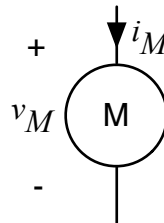


Figura 4 – Símbolo elétrico do motor.

2.4 Classificação dos motores elétricos

Os motores elétricos são classificados em dois grandes grupos, que são os motores de corrente contínua e os motores de corrente alternada; sendo que na Figura 5 se mostra uma possível classificação dos motores elétricos, tendo-se assim como resultado a Tabela 1.

Tabela 1 – Classificação dos motores elétricos.

Níveis de classificação				
1	2	3	4	5
Motor CA	Monofásico	Assíncrono	Gaiola de esquilo	Fase dividida
				Capacitor de partida
				Capacitor permanente
				Pólos sombreados
				Capacitor dois valores
			Rotor bobinado	Repulsão
			Rotor maciço	Histerese
			Síncrono	Relutância
				Imãs permanentes
		Linear		Indução
				Imãs permanentes
		Trifásico	Assíncrono	De gaiola
	Rotor bobinado			
	Imãs permanentes			
	Síncrono		Relutância	
			Pólos lisos	
			Pólos salientes	
Universal				
Motor CC	Excitação série			
	Excitação independente			
	Excitação composta			
	Imãs permanentes			
	Excitação paralela			

Fonte: Adaptado de (WEG, 2006)¹.

¹ WEG. Motores Elétricos. Disponível em <https://www.weg.net>. Acessado em 27/06/2006.

3 Tipos de Motores Elétricos

3.1 Introdução

A partir da classificação dos motores elétricos vista no capítulo anterior, serão apresentados os principais tipos de motores elétricos e suas aplicações.

3.2 Motores de corrente contínua, indução, síncronos e universais

Os motores de corrente contínua possuem um custo elevado, necessitando de alimentação em tensão contínua, permitindo o ajuste de sua velocidade e sendo aplicados, principalmente, em cargas que exigem controle de grande flexibilidade e precisão.

As principais aplicações dos motores de corrente contínua são, catálogo de motores do fabricante Siemens²:

- Máquinas de papel;
- Bobinadeiras e desbobinadeiras;
- Laminadores;
- Máquinas de impressão;
- Extrusoras;
- Prensas;
- Elevadores;
- Movimentação e elevação de cargas;
- Moinhos de rolos;
- Indústria de borracha;
- Mesa de testes de motores.

Além destas, conforme o catálogo de motores do fabricante WEG, se tem as seguintes aplicações para os motores de corrente contínua:

- Máquinas de papel;
- Máquinas operatrizes em geral;
- Bombas a pistão;
- Torques de fricção;
- Ferramentas de avanço;

² SIEMENS. *Motores de Corrente Contínua – Guia rápido para uma especificação precisa, edição 01, 2006.* Disponível em: <https://new.siemens.com/br/pt.html>.

- Tornos;
- Bobinadeiras;
- Mandrilhadoras;
- Máquinas de moagem;
- Máquinas têxteis;
- Guinchos e guindastes;
- Pórticos;
- Veículos de tração;
- Prensas;
- Máquinas de papel;
- Tesouras rotativas;
- Indústria química e petroquímica;
- Indústrias siderúrgicas;
- Fornos, exaustores, separadores e esteiras para indústria cimenteira e outras.

Por sua vez, os motores de corrente alternada são muito utilizados por permitirem sua conexão diretamente na rede de energia elétrica em tensão alternada. Podem ser de dois tipos:

- Motor síncrono – permite o funcionamento com velocidade fixa ou variável, sendo utilizado para grandes potências, devido a seu alto custo;
- Motor de indução – funciona com velocidade constante, mas que varia conforme a carga aplicada em seu eixo. São motores simples, robustos e de baixo custo, sendo uns dos mais utilizados para as aplicações convencionais. Permite o controle da velocidade pela comutação de diferentes enrolamentos ou pelo uso de inversores de frequência (conversores cc-ca).

A diferença entre um motor síncrono e um motor assíncrono pode ser resumida como:

- Motor síncrono – pelo seu princípio de funcionamento tem velocidade constante, independente da variação da carga;
- Motor assíncrono – tem velocidade variável em função da carga aplicada em seu eixo. A diferença entre a velocidade sem carga e com carga é denominada de escorregamento.

Em geral, para a maioria das aplicações se utilizam motores assíncronos, visto terem custo menor do que os motores síncronos. Neste sentido, os motores de indução são amplamente

utilizados para usos residenciais, comerciais e industriais, tendo como aplicações³:

- Bombas;
- Ventiladores;
- Compressores;
- Indústria química e petroquímica;
- Estações de tratamento de água;
- Britadores;
- Moinhos;
- Esteiras transportadoras;
- Máquinas operatrizes;
- Sopradores e moinhos de cimento;
- Veículos automotores.

Por sua vez, quando se exigem operação com velocidade constante, maiores rendimentos, correção de fator de potência e diminuição da corrente de partida, podem ser aplicados os motores síncronos, apesar de seu maior custo, serão adequados para as aplicações industriais específicas.

Os motores universais podem operar tanto em corrente contínua como em corrente alternada, tem elevado torque de partida e podem operar com velocidade variável. Possuem rotor bobinado e quando operam sem carga, podem desenvolver altas velocidades, perigosas inclusive.

Algumas aplicações dos motores universais são:

- Aspiradores;
- Furadeiras portáteis;
- Liquidificadores;
- Moedores;
- Ventiladores;
- Linha branca (utensílios para cozinha);
- Misturadores de bebidas;
- Máquinas de costura.

³ PEA 3311. O motor de indução e seu uso. Laboratório de Conversão Eletromecânica de Energia, 2019. Acessado em: <https://disciplinas.usp.br>.



Motor cc

Motor síncrono

Motor de indução

Motor universal

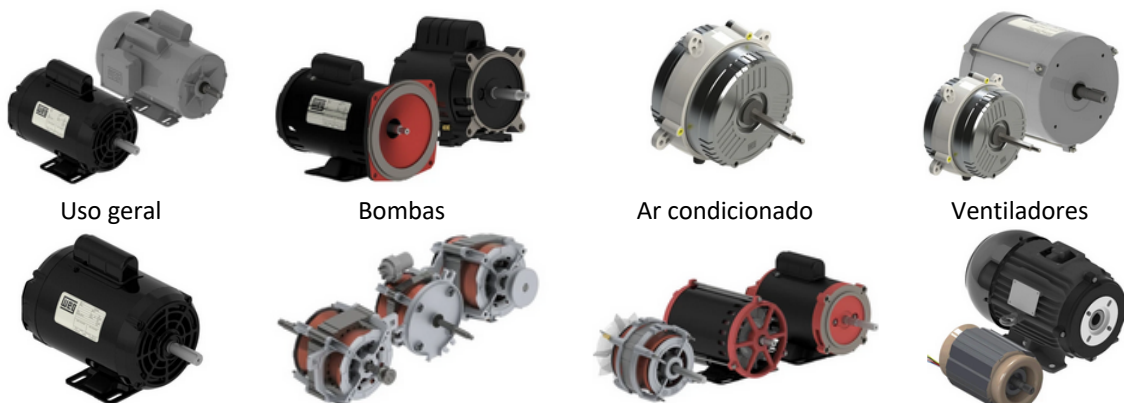
Figura 6 – Exemplos de tipos de motores elétricos.

Fonte: <https://www.weq.net> e <https://www.mecanicaindustrial.com.br>. Acesso em 08/07/2021.

3.3 Motores monofásicos de corrente alternada

Os motores monofásicos de corrente alternada são amplamente utilizados para aplicações de uso geral, bombas, condicionadores de ar, ventilação, compressores, eletrodomésticos da linha branca (lavadoras, secadoras, etc.), processadores de alimentos e linhas dedicadas, dentre outras, conforme mostrado na Figura 7.

As potências dos motores monofásicos de corrente alternada podem ser desde alguns watts até dezenas de quilowatts, sendo preferidos nas situações onde se tem a rede de energia elétrica de dois fios (fase e neutro) disponível, por exemplo, visando-se diminuir complexidade e custos com fiação, como seria o caso para os motores trifásicos.



Uso geral

Bombas

Ar condicionado

Ventiladores

Compressores

Linha branca

Processador alimentos

Linhas dedicadas

Figura 7 – Exemplos de motores indução monofásicos.

Fonte: <https://www.weq.net>. Acesso em 08/07/2021.

3.4 Motores trifásicos de corrente alternada

Os motores trifásicos de corrente alternada são utilizados quando se tiver disponível uma rede de energia trifásica, em substituição aos motores de indução monofásicos, para as mais diversas aplicações, como por exemplo: uso geral, alta eficiência, em atmosferas explosivas, bombas, ventiladores, linhas dedicadas, dentre outras, conforme mostrado na Figura 8.



Figura 8 – Exemplos de motores de indução trifásicos.

Fonte: <https://www.weg.net>. Acesso em 08/07/2021.

3.5 Motores de corrente contínua

Os motores de corrente contínua são utilizados em diferentes aplicações associados ou não aos equipamentos eletrônicos, tais como: impressoras, limpadores de para-brisas, vidros elétricos, fresadoras, robótica, brinquedos, parafusadeiras, furadeiras, motores de partida, dentre outras, conforme mostrado na Figura 9.



Figura 9 – Exemplos de motores de corrente contínua.

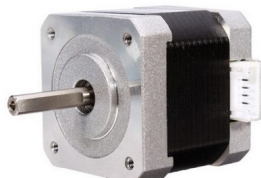
Fonte: <https://www.americanas.com.br>. Acesso em 08/07/2021.

3.6 Motores de passo

Os motores de passo são utilizados em situações onde se precisa realizar deslocamentos precisos, por exemplo em impressoras, fresadoras, braços robóticos, injeção eletrônica de automóveis, mesas digitalizadoras, dentre outras aplicações, conforme mostrado na Figura 10.



Impressora



Fresadora



Robótica



Injeção eletrônica

Figura 10 – Exemplos de motores de passo.

Fonte: <https://www.filipeflop.com/> e <https://www.americanas.com.br>. Acesso em 08/07/2021.

3.7 Servomotores

Os motores do tipo servomotores (ou atuadores) podem ser para corrente contínua ou alternada, aplicados quando é necessário o controle de movimento com posicionamento de alta precisão, reversão rápida e alto desempenho, como por exemplo em robótica, sistemas automatizados, máquinas CNC (controle numérico computadorizado), freio eletromagnético, dentre outras, conforme mostrado na Figura 11.

Os servomotores tem semelhanças e diferenças em relação aos motores de passo. Enquanto os motores de passo têm velocidade e torque intermediários, onde o torque cai com o aumento da velocidade, nos servomotores se tem, em geral, torque constante até a velocidade nominal máxima da máquina.



Automação



Esteiras



Robótica



Brinquedos

Figura 11 – Exemplos de servomotores.

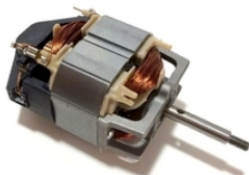
Fonte: <https://www.americanas.com.br> e <https://www.directindustry.com>. Acesso em 08/07/2021.

3.8 Motores universais

Os motores universais são aplicados em eletrodomésticos, ferramentas elétricas, ventiladores, dentre outras aplicações, conforme mostrado na Figura 12.



Ventilação



Aparador de grama



Aspirador de pó



Furadeira

Figura 12 – Exemplos de motores universais.

Fonte: <https://www.americanas.com.br>. Acesso em 08/07/2021.

3.9 Motores *brushless* (sem escovas)

Os motores brushless (sem escovas) tem maior vida útil e velocidade constante, pois são motores de corrente contínua sem escovas, sendo utilizados em drones, aeromodelos, ferramentas elétricas, instrumentação, robótica, veículos elétricos, empilhadeiras, máquinas de costura, dentre outras, conforme mostrado na Figura 13. Estes motores podem operar em velocidades muito altas, requeridas em diversas aplicações, como aeromodelos, nautimodelos (pequenos barcos) e automodelos (pequenos carros elétricos).

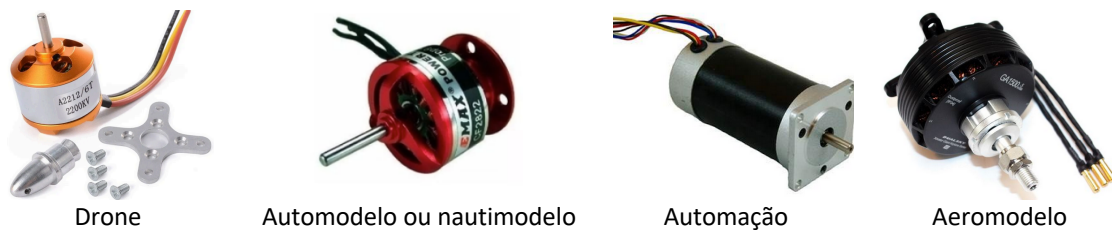


Figura 13 – Exemplos de motores sem escovas.

Fonte: <https://www.americanas.com.br> e <https://www.tekno.com.br>. Acesso em 08/07/2021.

4 Grandezas Elétricas e Mecânicas de Motores

4.1 Introdução

Ao utilizar e realizar a instalações de motores elétricos para suas diferentes aplicações, é importante se conhecer as principais grandezas elétricas e mecânicas dos mesmos, para seu correto e seguro funcionamento. Assim, na sequência serão apresentadas as principais grandezas elétricas e mecânicas para os motores elétricos.

Em geral, os motores possuem placas de identificação, com as principais grandezas e características, conforme mostrado na Figura 14 para um motor de indução trifásico, onde:

1. Código do motor;
2. Número de fases;
3. Tensão nominal de operação;
4. Regime de serviço;
5. Rendimento;
6. Modelo da carcaça;
7. Grau de proteção;
8. Classe de isolamento;
9. Temperatura da classe de isolamento;
10. Frequência;

11. Potência;
12. Rotação nominal por minuto;
13. Corrente nominal de operação;
14. Fator de potência;
15. Temperatura ambiente;
16. Fator de serviço;
17. Altitude;
18. Massa;
19. Especificação do rolamento dianteiro;
20. Especificação do rolamento traseiro;
21. Tipo de graxa para os rolamentos;
22. Esquema de ligação;
23. Tempo de relubrificação;
24. Certificações;
25. Relação da corrente de partida pela corrente nominal;
26. Categoria de conjugado;
27. Corrente no fator de serviço.

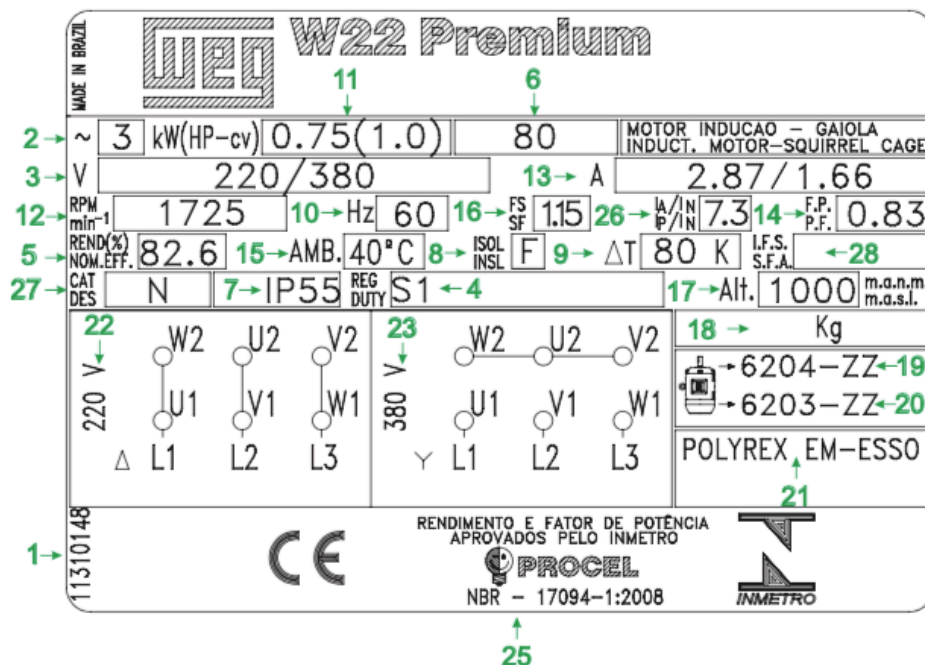


Figura 14 – Exemplo de placa de identificação de motor de indução trifásico.

Fonte: (WEG, 2015)⁴.

⁴ WEG. Guia Prático de Treinamento Técnico Comercial - Motores Elétricos. Módulo I. Disponível em

4.2 Grandezas elétricas

As principais grandezas elétricas para os motores elétricos variam conforme o tipo de motor, destacando-se:

- Tensão elétrica – Tensão de operação do motor, em corrente contínua será o valor médio e em corrente alternada será o valor eficaz;
- Potência elétrica – A potência elétrica nos motores pode ser apresentada em watts ou unidades específicas, como cavalo vapor (HP ou cv), onde 1 HP equivale a 746 W e 1 cv equivale a 736 W. A potência elétrica na entrada do motor é diferente da potência mecânica disponível no eixo do mesmo em virtude das perdas internas no motor, sendo que, em geral, a potência apresentada na placa corresponde a potência útil em termos mecânicos para a carga acoplada ao eixo do motor;
- Corrente elétrica – De modo similar a tensão elétrica, em corrente contínua será a corrente média drenada pelo motor, em corrente alternada será o valor eficaz. A corrente pode variar conforme o acionamento do motor, por exemplo se for utilizada modulação por largura de pulsos (PWM), corrente máxima será diferente da corrente média, mesmo para motores de corrente contínua. Além disso, a corrente em regime permanente é diferente da corrente de partida, conforme o tipo de motor e sua carga (no eixo do mesmo);
- Frequência – Para motores de corrente alternada se apresenta a frequência de operação dos mesmos, em geral sendo 50 ou 60 Hz;
- Fator de potência – Corresponde a relação entre a potência ativa e aparente do motor, sendo indutivo devido a característica eletromagnética dos motores;
- Rendimento – É a relação entre a potência ativa (em watts) na saída e a potência consumida na entrada do motor, isto é, corresponde a relação entre a potência mecânica útil no eixo do motor e a potência elétrica na entrada da máquina.

4.3 Grandezas mecânicas

As principais grandezas mecânicas para os motores elétricos são:

- Potência mecânica – É a potência útil em watts disponível no eixo do motor, que será utilizada para o dimensionamento da carga acoplada ao mesmo;

<https://www.weg.net>. Acessado em 09/07/2021.

- Conjugado – É a medida do esforço necessário para girar o eixo, também é chamado de torque, momento ou binário, sendo medido em Newton metro (Nm);
- Rotação – É o número de giros (voltas) do eixo do motor por unidade de tempo, sendo normalmente expressa em rotações por minuto (rpm). Para motores de indução, onde o número de polos do campo magnético pode ser de 2 a 8, se teria: 2 polos rotação de 3.600 rpm, 4 polos rotação de 1.800 rpm, 6 polos rotação de 1.200 rpm e 8 polos rotação de 900 rpm. A rotação pode ser apresentada como sendo síncrona, correspondendo neste caso ao valor nominal sem escorregamento;
- Escorregamento – É a diferença entre a rotação ou velocidade síncrona e a rotação efetiva no eixo do motor, variando em função da carga ou da tensão de alimentação do motor. Se aplica aos motores assíncronos, sendo que nos motores síncronos o escorregamento será considerado nulo;
- Grau de proteção – É a proteção do motor contra a entrada de elementos (corpos) estranhos, tais como poeiras, fibras, etc; também contra contato acidental e penetração de água. O grau de proteção é identificado por um código, do tipo IPxx, onde o código IP21 e IP23 caracteriza motores abertos, enquanto IP55, IP56, IP65 e IP66 se aplica a motores fechados, por exemplo;
- Regime de serviço – Representa o grau de regularidade da carga acoplada ao motor. Podem ser para regime contínuo, para operação com carga constante ou regime variável, onde a carga é alterada ao longo do tempo;
- Fator de serviço – Indica a carga permissível a ser aplicada acima da potência nominal no eixo do motor. Assim, um motor com fator de serviço FS = 1 indica que o motor foi projetado para operar continuamente com potência igual ou inferior a nominal;
- Carcaça – Apresenta as medidas e o desenho geométrico da parte mecânica externa do motor;
- Ventilação – Característica relativa a refrigeração do motor, onde os motores abertos tem ventilação interna, enquanto os motores fechados tem ventilação externa.

4.4 Outras Grandezas

Em termos de motores elétricos, a depender do seu tipo e aplicação, podem-se ter diferentes grandezas, destacando-se:

- Classe de isolamento – Especifica o isolamento térmico do motor, isto é,

determina a máxima temperatura que o bobinado do motor pode suportar sem danos ao mesmo. Por exemplo, motores classe B suportam 135 °C, classe F 150 °C e classe H 180 °C;

- Temperatura ambiente – Temperatura ambiente máxima para operação adequada do motor;
- Conjugado versus velocidade – Os motores podem ser classificados em categorias, conforme suas características de conjugado em relação à velocidade e corrente de partida. A categoria N apresenta conjugado de partida normal, corrente de partida normal e baixo escorregamento; categoria H tem alto conjugado de partida, corrente de partida normal e baixo escorregamento; e categoria D tem alto conjugado de partida, corrente de partida normal e alto escorregamento. A Figura 15 mostra curvas típicas para a relação conjugado versus velocidade para motores trifásicos de indução com rotor de gaiola.

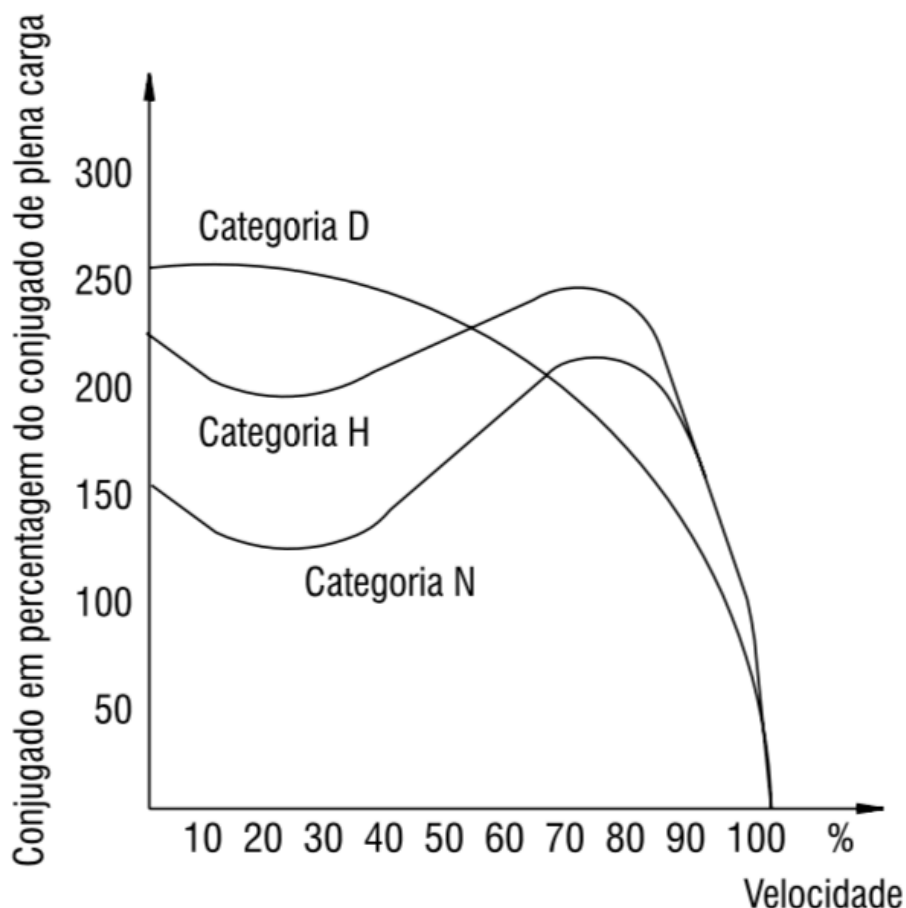


Figura 15 – Curvas conjugado x velocidade para diferentes categorias de motores.

Fonte: (WEG, 2006).

5 Exercícios

Exercícios Resolvidos

ER 01. Defina motor elétrico.

Motor elétrico é uma máquina rotativa que converte energia elétrica em energia mecânica.

ER 02. Quais os tipos de motores elétricos, considerando-se a classificação mais geral para os mesmos.

Motores de corrente contínua, motores de corrente alternada e motores universais.

ER 03. Qual a diferença entre motores síncronos de motores assíncronos?

Os motores síncronos tem a velocidade constante no eixo, isto é, a rotação do eixo é a rotação nominal do motor. Por sua vez, os motores assíncronos apresentam diferença entre a rotação do eixo e a rotação nominal, representada pelo escorregamento, que aumenta na medida que se aumenta a carga no eixo do motor.

ER 04. O que são motores universais?

São motores que podem operar tanto em tensão alternada como em tensão contínua.

ER 05. Cite aplicações para os motores universais?

Ferramentas elétricas, utensílios de cozinha e de casa, máquinas de costura, dentre outras.

Exercícios Propostos

EP 01. Explique com suas palavras como funciona um motor elétrico?

EP 02. O que é grau de proteção de um motor elétrico?

EP 03. Cite aplicações para os motores de corrente contínua?

EP 04. Cite alguns tipos de motores monofásicos de corrente alternada.

EP 05. Comente sobre as aplicações dos motores de passo.

6 Atividade Avaliativa

6.1 Introdução – O que preciso saber

Ao final deste objetivo de aprendizagem são apresentadas cinco questões, que devem ser respondidas sem consultar o material. Se você conseguir responder as questões e conferir as respostas com o gabarito abaixo, parabéns, você concluiu com êxito este tópico. Caso tenha errado alguma questão, revise o conteúdo relacionado com a mesma e refaça a questão, procurando se concentrar mais desta vez, para acertar o exercício e fixar bem o conteúdo.

AA 01. O que é a classe de isolamento de um motor elétrico?

AA 02. Comente sobre os motores *brushless* (sem escovas).

AA 03. Cite três tipos de motores elétricos.

AA 04. Cite exemplos de dados da placa de um motor elétrico.

AA 05. Comente sobre as aplicações dos motores de indução.

AA 01. A classe de isolamento determina a temperatura máxima de operação do motor, visto representar a temperatura aceitável no bobinado do motor.

AA 02. Os motores *brushless* não possuem escovas, exigindo menos manutenção. São síncronos e podem operar com altas velocidades, sendo utilizados em drones, robótica e veículos elétricos, como aeromodelos, navimodelos e automodelos.

AA 03. Motores universais, motores de corrente contínua e motores de passo.

AA 04. Tensão de operação, potência mecânica, fator de potência, regime de serviço, etc.

AA 05. Os motores de indução são de baixo custo, pouca e simples manutenção, sendo os mais utilizados para as aplicações convencionais, quando os equipamentos são conectados na rede de energia elétrica, podendo ser monofásicos ou trifásicos.



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA

DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA

CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM ELETRÔNICA INDUSTRIAL

Acionamentos Eletrônicos



GUIA DE ESTUDO

- OBJETIVO DE APRENDIZAGEM - MÁQUINAS DE CORRENTE CONTÍNUA

MÁQUINAS DE CORRENTE CONTÍNUA

Objetivo de Aprendizagem

Estudar as máquinas de corrente contínua.

Objetivos parciais

- Conhecer o princípio de funcionamento das máquinas de corrente contínua;
- Conhecer os principais tipos de motores de corrente contínua;
- Conhecer as aplicações dos motores de corrente contínua.

Aulas relacionadas

Este objetivo de aprendizagem está relacionado com a aula 07 da disciplina.

Pré-requisitos

Ter estudado o objetivo de aprendizagem 06 relacionado aos princípios de funcionamento de máquinas elétricas rotativas.

Continuidade dos Estudos

O próximo objetivo de aprendizagem será o estudo do acionamento dos motores de corrente contínua.

Roteiro para estudos

Os estudos referentes a este objetivo de aprendizagem consistem em:

1. Estudar este documento resumo, realizando as atividades propostas no mesmo;
2. Responder o quiz relacionado a este objetivo de aprendizagem;
3. Caso perceba necessidade, estudar a apresentação deste assunto ou consultar os livros texto indicados para esta disciplina;
4. Realizar os exercícios deste tópico da matéria;
5. Realizar a avaliação final para progredir ao próximo conteúdo.

Referências

- Material disponibilizado para a disciplina de Acionamentos Eletrônicos – 2021/1.
Departamento Acadêmico de Eletrônica, Instituto Federal de Santa Catarina, Campus Florianópolis.
- STEPHAN, Richard M. Acionamento Comando e Controle de Máquinas Elétricas. Rio de Janeiro: UFRJ, 2009.
- Kosow, Irving L. Máquinas Elétricas e Transformadores. 15ª edição. São Paulo: Globo, 2005.

Check-list

Caro estudante, verifique se você completou as atividades deste objetivo de aprendizagem e obteve êxito para continuar seus estudos.

Assinale as atividades realizadas:

Estudo do documento resumo:

- Leitura do documento resumo;
- Exercícios do documento resumo;
- Atividade avaliativa do documento resumo.
- Obtive êxito e entendi o conteúdo deste documento;
- Ainda não entendi bem o conteúdo e estudarei o mesmo com mais profundidade.

Estou com dúvidas, irei estudar com mais detalhes este conteúdo:

- Assistir a apresentação relacionada ao conteúdo (apresentação 07);
- Ler este guia de estudo (objetivo de aprendizagem 07).

Ainda estou com dúvidas:

- Entrarei em contato com o professor.

Obtive êxito, então seguirei em frente:

- Responder ao quiz deste conteúdo no Moodle;
- Informar ao professor que estou avançando com o conteúdo.

Parabéns, continue estudando com afinco e vamos em frente!!

CONTEÚDO

**- OBJETIVO DE APRENDIZAGEM -
MÁQUINAS DE CORRENTE CONTÍNUA**

1 Introdução

O capítulo anterior abordou os aspectos e princípios gerais das máquinas elétricas rotativas, mostrando-se os diferentes tipos de motores elétricos e suas aplicações.

A partir deste capítulo serão estudados os principais motores elétricos utilizados comumente, iniciando-se pelos motores de corrente contínua, a seguir os motores de passo e por fim os motores de indução.

Assim, este capítulo tem como objetivo o estudo das máquinas de corrente contínua (cc), com foco nos motores elétricos de corrente contínua.

1.1 Conteúdo – O que irei estudar

Estudaremos neste tópico:

- Princípio de funcionamento das máquinas de corrente contínua;
- Principais tipos de motores de corrente contínua;
- Aplicações dos motores de corrente contínua.

1.2 Metodologia – O que devo fazer e como fazer

Leia com atenção o conteúdo a seguir. Ao final deste tópico são apresentados exercícios resolvidos. Após são apresentados alguns exercícios propostos.

Ao realizar estas atividades e se sentir confiante para progredir, siga os passos indicados na primeira página deste documento.

Espera-se que após estudar este assunto, você consiga:

- Descrever o funcionamento de um motor elétrico de corrente contínua;
- Citar as principais partes de um motor de corrente contínua;
- Comentar sobre algumas aplicações dos motores elétricos de corrente contínua.

A atividade avaliativa deste objetivo de aprendizagem consistirá em perguntar ao estudante para descrever o funcionamento de um motor de corrente contínua, por exemplo.

Exemplo de atividade avaliativa:

1. Explicar com suas palavras o funcionamento de um motor elétrico de corrente contínua.
2. Citar aplicações dos motores de corrente contínua.
3. Comentar sobre as conexões dos motores de corrente contínua.
4. Comentar sobre a escolha de motores de corrente contínua.
5. Citar as principais partes de um motor de corrente contínua.

2 Máquinas de Corrente Contínua

2.1 Introdução

As máquinas elétricas de corrente contínua podem funcionar tanto como motor e como gerador, dependendo da sua conexão e aplicação. De todo modo, o projeto de uma máquina elétrica leva em conta seu modo de funcionamento, sendo otimizada para ser utilizada como motor ou gerador, conforme cada caso em específico.

Este capítulo irá abordar o princípio de funcionamento das máquinas de corrente contínua, focando-se nos elementos comuns aos motores e geradores de corrente contínua.

2.1 Definição de motor elétrico de corrente contínua

O motor elétrico de corrente contínua é uma máquina elétrica rotativa que converte energia elétrica em energia mecânica para acionamento de cargas acopladas em seu eixo, sendo alimentado por uma fonte de alimentação em tensão contínua (cc).

2.2 Definição de gerador elétrico de corrente contínua

O gerador elétrico de corrente contínua é uma máquina elétrica rotativa que converte energia mecânica em energia elétrica a partir da rotação provida ao seu eixo, servindo como fonte de alimentação de circuitos em tensão contínua (cc).

2.3 Princípio de funcionamento da máquina de corrente contínua

A partir dos estudos realizados nos capítulos anteriores deste curso, pode-se lembrar que a partir da interação da força resultante sobre uma espira ou conjunto de espiras (bobina) conforme se observa na Figura 1, e o campo magnético no qual a espira está imersa, se terá duas possibilidades, que darão origem aos motores e aos geradores.

Os princípios motor e gerador são:

- Princípio motor – O princípio motor determina que um conjunto de espiras imerso em um campo magnético estará sujeito a uma força, denominada de Força de Lorentz;
- Princípio gerador – O princípio gerador, por sua vez, determina que uma espira ou bobina, imersa em um campo magnético variante no tempo, estará sujeita a uma corrente induzida, constituindo um gerador eletromagnético.

A Figura 2 mostra o funcionamento da máquina elétrica rotativa operando como motor de corrente contínua, onde se aplica uma corrente elétrica na espira, fazendo com que ocorra o surgimento de uma força que irá movimentar a espira, girando a mesma. A depender do ângulo entre a espira e o campo magnético se terá força máxima ou nula.

Por sua vez, a Figura 3 mostra a máquina elétrica rotativa configurada como gerador de corrente contínua, onde se movimenta a espira imersa no campo magnético, fazendo surgir uma corrente induzida na mesma. Em função do uso de coletor, que altera a conexão do circuito externo, fazendo com que a parte da espira próxima ao mesmo polo do campo magnético esteja conectada no mesmo condutor externo, se tem o surgimento de uma tensão contínua retificada em onda completa, lembrando um conversor ca-cc de onda completa (retificador onda completa).

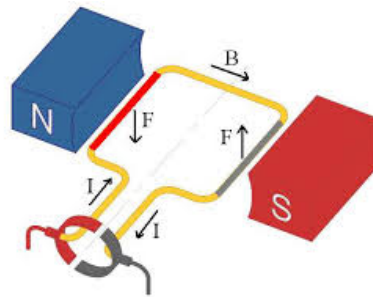


Figura 1 – Espira imersa em um campo magnética.

Fonte: <https://www.dt.fee.unicamp.br>. Acessado em 17/06/2021.

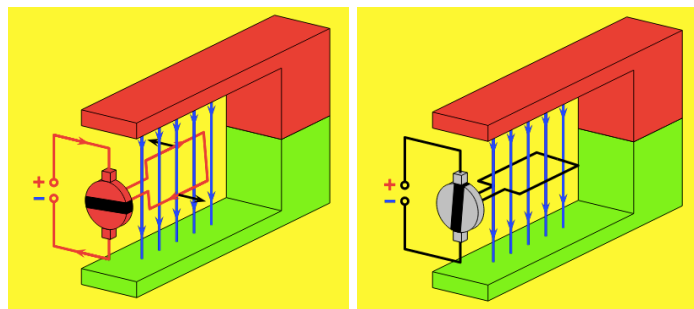


Figura 2 – Funcionamento do motor de corrente contínua.

Fonte: <https://www.walter-fendt.de>. Acessado em 17/06/2021.

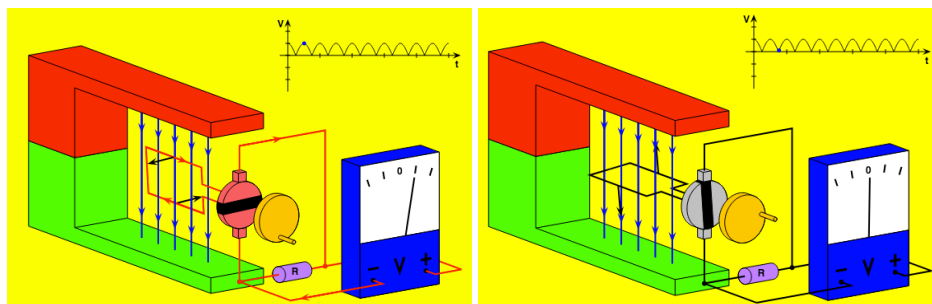
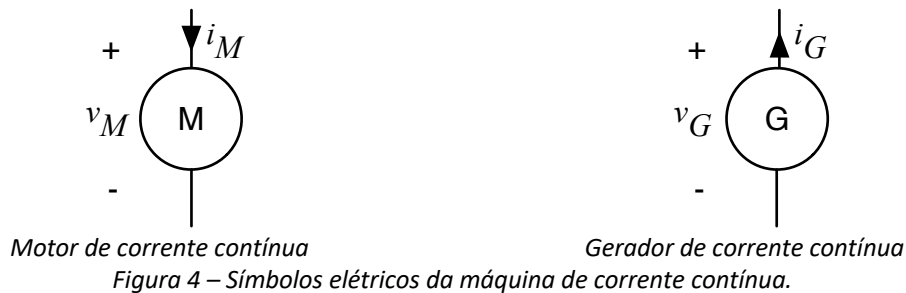


Figura 3 – Funcionamento do gerador de corrente contínua.

Fonte: <https://www.walter-fendt.de>. Acessado em 13/07/2021.

2.4 Símbolos elétricos da máquina de corrente contínua

Os motores elétricos podem ter diferentes símbolos, mas em geral são representados por um círculo com a letra M de motor. A Figura 4 mostra o símbolo típico para um motor elétrico, identificando-se sua tensão e corrente. De modo similar, um gerador de corrente contínua terá símbolo semelhante, mas com a corrente saindo do mesmo e a letra G no interior do círculo, como mostrado na mesma figura.



2.5 Exemplos de máquinas de corrente contínua

A Figura 5 mostra exemplos de máquinas rotativas de corrente contínua, neste caso de um motor e de um gerador de corrente contínua. O gerador tem potência da ordem de 4,8 kW, com tensão de 48 V e corrente de 100 A, aplicado em geração de energia elétrica a partir da energia eólica. Por sua vez, o motor de corrente contínua com ímãs permanentes, tem potência de 200 W e tensão de alimentação de 90 V.

Os exemplos mostrados são de máquinas de potência baixa, indo de centenas de watts até alguns quilowatts. Em diferentes aplicações podem se encontrar motores e geradores desde alguns microwatts, no caso de micromotores, até milhares de quilowatts, em usos específicos de potências muito altas.



Motor de corrente contínua

Gerador de corrente contínua

Figura 5 – Exemplos de máquinas de corrente contínua.

Fonte: <http://www.asten.com.br> e <https://www.auroragenerators.com>. Acesso em 13/07/2021.

2.6 Construção de máquinas de corrente contínua

A construção de uma máquina de corrente contínua pode ter alterações conforme seu tipo, aplicação, potência e tecnologias empregadas. De todo, em geral, as máquinas de corrente contínua tem como partes principais aquelas mostradas na Figura 5.

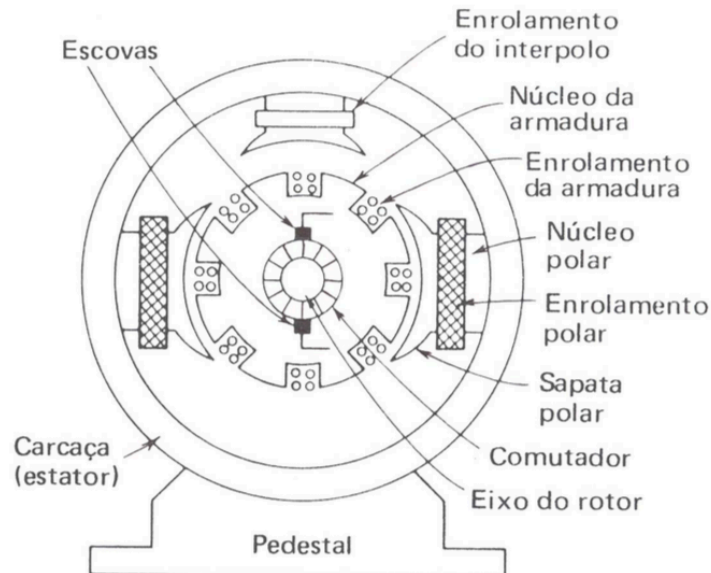


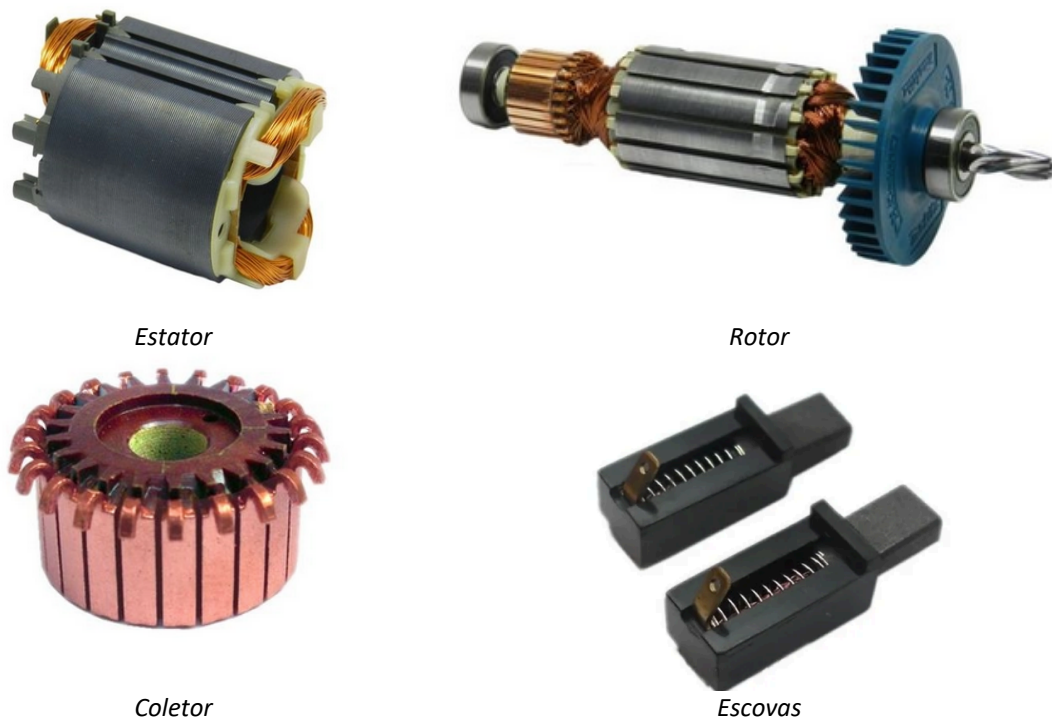
Figura 6 – Principais partes de uma máquina de corrente contínua.

Fonte: (Kosow, 2005).

As principais partes de uma máquina de corrente contínua são listadas a seguir e mostradas na Figura 6:

- Estator ou campo – É a parte fixa da máquina, tendo as sapatas polares formadas por lâminas de aço ou ferro silício e ao seu redor as bobinas enroladas, formando o enrolamento de campo;
- Rotor ou armadura – É a parte móvel do motor transmitindo movimento pelo eixo do mesmo. Também possui um conjunto de lâminas de aço ou ferro silício formando ranhuras, que irão alojar as espiras, constituindo o enrolamento de armadura;
- Coletor ou comutador – Elemento que conecta o bobinado da parte móvel (rotor) ao circuito externo por meio das escovas;
- Escovas – Constituídas de carvão grafite ou carbono, permitem conectar os contatos do comutador ao circuito externo, sem afetar seu movimento, provendo contato por pressão, ocorrendo atrito entre os mesmos e desgaste ao longo do tempo.

Em virtude do atrito constante entre as escovas e os contatos do comutador, deve ser realizada a manutenção periódica destes elementos e sua substituição após seu desgaste.



Estatador

Rotor

Coletor

Escovas

Figura 7 – Partes de motores elétricos de corrente contínua.

Fonte: <https://www.americanas.com.br>. Acesso em 13/07/2021.

3 Geradores de Corrente Contínua

3.1 Introdução

A seguir se apresentam aspectos particulares dos geradores de corrente contínua, do ponto de vista de seu funcionamento e aplicações, de maneira resumida, visto este curso focar no acionamento eletrônico, principalmente aplicado aos motores elétricos.

3.2 Funcionamento do gerador de corrente contínua

A tensão gerada (fem = força eletromotriz) por um gerador elementar, isto é, que possui apenas uma espira, é mostrada na Figura 8. Os trechos da espira, de a até b, b até c e c até d, podem ser utilizados, em conjunto com a Regra de Fleming para se determinar o sentido da corrente elétrica ou do movimento, conforme for o caso, considerando o funcionamento da máquina de corrente contínua como gerador ou motor, respectivamente.

Assim, tomando como referência os trechos a até b e c até d, nota-se que se a espira estiver na posição 0, a tensão induzida será nula, pois o ângulo entre a mesma e o campo magnético é zero, pois a tensão induzida depende do valor do seno do ângulo entre as linhas de campo

magnético e o plano formado pela bobina, conforme visto na Figura 3.

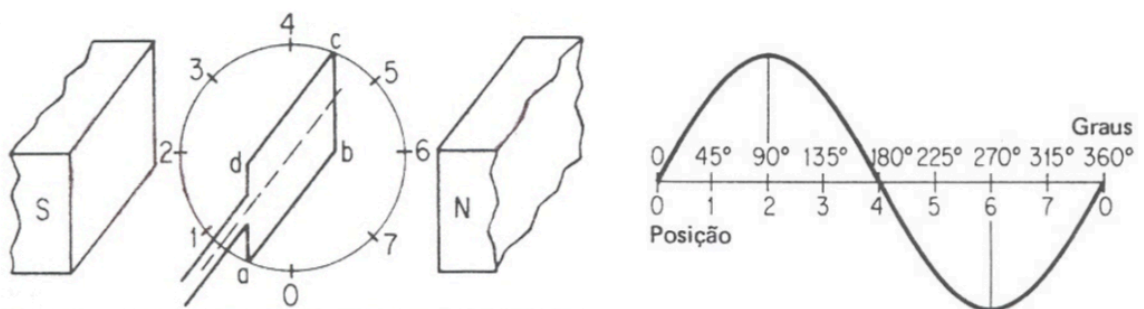
Por sua vez, quando a bobina estiver na posição 2 o ângulo será de 90° , com seno valendo um, e a tensão gerada será máxima positiva.

As posições 1 e 3 serão intermediárias, com ângulos de 45° e 135° e amplitudes de tensão maiores que zero e menores que o valor máximo. Ao se posicionar a bobina em 4, o ângulo será de 180° e o valor de tensão será nulo novamente.

Por outro lado, ao se percorrer as posições de 4 até 0, passando por 5, 6 e 7, a tensão gerada será negativa, caracterizando o funcionamento como um gerador de corrente alternada.

Note que o coletor utilizado na Figura 8 é simples, isto é, não é um coletor comutador, conforme se mostra na Figura 9. Ao utilizar um coletor comutador, o resultado é uma retificação na tensão gerada, isto é, a amplitude produzida pelo gerador é apenas positiva, conforme se observa na figura, caracterizando o funcionamento como gerador de corrente contínua.

Ao se inserir mais bobinas no gerador elementar, conforme mostrado na Figura 10, se tem formas de onda geradas para cada bobina, fazendo com que a tensão produzida seja a soma destas formas de onda, resultando em uma tensão mais próxima de contínua e com menos ondulação (*ripple*), o que é benéfico para o funcionamento das cargas conectadas ao gerador.

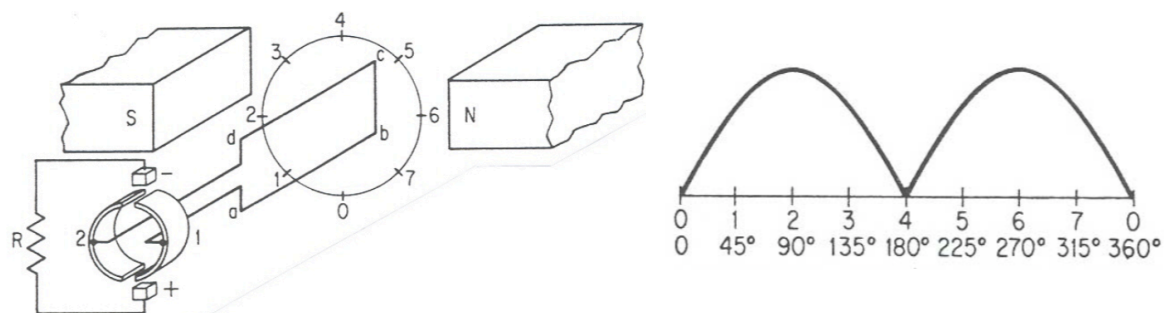


Posição do rotor

Tensão (fem) produzida

Figura 8 – Funcionamento do gerador de corrente alternada.

Fonte: (Kosow, 2005).

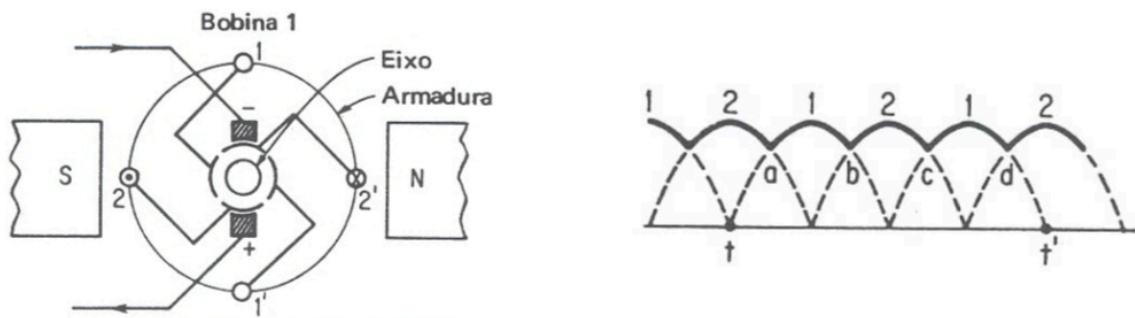


Posição do rotor

Tensão (fem) produzida

Figura 9 – Funcionamento do gerador de corrente contínua.

Fonte: (Kosow, 2005).



Posição do rotor
Tensão (fem) produzida
Figura 10 – Efeito de mais bobinas no funcionamento do gerador de corrente contínua.

Fonte: (Kosow, 2005).

3.3 Aplicações dos geradores de corrente contínua

Os geradores de corrente contínua podem ser aplicados em diversas situações, tais como: sistemas de geração de aeronaves, barcos e veículos, geração de energia (hidroelétrica, térmica, eólica, etc), eletrodeposição, carregadores de baterias, máquinas de solda, alimentação de cargas isoladas, controle de velocidade (*encoder*), laboratórios, equipamentos médicos, odontológicos e hospitalares, dentre outras.



Gerador eólico



Encoder

Figura 11 – Exemplos de geradores de corrente contínua.

Fonte: <https://www.alternative-energy-tutorials.com> e <https://www.globalsources.com>.

Acesso em 13/07/2021.

4 Motores de Corrente Contínua

4.1 Introdução

A seguir se apresentam aspectos particulares dos motores de corrente contínua, do ponto de vista de sua construção e funcionamento, além de suas aplicações e tipos.

4.2 Funcionamento do motor de corrente contínua

A Figura 12 mostra um exemplo construtivo de motor de corrente contínua com ímãs

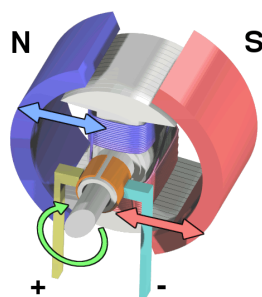
permanentes. Note que o estator (parte fixa) é representada por um ímã com seus polos norte e sul, enquanto o rotor (parte móvel) tem uma bobina conectada ao circuito externo por meio do coletor do tipo comutador. Ao se aplicar uma corrente elétrica na bobina do rotor, aparecerá uma força elétrica que irá prover movimento ao eixo do motor, conforme mostrado na figura.

O fluxo magnético gerado pelos ímãs permanentes do estator é mostrado na Figura 12, atravessando o plano da bobina e espiras do rotor, mostrando-se as linhas de campo magnético geradas nos condutores da bobina, perpendiculares ao sentido da corrente elétrica que circula pela mesma. Em frente ao polo norte do ímã se tem a corrente saindo do plano da figura, apontando no sentido do leitor; já em frente ao polo sul do ímã, a corrente está entrando pelos condutores da bobina, apontando para o interior da figura.

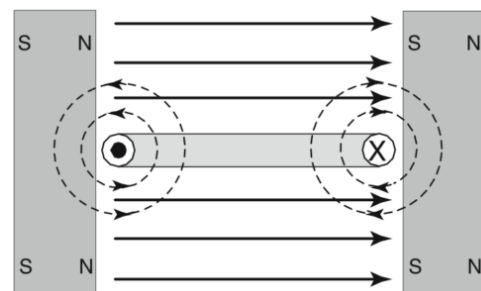
A partir da interação entre o campo magnético gerado pelo estator de ímãs permanentes e o rotor bobinado, se tem o surgimento de forças, conforme mostrado na Figura 13, onde se tem duas posições neutras (0) onde o campo magnético gerado pelo estator e o plano da bobina são perpendiculares, isto é, com ângulo de 90° , provocando força nula. Neste caso se tem a conexão do comutador na posição neutra ou de curto-circuito, isto é, as escovas tocam simultaneamente em dois contatos do coletor.

A posição inicial (a) mostrada na Figura 13, com o sentido da corrente elétrica entrando pela espira pela escova conectada no lado cinza do comutador, corresponde ao fluxo magnético mostrado na Figura 12, tendo-se a soma das linhas de força próximo ao polo sul, e a subtração das mesmas próximo ao polo norte. Desta interação e aplicando a Regra de Fleming se conclui que próximo ao polo norte a força irá apontar para cima, enquanto próximo ao polo sul a força apontará para baixo, fazendo surgir um braço de alavanca, com uma força apontando em uma direção e a outra na direção contrária, o que provoca o giro da parte móvel (eixo) do motor.

A posição intermediária (c) corresponde a comportamento similar a posição inicial (a), pois o coletor comutador faz com que a corrente elétrica na bobina, próxima ao polo sul, esteja novamente entrando no plano da figura, mantendo-se assim as forças como na posição inicial.



Motor simples



Fluxo magnético no motor de corrente contínua

Figura 12 – Motor de corrente contínua simples.

Fonte: <https://en.wikipedia.org> e <https://electricalacademia.com>. Acesso em 14/07/2021.

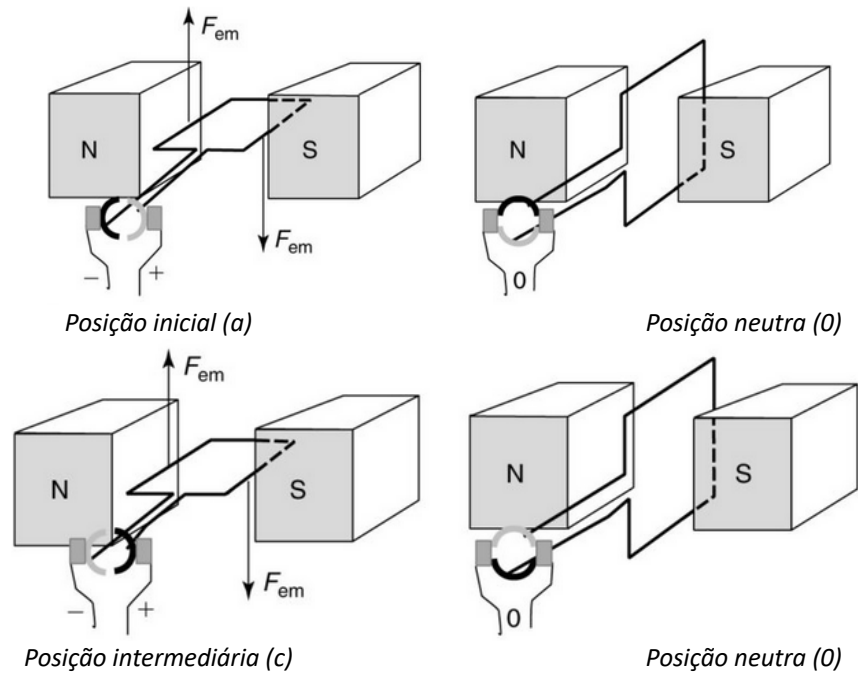
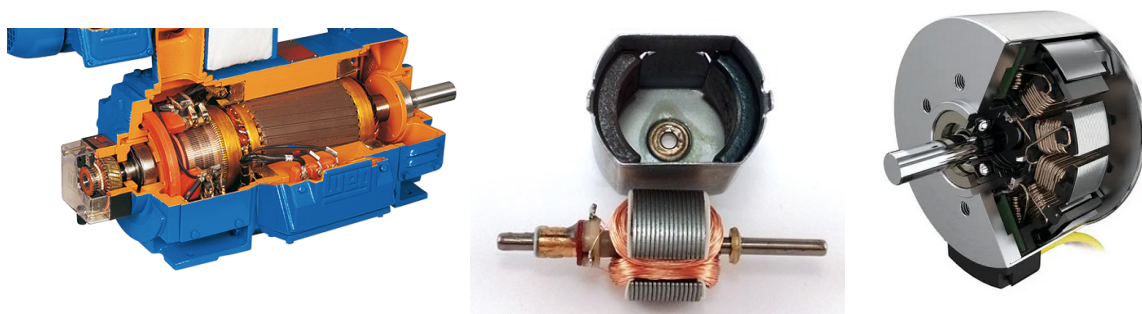


Figura 13 – Funcionamento do motor de corrente contínua.

Fonte: <https://electricalacademia.com>. Acesso em 14/07/2021.

A Figura 14 mostra os aspectos construtivos de alguns motores de corrente contínua, onde se nota que em virtude do modelo e potência pode-se ter diferenças significativas entre os mesmos.

É importante destacar que atualmente, pela sua robustez e pouca necessidade de manutenção, tem-se preferido o uso de motores sem escovas (*brushless*), principalmente em aplicações como veículos elétricos, por exemplo. Estes motores serão estudados posteriormente neste curso, quando se estudará mais detalhadamente seu funcionamento, aspectos construtivos e circuitos de acionamento.



Motor de alta potência

Motor com ímã permanente

Motor sem escovas

Figura 14 – Aspecto interno de um motor de corrente contínua.

Fonte: <https://www.weg.net>, <https://www.robotgear.com.au> e <https://www.faulhaber.com>.

Acesso em 14/07/2021.

4.3 Circuito elétrico do motor de corrente contínua

O circuito elétrico de uma máquina de corrente contínua, e deste modo, também dos motores de corrente contínua, conforme mostrado na Figura 15, é formado por dois circuitos principais: o circuito de armadura ou rotor e o circuito de campo ou estator. Os diversos elementos elétricos que constituem o motor de corrente contínua são:

- Tensão de armadura (U_a) – Tensão terminal na bobina de armadura do motor;
- Corrente de armadura (I_a) – Corrente no enrolamento de armadura do motor;
- Resistência de armadura (R_a) – Resistência do enrolamento de armadura, incluindo a resistência das escovas e dos contatos do comutador;
- Indutância de armadura (L_a) – Indutância de armadura;
- E – Força eletromotriz induzida ou força contra-eletromotriz de armadura ou ainda, tensão de armadura do motor;
- Resistência de campo (R_f) – Resistência do enrolamento de campo do motor;
- Indutância de campo (L_f) – Indutância de campo do motor;
- Tensão de campo (U_f) – Tensão terminal na bobina de campo do motor;
- Corrente de campo (I_f) – Corrente no enrolamento de campo do motor;
- Fluxo magnético (ϕ) – Fluxo no entreferro da máquina;
- Velocidade angular (ω_m) – Velocidade angular no eixo do motor, em radianos por segundo;
- Conjugado (C) – Conjugado no eixo do motor.

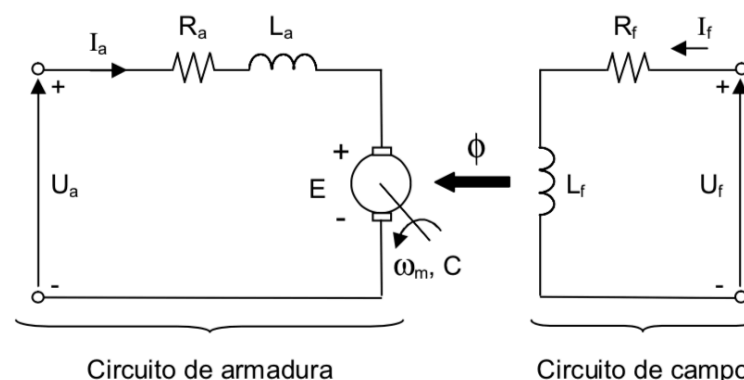


Figura 15 – Circuito elétrico equivalente de uma máquina de um motor de corrente contínua.

Fonte: (Siemens, 2006)¹.

¹ SIEMENS. Motores de Corrente Contínua – Guia rápido para uma especificação precisa, edição 01, 2006. Disponível em: <https://new.siemens.com/br/pt.html>.

A partir do circuito elétrico equivalente da Figura 15 se pode escrever a tensão de armadura como sendo:

$$U_a = R_a \cdot I_a + E$$

De acordo com (Siemens, 2006), utilizando a Lei de Indução de Faraday, a tensão de armadura (força eletromotriz induzida) é proporcional ao fluxo e a rotação do motor, então:

$$E = k_1 \cdot \phi \cdot n$$

A partir das duas expressões anteriores se obtém:

$$n = k_1 \cdot \frac{(U_a - R_a \cdot I_a)}{\phi}$$

Onde:

- n – Velocidade de rotação da armadura;
- k_1 – Constante dependente do tamanho do rotor, número de polos e da interconexão dos enrolamentos do motor;
- ϕ - Fluxo no entreferro da máquina.

Em particular, se a queda de tensão na armadura for pequena, então se tem:

$$n = k_1 \cdot \frac{U_a}{\phi}$$

Assim, se conclui que a velocidade do motor é diretamente proporcional a tensão de armadura e inversamente proporcional ao fluxo magnético no entreferro.

Por sua vez, o fluxo magnético originado pela corrente no enrolamento de campo, sendo:

$$\phi = k_2 \cdot I_f$$

O conjugado do motor será dado por:

$$C = k_3 \cdot I_a \cdot \phi$$

Onde:

- k_2 e k_3 – Constantes de proporcionalidade do motor;
- I_f – Corrente de campo do motor;
- C – Conjugado eletromagnético do motor.

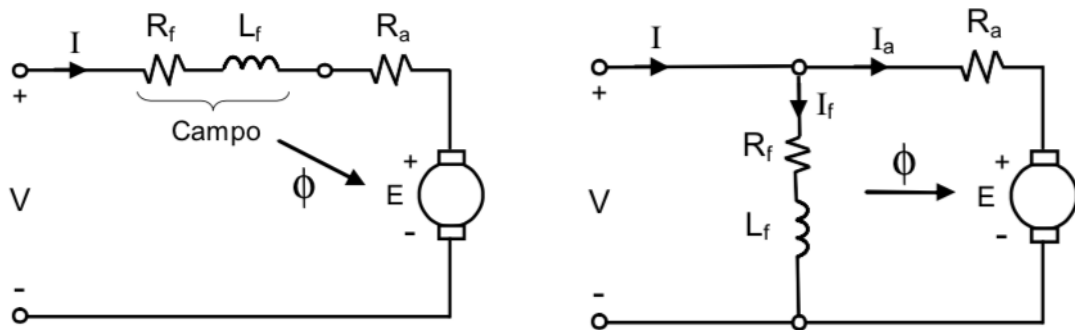
4.4 Tipos de motores de corrente contínua

A partir do circuito equivalente do motor de corrente contínua apresentado na Figura 15 é possível se conectar o motor de diferentes maneiras, conforme mostrado nas Figura 16 e Figura 17, onde se nota, conforme o guia de motores de corrente contínua da Siemens, que cada conexão tem particularidades em termos de velocidade, torque e conjugado.

Em síntese, se tem:

- Série (Figura 16a) – Ligação série entre circuitos de armadura e campo. Tem como características:
 - Bobinas de campo estão em série com o enrolamento da armadura;
 - Só há fluxo no entreferro da máquina quando a corrente da armadura for diferente de zero (máquina carregada);
 - Conjugado é função quadrática da corrente, uma vez que o fluxo é praticamente proporcional à corrente de armadura;
 - Conjugado elevado em baixa rotação;
 - Potência constante;
 - Velocidade extremamente elevada quando o motor é descarregado, por isso não se recomenda utilizar transmissões por meio de polias e correias.
- Paralela (Figura 16b) – Ligação paralela entre os circuitos de armadura e campo. Tem como características:
 - Velocidade praticamente constante;
 - Velocidade ajustável por variação da tensão de armadura.
- Independente (Figura 16a) – Circuitos de armadura e campo conectados separadamente. Tem como características:
 - Motor excitado externamente pelo circuito de campo;
 - Velocidade praticamente constante;
 - Velocidade ajustável por variação da tensão de armadura e também por enfraquecimento de campo;
 - São os motores mais aplicados com conversores ca/cc na indústria;
 - Aplicações mais comuns: máquinas de papel, laminadores, extrusoras, fornos de cimento, etc.
- Composta – Ligação série-paralela, onde o enrolamento de campo é dividido em dois, sendo um enrolamento conectado em série com o circuito de armadura e outro conectado em paralelo com este circuito. Tem como características:

- Enrolamento de campo independente;
- Apresenta um fluxo mínimo mesmo com o motor em vazio.

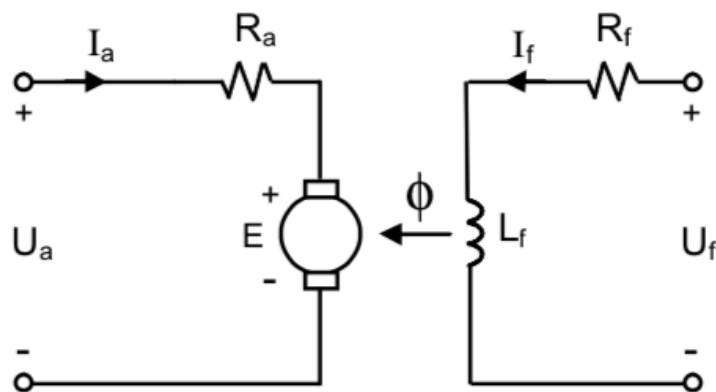


(a) Ligação série.

(b) Ligação paralela.

Figura 16 – Tipos de conexões de motores de corrente contínua.

Fonte: (Siemens, 2006).



(c) Ligações independentes.

Figura 17 – Tipos de conexões de motores de corrente contínua.

Fonte: (Siemens, 2006).

5 Seleção de Motores de Corrente Contínua

5.1 Introdução

A escolha adequada dos motores depende de diversos fatores, inclusive se levando em conta a aplicação a que se destinam.

A seguir serão apresentados alguns aspectos, de maneira breve, sobre a seleção de motores elétricos de corrente contínua.

5.2 Vantagens e desvantagens dos acionamentos em corrente contínua

A partir de (Siemens, 2006), pode-se elencar vantagens e desvantagens para o uso e acionamento envolvendo motores de corrente contínua.

Assim, as vantagens dos acionamentos em corrente contínua são:

- Custos mais baixos para operação em quatro quadrantes;
- Ciclo contínuo de operação, inclusive em baixas rotações;
- Alto torque de partida e em baixas rotações;
- Facilidade para variação e controle de velocidade;
- Menores circuitos de acionamento (conversores ca-cc);
- Alta confiabilidade;
- Grande flexibilidade com diferentes tipos de acionamentos;
- Simplicidade e facilidade de acionamento usando conversores cc-cc.

Dentre as desvantagens se tem:

- Para potência semelhante, os motores de corrente contínua são maiores e mais caros que os motores de indução;
- Maior necessidade de manutenção em virtude da presença do comutador;
- Apresenta arcos e faíscas elétricas em virtude da comutação, não podendo ser aplicado em ambientes perigosos, como os inflamáveis, por exemplo;
- A tensão de alimentação, em virtude da operação em corrente contínua, não pode exceder 900 V, enquanto motores de indução podem ser para milhares de volts;
- Necessidade de atenção na partida, mesmo em pequenos motores.

5.3 Seleção de motores de corrente contínua

A seguir serão apresentados os principais fatores que influenciam a seleção de um motor de corrente contínua para determinada aplicação, sendo eles:

- Grau de proteção – É a proteção do motor contra a entrada de elementos (corpos) estranhos, tais como poeiras, fibras, etc; também contra contato acidental e penetração de água. O grau de proteção é identificado por um código, do tipo IPxx, onde se pode ter letras intermediárias (W ou R) identificando as condições específicas de ensaio do motor, dois algarismos que identificam o comportamento do motor em relação a entrada de objetos sólidos e líquidos, e letras finais também identificando as condições para ensaio da máquina;

- Tipo de refrigeração – O tipo de refrigeração em conjunto com o grau de proteção determina as características do ambiente onde o motor será instalado. Em termos de refrigeração os motores podem ser abertos ou fechados, por exemplo;
- Ciclo de carga ou regime de serviço – Representa o grau de regularidade da carga acoplada ao motor. Podem ser para regime contínuo, para operação com carga constante ou regime variável, onde a carga é alterada ao longo do tempo;
- Classe de temperatura ou classe de isolamento – Em virtude das perdas elétricas e mecânicas no motor, ocorre o aquecimento do mesmo e sua elevação de temperatura. Assim, a classe de temperatura ou isolamento garante que os materiais isolantes manterão suas características funcionais durante a operação do motor. As classes são: A até 105 °C, E até 120 °C, B suportam 130 °C, classe F 155 °C e classe H 180 °C;
- Temperatura ambiente e altitude de instalação - Temperatura ambiente máxima e altitude limite para operação adequada do motor sem sobreaquecimento e danos aos elementos construtivos do mesmo;
- Forma construtiva – Características e geometria do motor, que influenciam na sua instalação e acomodação no interior dos equipamentos, por exemplo;
- Posição e forma das conexões – São características importantes para se prever a montagem e instalação do motor no ambiente e/ou equipamento onde irá operar.

Além dos fatores elencados anteriormente, ao se escolher um motor para determinada aplicação deve-se levar em conta as grandezas elétricas e mecânicas, como tensão de funcionamento, corrente elétrica, potência mecânica útil no eixo do motor, além das especificidades em termos de circuitos elétricos para acionamento dos motores, que podem ser diferentes conforme o modelo e tipo de motor escolhido.

6 Exercícios

Exercícios Resolvidos

ER 01. Defina motor elétrico de corrente contínua.

Motor elétrico de corrente contínua é uma máquina rotativa que converte energia elétrica em energia mecânica, a partir da tensão de alimentação em corrente contínua.

ER 02. Quais os principais tipos de motores elétricos de corrente contínua, considerando a tecnologia de construção dos mesmos.

Motores com escovas (convencionais), motores com ímãs permanentes, motores sem escovas.

ER 03. Quais os dois circuitos que compõem um motor de corrente contínua?

O circuito de armadura e o circuito de campo.

ER 04. A velocidade de um motor de corrente contínua, simplificada, depende de que grandezas?

Se a queda de tensão na armadura for pequena, então a velocidade do motor de corrente contínua depende da tensão de armadura e do fluxo magnético.

ER 05. Cite aplicações para os motores de corrente contínua.

Ferramentas elétricas, utensílios de cozinha e de casa, máquinas de costura, dentre outras.

Exercícios Propostos

EP 01. Explique com suas palavras como funciona um motor elétrico de corrente contínua.

EP 02. Comente sobre as vantagens e desvantagens dos motores de corrente contínua.

EP 03. Cite os tipos de motores de corrente contínua, levando em conta a conexão dos enrolamentos de armadura e de campo.

EP 04. Cite as principais partes de um motor de corrente contínua.

EP 05. Comente sobre as aplicações dos motores de corrente contínua.

7 Atividade Avaliativa

7.1 Introdução – O que preciso saber

Ao final deste objetivo de aprendizagem são apresentadas cinco questões, que devem ser respondidas sem consultar o material. Se você conseguir responder as questões e conferir as respostas com o gabarito abaixo, parabéns, você concluiu com êxito este tópico. Caso tenha errado alguma questão, revise o conteúdo relacionado com a mesma e refaça a questão, procurando se concentrar mais desta vez, para acertar o exercício e fixar bem o conteúdo.

AA 01. O que são máquinas de corrente contínua?

AA 02. Cite as principais partes de uma máquina de corrente contínua.

AA 03. Como se pode alterar a velocidade de rotação de um motor de corrente contínua?

AA 04. Cite exemplos de fatores utilizados para escolha de motores de corrente contínua.

AA 05. Comente sobre as características dos motores sem escovas (*brushless*).

dentre outras aplicações.
operar com velocidades elevadas, sendo utilizados para veículos elétricos, drones, aeromodelos,
AA 05. Os motores sem escovas (*brushless*) são robustos e exigem pouca manutenção, podendo
AA 04. Grau de proteção, tipo de refrigeração, classe de isolamento, etc.
a tensão de armadura ou o fluxo magnético, pela alteração da corrente de campo.
AA 03. A velocidade de rotação do motor de corrente contínua pode ser alterada modificando-se
ou campo, coletor e escovas.
AA 02. As principais partes de uma máquina de corrente contínua são: rotor ou armadura, estator
corrente contínua, no caso dos geradores.
alimentação em tensão contínua; ou converter energia mecânica em energia elétrica na forma de
energia elétrica em mecânica no caso de motores, quando alimentados com uma fonte de
AA 01. Máquinas de corrente contínua são máquinas elétricas rotativas que podem converter a



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA

DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA

CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM ELETRÔNICA INDUSTRIAL

Acionamentos Eletrônicos



GUIA DE ESTUDO

- OBJETIVO DE APRENDIZAGEM -

ACIONAMENTO DE MOTORES DE CORRENTE CONTÍNUA

ACIONAMENTO DE MOTORES DE CORRENTE CONTÍNUA

Objetivo de Aprendizagem

Acionamento de motores de corrente contínua.

Objetivos parciais

- Estudar os quadrantes de operação de uma máquina de corrente contínua;
- Conhecer os principais elementos para acionamento de motores de corrente contínua;
- Conhecer circuitos para acionamento de motores de corrente contínua.

Aulas relacionadas

Este objetivo de aprendizagem está relacionado com a aula 08 da disciplina.

Pré-requisitos

Ter estudado o objetivo de aprendizagem 07 relacionado ao estudo dos motores de corrente contínua.

Continuidade dos Estudos

O próximo objetivo de aprendizagem será o estudo dos motores de passo.

Roteiro para estudos

Os estudos referentes a este objetivo de aprendizagem consistem em:

1. Estudar este documento resumo, realizando as atividades propostas no mesmo;
2. Responder o quiz relacionado a este objetivo de aprendizagem;
3. Caso perceba necessidade, estudar a apresentação deste assunto ou consultar os livros texto indicados para esta disciplina;
4. Realizar os exercícios deste tópico da matéria;
5. Realizar a avaliação final para progredir ao próximo conteúdo.

Referências

- Material disponibilizado para a disciplina de Acionamentos Eletrônicos – 2021/1.
Departamento Acadêmico de Eletrônica, Instituto Federal de Santa Catarina, Campus Florianópolis.
- STEPHAN, Richard M. Acionamento Comando e Controle de Máquinas Elétricas. Rio de Janeiro: UFRJ, 2009.

Check-list

Caro estudante, verifique se você completou as atividades deste objetivo de aprendizagem e obteve êxito para continuar seus estudos.

Assinale as atividades realizadas:

Estudo do documento resumo:

- Leitura do documento resumo;
- Exercícios do documento resumo;
- Atividade avaliativa do documento resumo.
- Obtive êxito e entendi o conteúdo deste documento;
- Ainda não entendi bem o conteúdo e estudarei o mesmo com mais profundidade.

Estou com dúvidas, irei estudar com mais detalhes este conteúdo:

- Assistir a apresentação relacionada ao conteúdo (apresentação 08);
- Ler este guia de estudo (objetivo de aprendizagem 08).

Ainda estou com dúvidas:

- Entrarei em contato com o professor.

Obtive êxito, então seguirei em frente:

- Responder ao quiz deste conteúdo no Moodle;
- Informar ao professor que estou avançando com o conteúdo.

Parabéns, continue estudando com afinco e vamos em frente!!

CONTEÚDO

- OBJETIVO DE APRENDIZAGEM -
ACIONAMENTO DE MOTORES DE CORRENTE
CONTÍNUA

1 Introdução

O capítulo anterior foi relacionado ao estudo das máquinas de corrente contínua, com especial enfoque nos motores de corrente contínua.

Este capítulo terá como objetivo principal o estudo dos circuitos de acionamento de motores de corrente contínua.

1.1 Conteúdo – O que irei estudar

Estudaremos neste tópico:

- Quadrantes de operação de uma máquina de corrente contínua;
- Principais elementos para acionamento de motores de corrente contínua;
- Circuitos para acionamento de motores de corrente contínua.

1.2 Metodologia – O que devo fazer e como fazer

Leia com atenção o conteúdo a seguir. Ao final deste tópico são apresentados exercícios resolvidos. Após são apresentados alguns exercícios propostos.

Ao realizar estas atividades e se sentir confiante para progredir, siga os passos indicados na primeira página deste documento.

Espera-se que após estudar este assunto, você consiga:

- Descrever os quadrantes de operação das máquinas elétricas de corrente contínua;
- Citar os principais elementos para acionamento dos motores de corrente contínua;
- Explicar o funcionamento de alguns circuitos para acionamento de motores de corrente contínua.

A atividade avaliativa deste objetivo de aprendizagem consistirá em perguntar ao estudante para descrever o funcionamento de um circuito de acionamento de um motor de corrente contínua, por exemplo.

Exemplo de atividade avaliativa:

1. Explicar com suas palavras os quadrantes de operação das máquinas de corrente contínua.
2. Citar elementos utilizados para acionamento de motores de corrente contínua.
3. Explicar o funcionamento de algum circuito de acionamento de motor de corrente contínua.

2 Quadrantes de Operação das Máquinas de Corrente Contínua

2.1 Introdução

As máquinas elétricas de corrente contínua podem funcionar tanto como motor e como gerador, dependendo da sua conexão e aplicação. O objetivo maior deste curso é o estudo dos circuitos de acionamento dos motores elétricos, valendo também para o acionamento dos motores de corrente contínua.

Este capítulo irá apresentar os quadrantes de operação das máquinas de corrente contínua, especificamente dos motores de corrente contínua, que podem funcionar no modo motor ou no modo gerador.

2.2 Circuito elétrico e símbolo do motor de corrente contínua

O circuito elétrico equivalente da máquina do motor de corrente contínua é mostrado na Figura 1, conforme estudado no capítulo anterior deste curso. Em geral, as aplicações mais simples utilizam motores com a conexão interna do circuito de campo e armadura, em série ou paralelo, resultando em dois condutores para conexão do motor ao circuito de acionamento e alimentação.

Assim, o motor será representado, simplificada, pelo seu símbolo, mostrado na Figura 1. Note que neste caso não se representam os elementos internos da máquina, lembrando-se que para o estudo dos circuitos de acionamento do motor elétrico de corrente contínua, o comportamento de carga resistiva-indutiva (mais tensão de armadura) deve ser levado em conta.

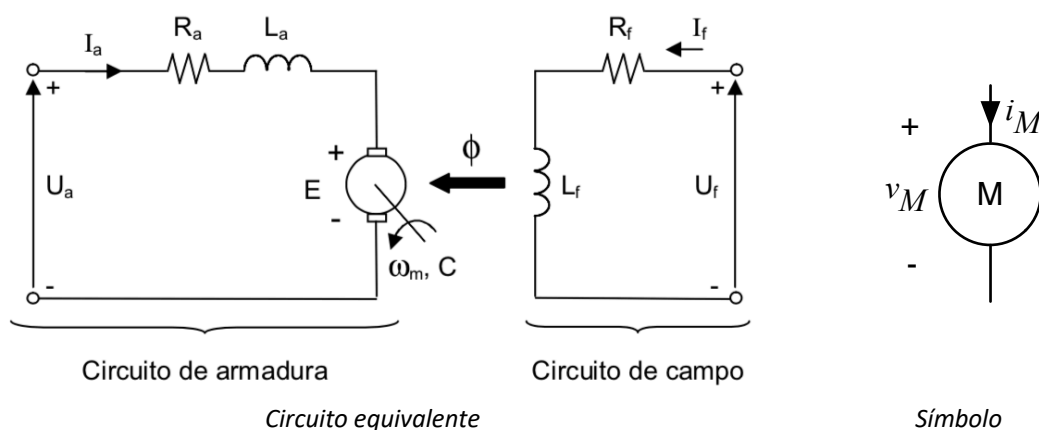


Figura 1 – Circuito elétrico equivalente e símbolo do motor de corrente contínua.

Fonte: (Siemens, 2006)¹.

¹ SIEMENS. *Motores de Corrente Contínua – Guia rápido para uma especificação precisa, edição 01, 2006.* Disponível em: <https://new.siemens.com/br/pt.html>.

2.3 Quadrantes de operação do motor elétrico de corrente contínua

A máquina de corrente contínua, neste caso em específico, o motor de corrente contínua, pode ser acionado para operar como motor ou gerador, isto é, a operação pode ser realizada em quatro quadrantes, conforme a polaridade da tensão em seus terminais e do sentido da corrente no mesmo. Assim, pode-se ter:

- $V_m > 0$ e $I_m > 0$ – A tensão e a corrente são positivas na máquina e a mesma está funcionando como motor. A potência é positiva, ou seja, a fonte está fornecendo energia e a máquina é a carga do circuito. O sentido de giro da máquina é escolhido como anti-horário. Este é o primeiro quadrante de operação mostrado na Figura 2;
- $V_m < 0$ e $I_m > 0$ – A tensão é negativa e a corrente é positiva na máquina e a mesma está funcionando como gerador. A potência é negativa, ou seja, a máquina está fornecendo energia e a fonte é a carga do circuito. O sentido de giro da máquina é escolhido como horário. Este é o segundo quadrante de operação na Figura 2;
- $V_m < 0$ e $I_m < 0$ – A tensão e a corrente são negativas na máquina e a mesma está funcionando como motor. A potência é positiva, ou seja, a fonte está fornecendo energia e a máquina é a carga do circuito. O sentido de giro da máquina é escolhido como horário. Este é o terceiro quadrante de operação na Figura 2;
- $V_m > 0$ e $I_m < 0$ – A tensão é positiva e a corrente é negativa na máquina e a mesma está funcionando como gerador. A potência é negativa, ou seja, a máquina está fornecendo energia e a fonte é a carga do circuito. O sentido de giro da máquina é escolhido como anti-horário. O quarto quadrante está mostrado na Figura 2.

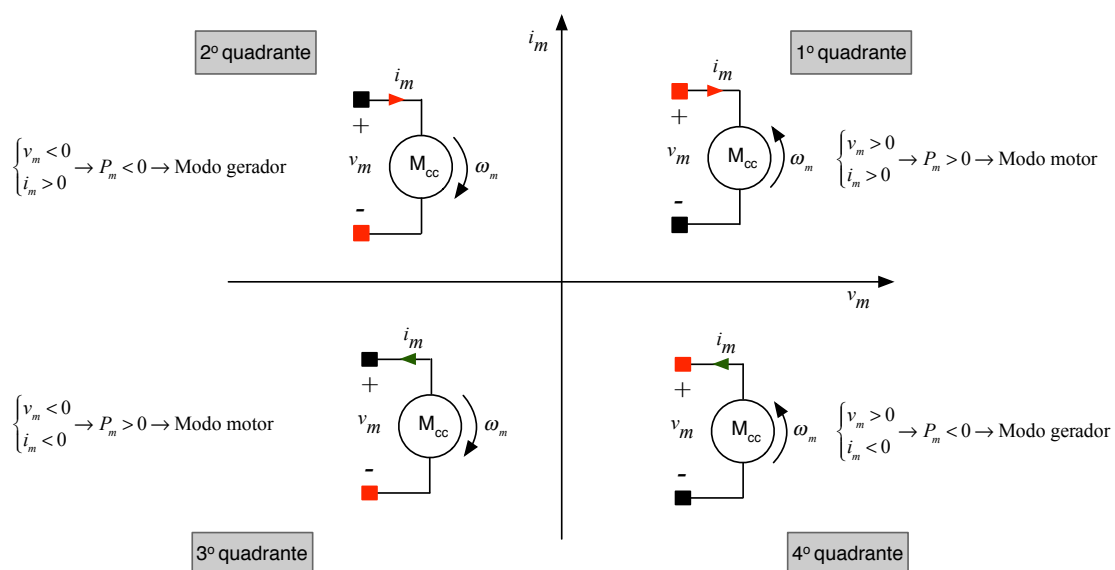


Figura 2 – Quadrantes de operação de uma máquina de corrente contínua.

2.4 Circuitos básicos para acionamento da máquina de corrente contínua

Os circuitos ou elementos de circuitos utilizados para acionamento do motor de corrente contínua irá determinar se a máquina poderá operar em um ou mais quadrantes.

O circuito apresentado na Figura 3 é uma das formas mais simples para acionamento de um motor de corrente contínua, contendo um interruptor e um diodo de roda-livre. O diodo de roda-livre é utilizado em virtude do motor ter comportamento de circuito resistivo-indutivo, e assim, ao se interromper a corrente no mesmo, podem ocorrer sobretensões sobre os elementos do circuito, caso a corrente elétrica no motor não tenha um caminho para circular. Este circuito tem as seguintes características.

- Permite operação em um quadrante apenas, isto é, operação como motor;
- Pode-se ligar e desligar a máquina de corrente contínua;
- Não permite controle de velocidade;
- Não permite inversão no sentido de rotação;
- Não permite regeneração de energia (operação como gerador).

O circuito da Figura 3 tem duas etapas de operação; tendo-se a etapa onde o interruptor está fechado e o motor está alimentado pela fonte; e a outra etapa onde o interruptor está aberto e a corrente do motor está circulando pelo diodo de roda-livre.

O circuito mostrado na Figura 4 utiliza um transistor no papel de interruptor. Neste circuito também se tem o diodo de roda-livre, tendo as seguintes características:

- Permite operação em um quadrante apenas, isto é, operação como motor;
- Pode-se ligar e desligar a máquina de corrente contínua;
- Permite controle de velocidade;
- Não permite inversão no sentido de rotação;
- Não permite regeneração de energia (operação como gerador).

As etapas de operação do circuito mostrado na Figura 4 são semelhantes às etapas do circuito de acionamento com interruptor simples. A diferença deste circuito com transistor em relação aquele com interruptor simples é que agora pode-se fazer a variação da velocidade do motor de corrente contínua, utilizando modulação PWM, por exemplo.

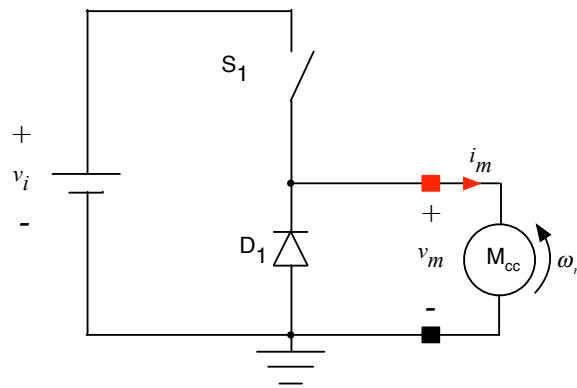


Figura 3 – Circuito simples para acionamento de um motor de corrente contínua.

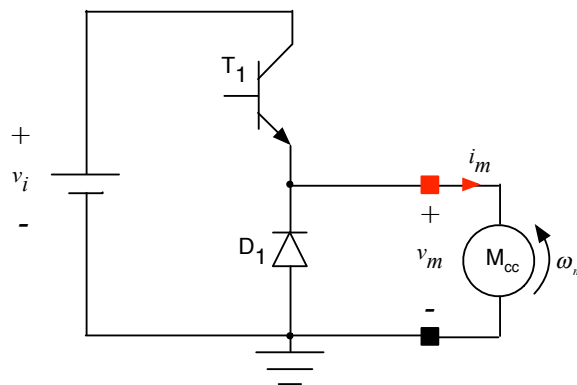


Figura 4 – Circuito com transistor para acionamento de um motor de corrente contínua.

O circuito mostrado na Figura 5 possui dois transistores e dois diodos de roda-livre, sendo conhecido em eletrônica de potência como conversor meia ponte. Este circuito tem as seguintes características:

- Permite operação em dois quadrantes (motor e gerador em um sentido de rotação);
- Pode-se ligar e desligar a máquina de corrente contínua;
- Permite controle de velocidade;
- Não permite inversão no sentido de rotação;
- Permite regeneração de energia (operação como gerador).

O circuito mostrado na Figura 5, para operação como motor, tem duas etapas de operação, sendo semelhantes aquelas descritas anteriormente para o circuito de acionamento com transistor e diodo. Por outro lado, como este circuito permite a operação em dois quadrantes (primeiro quadrante e quarto quadrante), conforme a Figura 2, pode regenerar energia do motor para a fonte, durante frenagens, tendo então duas etapas operação específicas para o modo regeneração.

No circuito da Figura 5, o transistor T_1 controla o acionamento no modo motor, enquanto o transistor T_2 controla o acionamento no modo gerador (regeneração de energia).

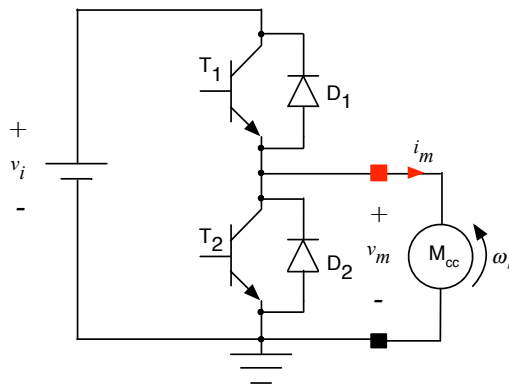


Figura 5 – Circuito para acionamento de um motor de corrente contínua e operação em dois quadrantes.

Por sua vez, o circuito mostrado na Figura 6 com quatro transistores e quatro diodos de roda-livre é um conversor ponte completa, também conhecido como ponte H. Este circuito tem as seguintes características:

- Permite operação em quatro quadrantes (motor e gerador nos dois sentidos de rotação);
- Pode-se ligar e desligar a máquina de corrente contínua;
- Permite controle de velocidade;
- Permite inversão no sentido de rotação;
- Permite regeneração de energia (operação como gerador).

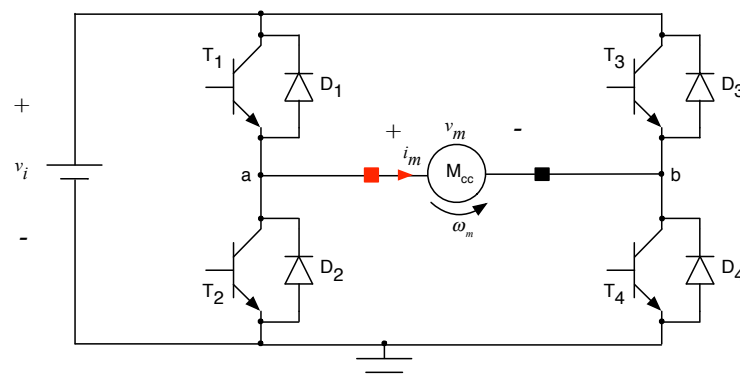


Figura 6 – Circuito para acionamento de um motor de corrente contínua e operação em quatro quadrantes.

O circuito da Figura 6 é mais complexo, mas também é completo, permitindo o controle total da máquina de corrente contínua. Este circuito tem etapas distintas, para operação como motor, em ambos os sentidos de rotação (horário e anti-horário), nos primeiro e terceiro

quadrantes, conforme mostrado na Figura 2. Além disso, o circuito do conversor ponte completa possibilita também a operação como gerador, em ambos os sentidos de rotação, nos segundo e quarto quadrantes, conforme mostrado Figura 2.

3 Elementos de Circuitos de Acionamento de Motores

3.1 Introdução

A seguir serão apresentados os principais elementos de circuitos de acionamento de motores de corrente contínua.

O objetivo deste capítulo será apresentar alguns elementos, não se pretendendo abordar em profundidade os elementos em estudo, tampouco elencar todos os dispositivos e componentes que podem ser empregados para circuitos de acionamento de motores de corrente contínua, que podem ser desde circuitos simples com poucos componentes, até circuito muito complexos, com controles sofisticados, como em veículos elétricos, por exemplo.

3.2 Elementos de proteção

Os elementos de proteção mais simples para circuitos de acionamento de motores são os fusíveis e os disjuntores termomagnéticos.

Os disjuntores foram estudados no capítulo relacionado aos elementos de instalações elétricas de baixa tensão, sendo que naquele momento os dispositivos apresentados se destinavam para operação em corrente alternada, e para o acionamento de motores de corrente contínua serão utilizados disjuntores para corrente contínua.

A Figura 7 mostra o exemplo de um disjuntor para 16 A e operação em corrente contínua com tensões até 500 V.

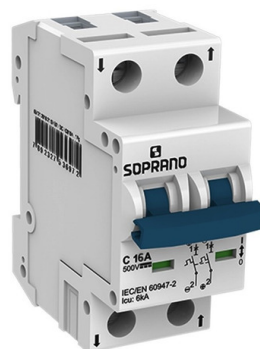


Figura 7 – Exemplo de disjuntor termomagnético para corrente contínua.

Fonte: <https://www.soprano.com.br>. Acesso em 21/07/2021.

Os fusíveis a serem utilizados em circuitos de acionamento de motores devem ser de ação lenta, para não atuarem durante a partida do motor, por exemplo.

A Figura 8 mostra fusíveis para uso em circuitos eletrônicos, tendo corpo de vidro, areia ou cerâmica. A presença da areia junto ao elo fusível (elemento que conduz a corrente elétrica e irá abrir ao ocorrer uma sobrecorrente) evita o surgimento de arco elétrico no momento de abertura do fusível, principalmente quando da operação com circuitos com características indutivas, como é o caso de circuitos de acionamento de motores elétricos.

Na Figura 9 apresentam-se os símbolos mais comuns para representar fusíveis e disjuntores em circuitos elétricos e eletrônicos, onde comumente se anota junto ao símbolo a corrente de atuação do dispositivo.



Figura 8 – Exemplos de fusíveis com corpo de vidro, areia e cerâmica.

Fonte: <https://www.americanas.com.br>. Acesso em 21/07/2021.

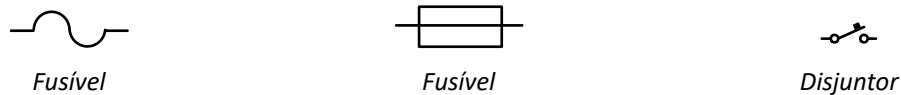


Figura 9 – Símbolos para fusíveis e disjuntores.

3.3 Dispositivos eletromecânicos e eletromagnéticos

As chaves do tipo liga-desliga são os elementos mais comuns para acionamento de diferentes cargas. Assim, estes elementos podem ser utilizados para ligar e desligar motores elétricos de corrente contínua, desde que associadas ao diodo de roda-livre, como mostrado no circuito da Figura 3. A Figura 10 mostra alguns exemplos de chaves liga-desliga disponíveis comercialmente.

Além das chaves eletromecânicas, é comum se utilizarem dispositivos eletromagnéticos, como relés e contatores, especificamente para operação em tensão contínua, como mostrado na Figura 11. Os relés podem ter contatos simples ou duplos, como mostrado pelos símbolos usuais da Figura 12.

Os contatores e relés funcionam utilizando o princípio da Força de Lorentz, estudada em capítulos anteriores. Assim, sempre que uma corrente elétrica for aplicada na bobina (terminais A_1 e A_2) do elemento, o surgimento do campo magnético irá provocar uma força mecânica que irá

movimentar uma lâmina, acoplada aos contatos, fazendo os mesmos abrirem ou fecharem. Ao retirar a aplicação da corrente elétrica na bobina do relé ou contator, a força não estará presente e os contatos irão retornar a sua posição de repouso.

Os contatos que em repouso estão abertos são identificados como NA e aqueles que estão fechados em repouso são identificados como NF. É comum se utilizarem, em determinadas aplicações, relés com contatos abertos e fechados que compartilham um contato comum, como mostrado na Figura 12; sendo que neste caso o contato comum (C) estará conectado ao contato fechado (NF) quando o relé estiver em repouso, e estará conectado ao contato aberto (NA) quando o relé for acionado, pela aplicação de corrente elétrica na bobina do mesmo.

Ao utilizar relés e contatores em circuitos elétricos e eletrônicos deve-se atentar para a tensão nominal de operação de sua bobina e os limites de operação em termos de tensão e corrente nos contatos dos mesmos, além de sua aplicação em corrente contínua ou alternada, conforme o caso.



Alavanca



Gangorra retangular



Gangorra redonda

Figura 10 – Exemplos de chaves liga-desliga.

Fonte: <https://www.shoptime.com.br>. Acesso em 21/07/2021.



Relé com contatos simples



Relé com contatos duplos



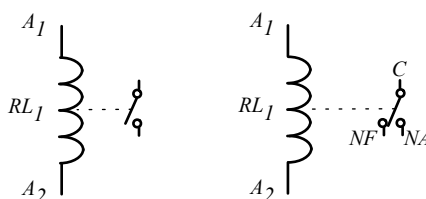
Contator para corrente contínua

Figura 11 – Exemplos de relés e contator para corrente contínua.

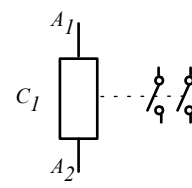
Fonte: <https://www.metaltex.com.br> e <https://www.weg.net>. Acesso em 21/07/2021.



Chave liga-desliga



Relé simples e duplo



Contator

Figura 12 – Símbolos para chaves, relés e contatores.

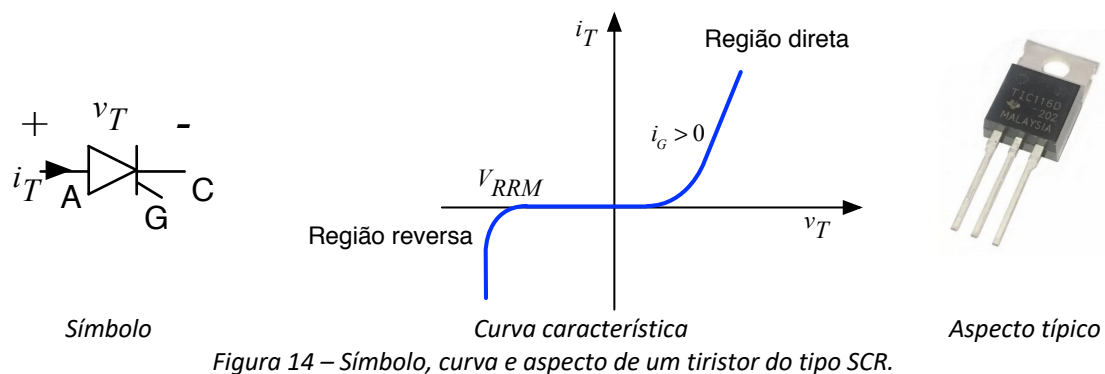
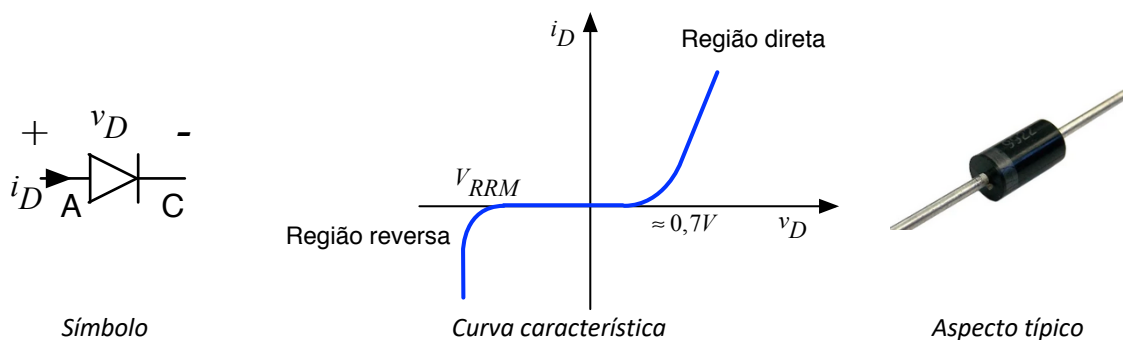
3.4 Semicondutores

Os semicondutores mais utilizados para circuitos de acionamento de motores de corrente contínua são os diodos de junção de silício, por exemplo, pois os mesmos atuam como caminho para a circulação da corrente elétrica quando o interruptor principal é aberto, como mostrado na Figura 4.

A Figura 13 apresenta o símbolo com a identificação da corrente e tensão no diodo de junção, além da curva característica do comportamento da corrente pela tensão e o aspecto típico de um diodo comercial.

Os tiristores do tipo SCR são diodos controlados de silício, sendo utilizados para se alterar a velocidade de um motor de corrente contínua alterando sua tensão de alimentação, por exemplo. A diferença básica de um tiristor (SCR) para um diodo é a presença do terminal de controle (gatilho), fazendo com que a condução dependa tanto da polarização direta como da circulação de corrente por este terminal.

A Figura 14 apresenta o símbolo, curva característica e aspecto típico para um tiristor SCR para correntes da ordem de 3 A e tensão de 400 V.



Por sua vez, os transistores são os componentes mais utilizados em aplicações de potências baixas e médias, quando se deseja controlar o motor de corrente contínua em termos de

velocidade e sentido de rotação. A invenção e fabricação dos transistores impactou a história da eletrônica e da humanidade como um todo, pois com estes componentes foi possível construir equipamentos mais leves e com menor volume e operação com baixas tensões e correntes, permitindo que os equipamentos fossem alimentados com baterias.

É importante destacar que os transistores possuem três regiões de operação:

- Corte – É a região em que o transistor não está conduzindo, sua corrente é nula e a tensão sobre o mesmo, em geral, é igual a da fonte de alimentação. Nesta região de operação o transistor não tem perdas, isto é, não processa (dissipa) potência;
- Ativa – É a região de operação em que a corrente de saída varia linearmente com a corrente ou tensão de entrada, por isso é usada para amplificação. Nesta região se tem altas perdas, pois a potência no transistor é o produto da corrente pela queda de tensão no mesmo;
- Saturação – É a região onde o transistor está conduzindo plenamente, com alta corrente. Por outro lado, a queda de tensão é a menor possível, o que implica em perdas menores do que na região ativa.

Em acionamentos eletrônicos se utilizam os transistores nas regiões de corte e saturação, para minimizar as perdas e conseqüentemente a necessidade de uso de dissipador de calor.

Nas aplicações de acionamentos eletrônicos e eletrônica de potência se utilizam em maior escala três tecnologias de transistores, descritas a seguir:

- BJT – Transistor bipolar de junção. São os transistores clássicos do tipo NPN ou PNP, acionados pela corrente de base, isto é, a corrente de coletor depende diretamente (ganho) da corrente na base do transistor;
- MOSFET – São transistores mais rápidos, com diferentes tecnologias de fabricação e que conduzem ou não pela aplicação de uma tensão no gatilho (*gate*), que por intermédio do campo elétrico, proporcionará a abertura ou fechamento do canal e, portanto, a condução ou não do transistor;
- IGBT – São componentes construídos a partir da tecnologia BJT e MOSFET, incorporando características de ambos. São acionados por tensão como os MOSFETs, mas possuem perdas semelhantes ao BJT.

A Figura 15 apresenta os símbolos dos transistores do tipo BJT, MOSFET e IGBT, enquanto a Figura 16 apresenta diferentes encapsulamentos de transistores, conforme o nível de corrente que os mesmos podem conduzir.

Em acionamentos eletrônicos, para simplificar a implementação do circuito de base dos

transistores bipolares, é comum se utilizar elementos com altos ganhos, por exemplo do tipo Darlington, como por exemplo os modelos da família TIP120. A Figura 17 mostra o circuito interno dos transistores NPN e PNP, complementares entre si, da família TIP120, que possui ganhos da ordem de 1000, podem conduzir correntes de 5 A e operar com tensão de 60 até 100, conforme o modelo escolhido.

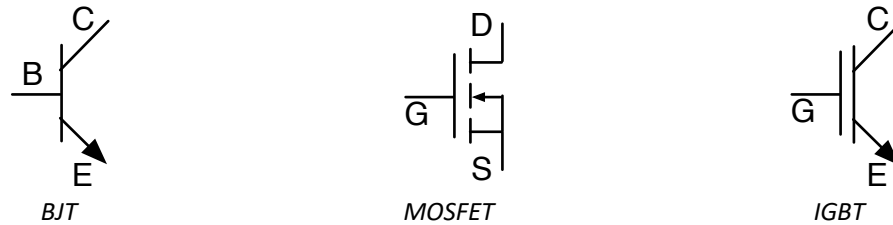
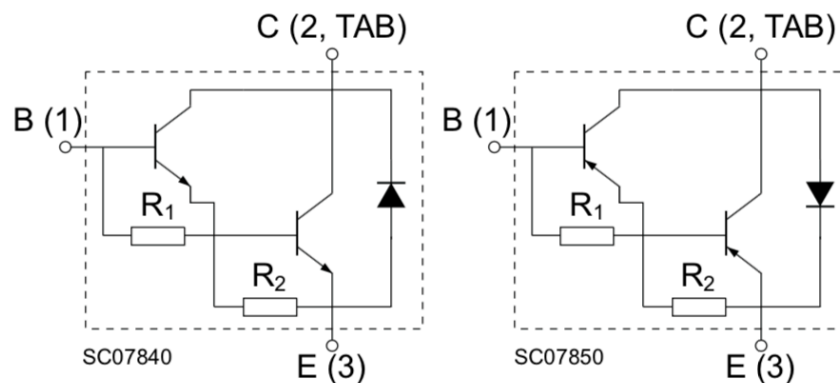


Figura 15 – Símbolos dos transistores.



Figura 16 – Transistores comuns disponibilizados comercialmente.



$$\text{NPN: } R_1 = 7 \text{ k}\Omega, R_2 = 70 \Omega \quad \text{PNP: } R_1 = 16 \text{ k}\Omega, R_2 = 60 \Omega$$

Figura 17 – Circuito interno de transistores Darlington.

Fonte: <https://www.st.com>. Acesso em 21/07/2021.

3.5 Circuitos integrados

Em virtude das diversas aplicações para motores elétricos, se tem disponíveis comercialmente circuitos integrados (CI) dedicados para o acionamento de motores de corrente contínua.

Um exemplo de circuito comercial que utiliza o conversor ponte completa é mostrado na Figura 18, implementado com base no circuito integrado L293, que permite o acionamento de dois motores sem inversão de rotação, ou um motor com controle total, por meio do conversor ponte completa (ponte H), conforme mostrado na Figura 19. Existem outros modelos de circuitos integrados disponíveis comercialmente, tanto para acionamento de motores de corrente contínua convencionais, como motores de passo, etc.

Note no circuito da Figura 19 que foram adicionados os diodos de roda-livre externamente ao circuito integrado. Este cuidado é muito importante, pois do contrário poderão ocorrer danos nos transistores internos do CI, visto se estar comutando uma carga indutiva (motor), que poderá gerar sobretensões caso não se tenha caminho para a corrente elétrica ao abrir algum interruptor do conversor ponte completa.

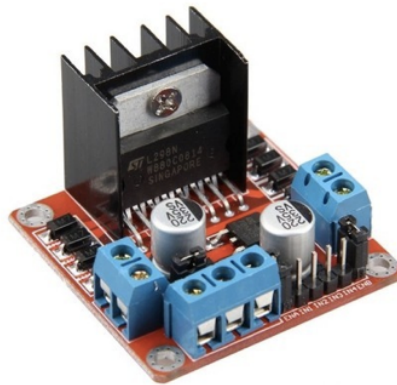


Figura 18 – Exemplo de placa de acionamento de motor que emprega o conversor ponte completa.

Fonte: <https://www.curtocircuito.com.br>. Acesso em 03/06/2020.

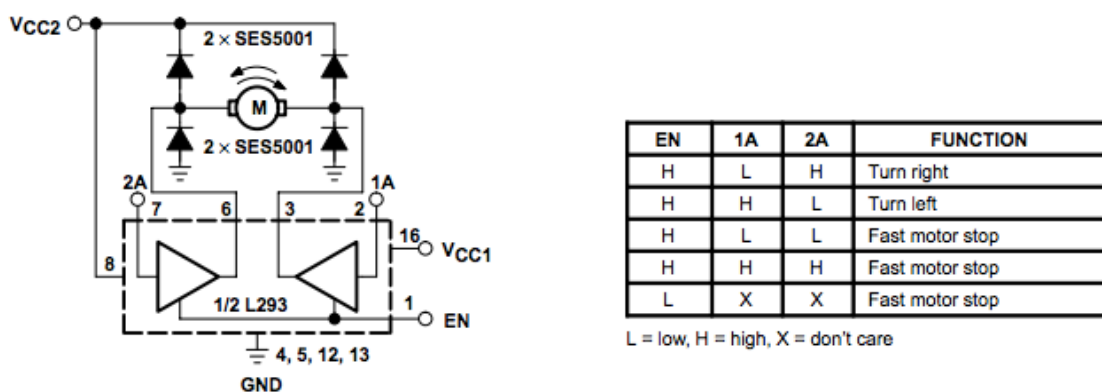


Figura 19 – Exemplo de conexão interna do L293.

Fonte: <http://users.ece.utexas.edu/~valvano/Datasheets/L293d.pdf>. Acesso em 03/06/2020.

3.6 Conversores ca-cc e cc-cc

A alimentação do circuito de acionamento de motores de corrente contínua pode ser realizada por meio de fontes de alimentação diretamente em corrente contínua ou pela conversão da tensão alternada da rede de energia elétrica em tensão contínua, utilizando conversores ca-cc, como mostrado na Figura 20.

Assim também os conversores cc-cc podem ser utilizados para implementar circuitos de acionamento de motores de corrente contínua, associando-se aos mesmos circuitos específicos de acionamento ou aproveitando as próprias características de funcionamento do conversor para conectar a máquina de corrente contínua.

A Figura 21 mostra exemplos de diferentes conversores cc-cc que podem ser utilizados para diferentes aplicações, inclusive circuitos de acionamento de motores de corrente contínua. Note que os conversores podem ter diferentes encapsulamentos, conforme a aplicação e ambiente onde serão instalados e utilizados.



Figura 20 – Conversor ca-cc de alta potência.

Fonte: <https://www.positronic.com.br>. Acesso em 21/07/2021.



Figura 21 – Conversores cc-cc para diferentes aplicações.

Fonte: <https://www.cebra.com.br>. Acesso em 21/07/2021.

Os conversores para acionamento de motores de corrente contínua podem ser denominados de *drives*, incorporando o circuito conversor ca-cc e o circuito de acionamento, controle e proteção do motor de corrente contínua, como mostrado na Figura 22, que pode ser alimentado com tensões de 110 ou 220 V e alimentar cargas com tensões até 90 V e potências de 7 a 1000 W.

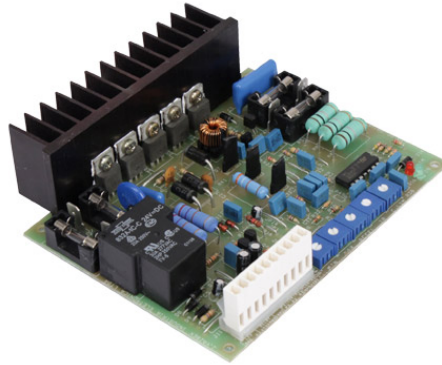


Figura 22 – Drive de acionamento de motor de corrente contínua.

Fonte: <http://jyazbek.com.br>. Acesso em 21/07/2021.

4 Circuitos de Acionamento de Motores de Corrente Contínua

4.1 Introdução

A seguir serão apresentados alguns circuitos de acionamento de motores de corrente contínua, buscando-se mostrar o funcionamento básico dos mesmos e permitir que a partir dos mesmos diferentes soluções e circuitos sejam propostos e implementados.

4.2 Acionamento com chaves e relés

O acionamento de motores de corrente contínua com chaves é realizado em aplicações onde não é necessária a alteração da velocidade do motor, por exemplo em brinquedos, ferramentas elétricas, eletrodomésticos, dentre outras.

Um circuito simples, a exemplo daqueles apresentados no início deste capítulo, é mostrado na Figura 23, pelo qual se pode ligar e desligar o motor pelo comando na chave S_1 . Note a presença do diodo de roda-livre (D_1), visto o motor ser uma carga resistiva-indutiva.

O circuito mostrado na Figura 24 utiliza uma chave HH, permitindo que se faça a inversão do sentido de rotação do motor. Neste caso a chave S_1 serve para ligar e desligar o motor, enquanto a chave S_2 permite o acionamento do motor no sentido horário ou anti-horário. Esta solução é comumente utilizada em brinquedos, por exemplo

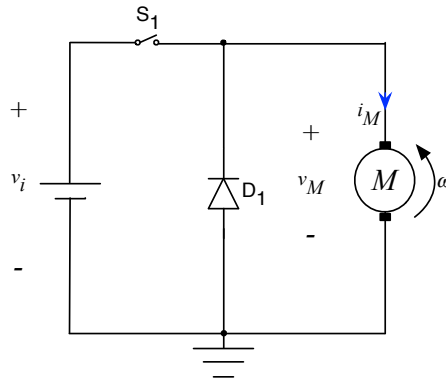
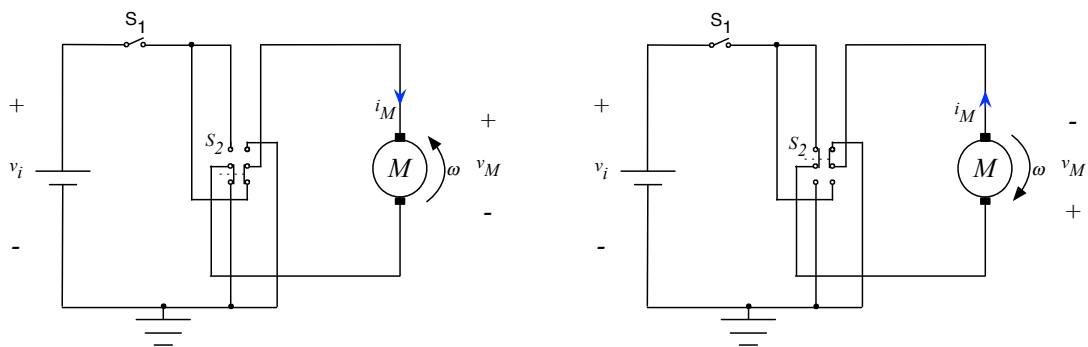


Figura 23 – Circuito simples para acionamento de motor de corrente contínua.



Rotação no sentido anti-horário

Rotação no sentido horário

Figura 24 – Circuito com chave HH para ligar e desligar e inverter o sentido de rotação do motor.

O circuito mostrado na Figura 25 utiliza um relé (RL_1) para fazer o acionamento do motor de corrente contínua. Neste circuito é utilizado um transistor (T_1) para fazer o acionamento do relé, isto é, prover a corrente elétrica na bobina do mesmo. O sinal de controle virá de algum circuito externo, como um microcontrolador, por exemplo, sendo aplicado na base do transistor por meio do resistor R_1 . O diodo D_1 atua como diodo de roda-livre para a bobina do relé, enquanto D_2 é o diodo de roda-livre para o motor de corrente contínua.

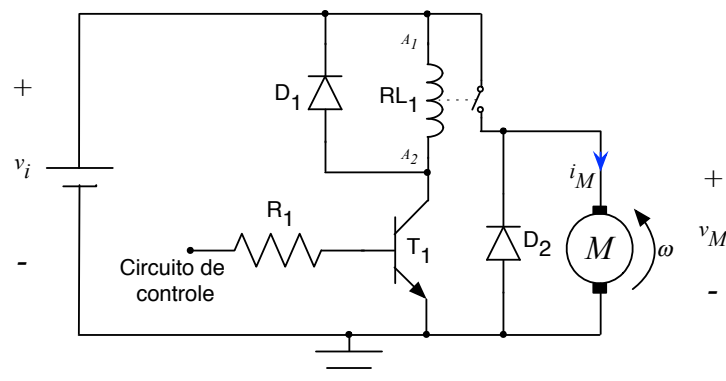


Figura 25 – Circuito de acionamento de motor com relé.

Por sua vez, o circuito mostrado na Figura 26 permite fazer o acionamento e a inversão de rotação do motor utilizando relés. Com os relés na posição de repouso, o motor permanece parado. Ao acionar o relé 1 (RL_1) o motor irá girar no sentido anti-horário como indicado na figura; e ao acionar o relé 2 (RL_2) se fará o motor girar no sentido horário. Caso os dois relés sejam acionados, então o motor também permanecerá parado.

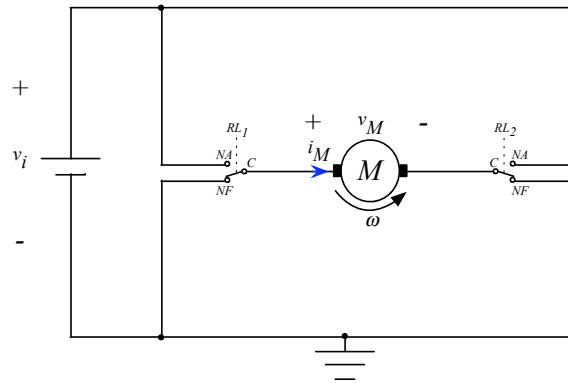


Figura 26 – Circuito com relés para inversão de rotação de motor de corrente contínua.

4.3 Acionamento com transistores

O circuito mostrado na Figura 27 utiliza um transistor e um diodo de roda-livre para fazer o acionamento do motor de corrente contínua. A principal diferença em relação aos circuitos de acionamento com chaves ou relés, é que neste caso, pelo controle da corrente de base, pode-se alterar a tensão média sobre o motor, controlando sua velocidade.

O transistor T_1 será utilizado como chave, isto é, no estado de corte ou saturação. Assim, o modo de funcionamento na região ativa não será utilizado, para se evitar as excessivas perdas neste componente. A corrente de base do transistor será aplicada na forma de pulsos, como mostrado na Figura 28, onde se mostram as formas de onda para a corrente de base e a tensão no motor. A tensão média, ou seja, seu valor contínuo é mostrado na figura por uma linha reta, em destaque.

Ao se aplicar pulsos com largura estreita na base do transistor, então a tensão no motor terá um valor médio baixo, fazendo com que o motor tenha baixa rotação. Se os pulsos tiverem largura alta igual a largura baixa, então a tensão média no motor será a metade da tensão de alimentação. Por fim, se a largura dos pulsos for grande, então o valor médio da tensão no motor aumentará, tendendo ao valor da fonte de alimentação, fazendo com que o motor tenha alta rotação.

O controle de um interruptor pela largura dos pulsos é denominado de modulação por largura de pulsos (PWM), sendo muito empregado para acionamento de motores elétricos. Pelas formas de onda mostradas na Figura 28, tem-se o valor do PWM tendendo a 0%, 50% ou 100%.

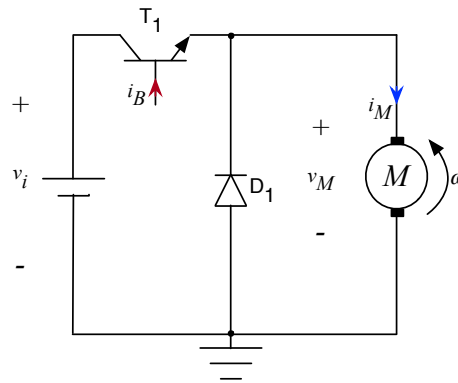


Figura 27 – Circuito para acionamento de motor de corrente contínua com transistor.

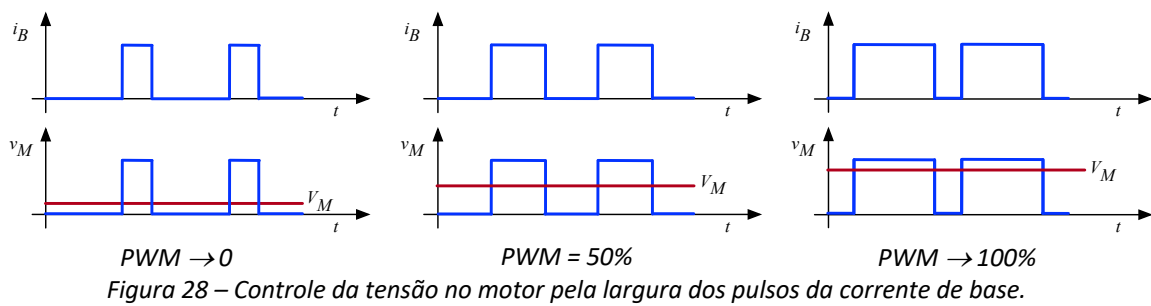
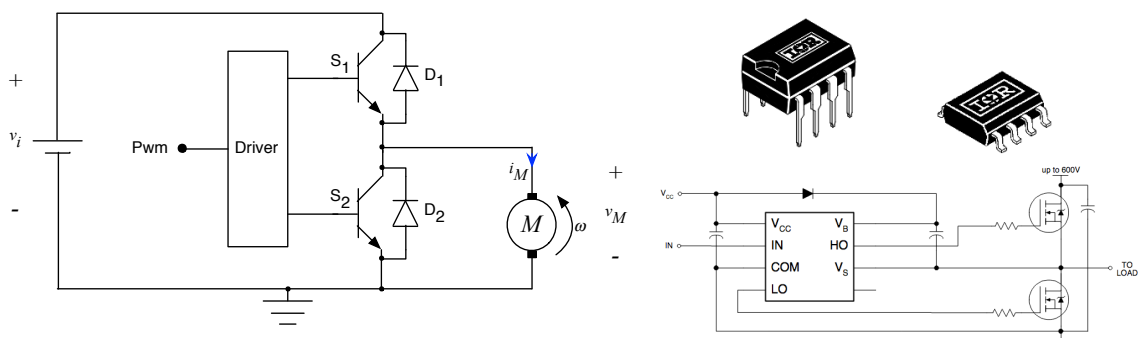


Figura 28 – Controle da tensão no motor pela largura dos pulsos da corrente de base.

A Figura 29 mostra um circuito com dois transistores e dois diodos, que permite o acionamento do motor de corrente contínua em dois quadrantes de operação, fazendo o mesmo operar como motor e como gerador, mas sem inversão no sentido de rotação. Para fazer o acionamento dos transistores pode ser utilizado algum circuito integrado dedicado, como por exemplo o IRF2111, conforme mostrado na figura.



Circuito de acionamento do motor

Circuito integrado IRF2111

Figura 29 – Acionamento de motor de corrente contínua para operação em dois quadrantes.

Fonte: <https://www.infineon.com>. Acesso em 21/07/2021.

Por sua vez, a Figura 30 apresenta o circuito de um conversor ponte completa (ou ponte H), utilizando quatro transistores e quatro diodos, além de dois circuitos integrados para acionamento dos transistores, que permite acionar o motor de corrente contínua nos quatro

quadrantes de operação, fazendo o mesmo operar como motor, como gerador e nos dois sentidos de rotação.

Este circuito mostrado na Figura 30 é completo, isto é, permite que o motor seja acionado e opere em toda sua capacidade, tanto como motor, como também no modo de regeneração de energia (gerador), o que torna seu uso interessante para veículos elétricos, tais como bicicletas, motos, carros, dentre outros.

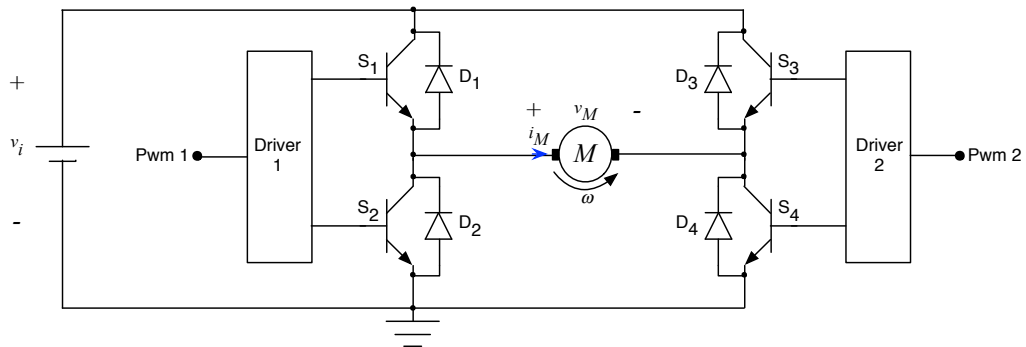


Figura 30 – Acionamento de motor de corrente contínua para operação em quatro quadrantes.

4.4 Acionamento com circuitos integrados

O uso de circuitos integrados para acionamento de motores, quando as condições de operação permitirem, torna-se uma solução interessante, pois pode-se simplificar o circuito completo e reduzir o tamanho da placa de circuito impresso, por exemplo.

A Figura 31 mostra as possibilidades de conexão de motores ao circuito integrado L293, onde se nota que é possível acionar três motores simultaneamente, sendo um deles em quatro quadrantes de operação e os outros dois em um quadrante de operação.

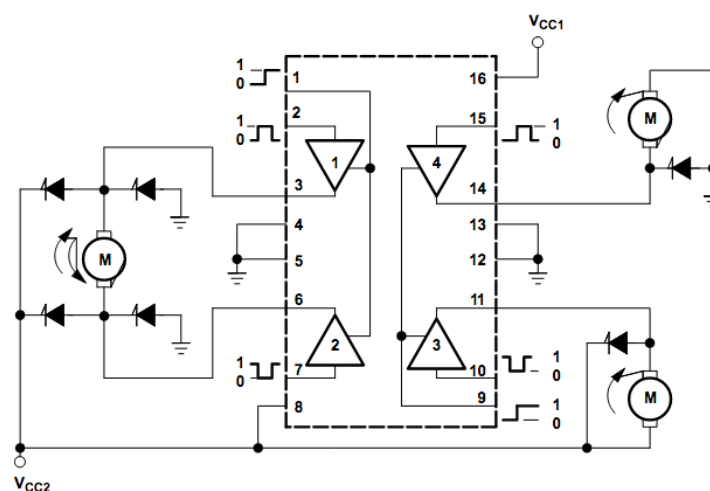


Figura 31 – Acionamento de motor de corrente contínua com circuito integrado L293.

Fonte: <https://www.ti.com>. Acesso em 21/07/2021.

4.5 Exemplos de projeto de circuito de acionamento de motor

Exemplo 1:

Considere o circuito da Figura 32 para fazer o acionamento do motor de corrente contínua ali mostrado, que tem as seguintes especificações:

- Tensão de operação – 24 V;
- Potência nominal – 30 W;
- Tecnologia – Imã permanente.

O circuito será alimentado por uma fonte de alimentação de 24 V, formada pela associação série de duas baterias com tensão nominal de 12 V em série. O controle de velocidade do motor será realizado por um kit de desenvolvimento baseado em Arduino. O projeto consiste em:

- Detalhar o circuito de acionamento do motor;
- Especificar os componentes do circuito;
- Determinar os dissipadores, se forem necessários.

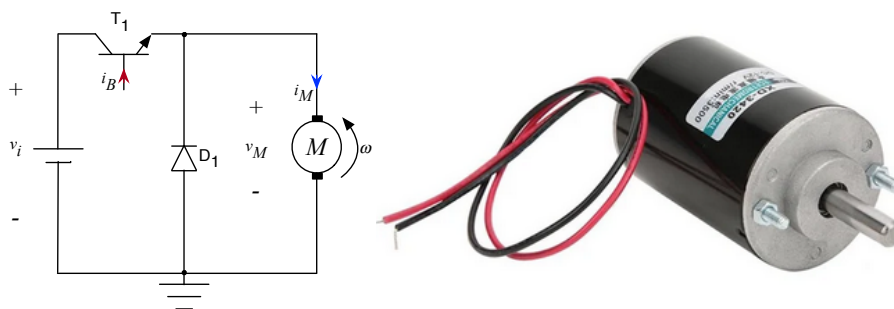


Figura 32 – Circuito para acionamento de motor de corrente contínua com transistor.

Fonte: <https://www.americanas.com.br>. Acesso em 22/07/2021.

A partir dos dados fornecidos, pode-se calcular a corrente elétrica do motor:

$$V_M = 24V$$

$$P_M = 30W$$

$$I_M = \frac{P_M}{V_M} = \frac{30}{24} = 1,25A$$

A partir deste valor de corrente obtido e da tensão de operação, pode-se escolher como tecnologia de transistores os modelos baseados em transistores bipolares de junção (BJT). Deve-se levar em conta que a corrente de base do transistor será fornecida pelo microcontrolador contido

na placa Arduino. Assim, levando em conta que a corrente nos terminais de entrada e saída de um microcontrolador Atmega328P é de 40 mA no máximo, será interessante escolher transistores com alto ganho para simplificar o circuito de acionamento do transistor de potência T₁.

Assim, o ganho do transistor, para acionamento direto pelo Arduino, deve ser:

$$\beta \geq \frac{I_C}{I_B} = \frac{I_M}{I_{\mu C}} = \frac{1,25}{40m} = 31,25$$

A corrente de coletor do transistor foi considerada igual a do motor, para velocidade máxima de rotação, com o interruptor conduzindo o tempo todo (PWM → 100%) e o diodo não conduzindo.

Portanto, poderia se utilizar transistores do tipo BD135; no entanto, o ganho destes varia de 25 a 250, podendo ficar abaixo do valor calculado. Deste modo, serão escolhidos transistores de alto ganho (Darlington) da série TIP120, que tem as seguintes especificações:

- Tensão de operação – 60 V;
- Corrente de operação – 5 A;
- Ganho – 1000;
- Tensão de coletor-emissor de saturação – 2 V;
- Temperatura máxima – 150 °C;
- Resistência térmica entre junção e cápsula – 1,92 °C/W;
- Resistência térmica entre junção e ambiente – 62,5 °C/W.

O resistor de base do transistor pode ser calculado por:

$$R_B = \frac{V_{\mu C} - V_{BE}}{I_B} = \frac{5 - 0,7}{40m} = 107,5\Omega$$

$$R_B = 1k\Omega \rightarrow I_B = \frac{5 - 0,7}{1K} = 4,3mA$$

Escolheu-se um resistor de 1 kΩ para ter uma corrente de base da ordem de 5 mA.

O circuito redesenhado para permitir o acionamento direto do transistor de potência a partir do Arduino é mostrado na Figura 33. Os detalhes do circuito envolvendo o Arduino e sua alimentação não são mostrados na figura, por não serem foco de estudo neste momento.

O diodo escolhido pode ser da série FR151, que tem as seguintes características:

- Tensão de operação – 50 V;

- Corrente de operação – 1,5 A;
- Tensão direta – 1,3 V;
- Temperatura máxima – 150 °C;
- Resistência térmica aproximada entre junção e ambiente – 60 °C/W.

A potência dissipada no transistor, durante sua condução, será:

$$P_{T1} = V_{CE(sat)} \cdot I_C = 2 \cdot 1,25 = 2,5W$$

Assim, a temperatura na junção do transistor, considerando uma temperatura ambiente de 35 °C, será:

$$T_{j_T1} = T_a + R_{ja_T1} \cdot P_{T1} = 35 + 62,5 \cdot 2,5 = 191,5^\circ C$$

Neste caso, como a temperatura na junção calculada é maior do que a temperatura que o transistor suporta, deve-se calcular um dissipador, que será:

$$R_{ja_T1} = \frac{T_{j_T1} - T_a}{P_{T1}} = \frac{150 - 35}{2,5} = 46^\circ C / W$$

Assim, a resistência térmica do dissipador será:

$$R_{da_T1} = R_{ja_T1} - R_{jc_T1} - R_{cd_T1} = 46 - 1,92 - 1 = 43,08^\circ C / W$$

A partir deste valor pode ser escolhido um dissipador comercial, como por exemplo o modelo HS0820 (<https://www.hsdissipadores.com.br>) que tem resistência térmica de 17 °C/W para 10 cm de altura. Alterando a altura para 2 cm se terá uma resistência térmica da ordem de $17 \times 2,21 = 37,57^\circ C/W$, que é menor do que o valor calculado, e, portanto, pode ser utilizado este modelo de dissipador especificado.

Para o diodo D₁ se terá como perdas de condução:

$$P_{D1} = V_{D1} \cdot I_{D1} = 1,3 \cdot 1,25 = 1,625W$$

Neste caso se considerou que o interruptor seria aberto e toda a corrente do motor iria circular pelo diodo, até a desmagnetização e parada completa do motor.

A temperatura na junção do diodo será:

$$T_{j_D1} = T_a + R_{ja_D1} \cdot P_{D1} = 35 + 60 \cdot 1,625 = 132,5^\circ C$$

Neste caso, como a temperatura calculada para a junção é menor do que a temperatura máxima suportada pelo componente, não será necessário utilizar dissipador.

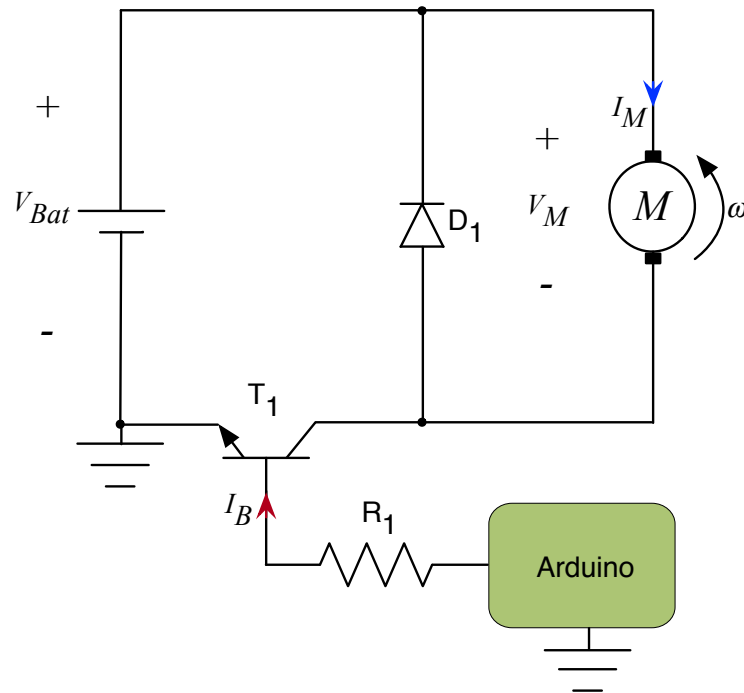


Figura 33 – Circuito proposto para acionamento do motor de corrente contínua.

Exemplo 2:

Considere o circuito da Figura 34 para fazer o acionamento do motor de corrente contínua a partir de uma bateria de 24 V, utilizando como circuito de comando e controle o kit de desenvolvimento baseado em Arduino. Os dados do motor da Figura 34 são:

- Tensão de operação – 24 V;
- Potência nominal – 500 W;
- Velocidade – 3000 RPM.

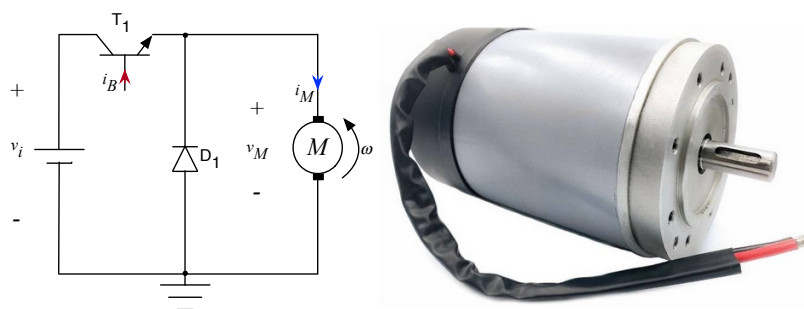


Figura 34 – Circuito para acionamento de motor de corrente contínua com transistor.

Fonte: <https://www.mercadolivre.com.br>. Acesso em 22/07/2021.

A corrente no motor será:

$$V_M = 24V$$

$$P_M = 500W$$

$$I_M = \frac{P_M}{V_M} = \frac{500}{24} = 20,8A$$

Neste caso, em virtude da alta corrente do motor, é mais interessante utilizar como tecnologia para o transistor de potência semicondutores do tipo MOSFET. Pode-se escolher o modelo IRF540, que tem as seguintes características:

- Tensão de operação – 100 V;
- Corrente de operação – 20 A para $T_c = 25\text{ °C}$ e 28 A para $T_c = 100\text{ °C}$;
- Resistência entre dreno e fonte – 77 m Ω ;
- Tensão máxima entre gatilho e fonte – 20 V;
- Temperatura máxima – 175 °C;
- Resistência térmica entre junção e cápsula – 1 °C/W;
- Resistência térmica entre junção e ambiente – 62 °C/W.

Para o diodo pode-se escolher um componente único ou dois diodos em paralelo. Escolhendo o modelo MUR1510, para se utilizar dois diodos em paralelo, se teria:

- Tensão de operação – 100 V;
- Corrente de operação – 15 A;
- Tensão direta – 1,05 V;
- Temperatura máxima – 175 °C;
- Resistência térmica entre junção e cápsula – 1,5 °C/W;
- Resistência térmica entre junção e ambiente – 73 °C/W.

O circuito para acionamento do transistor MOSFET se torna mais complexo, pois sua tensão entre gatilho e fonte deve ser da ordem de 15 V, pois 20 V é a tensão máxima suportada pelo componente.

Assim, será necessário providenciar uma fonte auxiliar para este circuito, além da amplificação de corrente para se conectar os terminais do Arduino ao circuito do MOSFET. Um possível circuito para prover as funcionalidades necessárias é mostrado na Figura 35 onde se tem uma fonte auxiliar a partir de um regulador linear LM7815.

Os capacitores de filtro (C_1 e C_2) junto ao regulador linear podem eletrolíticos de 100 μF x

50 V, por exemplo, não sendo valores críticos. Os resistores de base dos transistores do circuito de acionamento do interruptor de potência, R_1 , R_3 e R_5 podem ser de 10 k Ω , enquanto os resistores de coletor, R_2 e R_4 , podem ser de 1 k Ω . Os transistores NPN, T_2 , T_3 e T_4 podem ser BC338, enquanto o transistor PNP, T_5 , pode ser BC328.

A corrente de coletor dos transistores BC338 e BC328 é de 800 mA. Assim, o resistor de acionamento (gatilho) do MOSFET de potência pode ser calculado por:

$$R_G = \frac{V_{aux}}{I_C} = \frac{15}{0,8} = 18,75\Omega$$

Pode-se utilizar um resistor de 22 Ω por ½ W, neste caso.

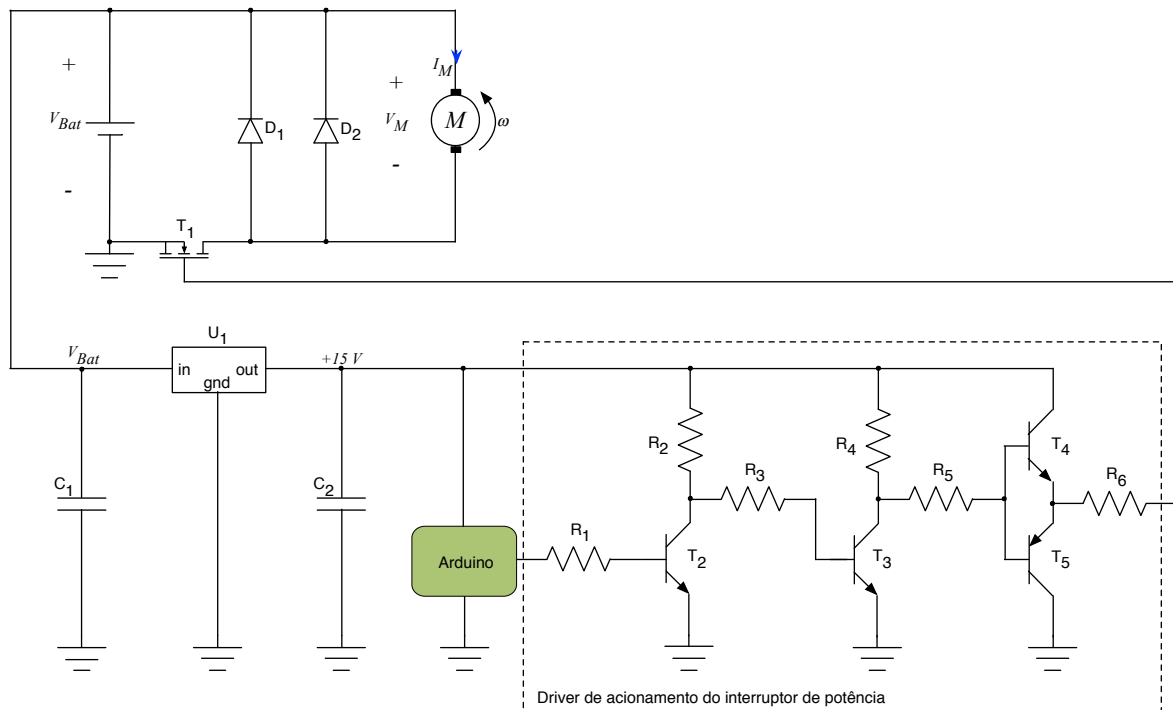


Figura 35 – Circuito proposto para acionamento do motor de corrente contínua.

A potência dissipada no MOSFET, durante sua condução será:

$$P_{T1} = R_{DS(on)} \cdot I_D^2 = 77m \cdot 20,8^2 = 33,3W$$

Note que a potência dissipada no interruptor de potência é significativa. A temperatura na junção do MOSFET, considerando que a temperatura ambiente seja da ordem de 35 °C, será:

$$T_{j_T1} = T_a + R_{ja_T1} \cdot P_{T1} = 35 + 62 \cdot 33,3 \approx 2100^\circ C$$

Assim, será necessário utilizar dissipador, que será:

$$R_{ja_T1} = \frac{T_{j_T1} - T_a}{P_{T1}} = \frac{175 - 35}{33,3} = 4,2^\circ C / W$$

$$R_{da_T1} = R_{ja_T1} - R_{jc_T1} - R_{cd_T1} = 4,2 - 1 - 1 = 2,2^\circ C / W$$

O dissipador poderá ser, por exemplo, o modelo HS5620 (mostrado na Figura 36), com altura da ordem de 20 cm. Neste caso em específico, se poderia buscar outro MOSFET com resistência entre gatilho e fonte menor, para se ter uma perda menor, ou então utilizar, em conjunto com o dissipador, ventilação forçada por meio de ventiladores.

Para os diodos D_1 e D_2 , as perdas serão:

$$P_{D1} = P_{D2} = V_{D1} \cdot I_{D1} = 1,3 \cdot \frac{20,8}{2} = 13,52W$$

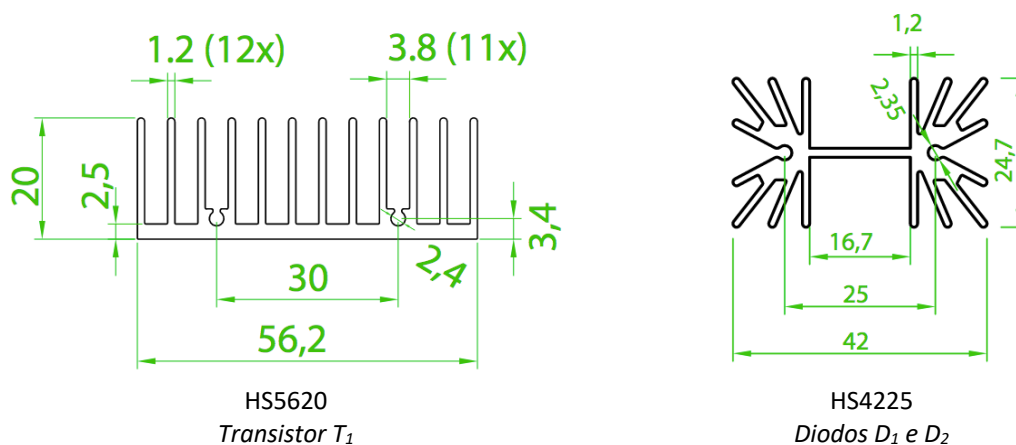
Assim, a temperatura na junção será:

$$T_{j_D1} = T_{j_D2} = T_a + R_{ja_D1} \cdot P_{D1} = 35 + 73 \cdot 13,52 \approx 1022^\circ C$$

Verifica-se que é necessário utilizar dissipador, que poderá ser único para os dois diodos:

$$R_{ja_D1_D2} = \frac{T_{j_D1} - T_a}{P_{D1} + P_{D2}} = \frac{175 - 35}{2 \cdot 13,52} = 5,18^\circ C / W$$

Pode-se utilizar o dissipador HS4225 que tem resistência térmica de $4,38^\circ C/W$ com 10 cm de altura, mostrado na Figura 36.



HS5620

Transistor T_1

HS4225

Diodos D_1 e D_2

Figura 36 – Dissipadores para os semicondutores de potência.

Fonte: <https://www.hsdissipadores.com.br>. Acesso em 22/07/2021.

5 Exercícios

Exercícios Resolvidos

ER 01. Em termos de acionamentos eletrônicos, qual a principal vantagem do motor de corrente contínua?

A principal vantagem do motor de corrente contínua é permitir a variação de sua velocidade ao se alterar a tensão de alimentação do mesmo.

ER 02. Quais os quadrantes de operação de um motor de corrente contínua?

O motor de corrente contínua pode operar em quatro quadrantes de operação, dois deles como motor e dois como gerador, em ambos os sentidos de rotação.

ER 03. Cite características dos circuitos de acionamento de motores que utilizam chaves eletromecânicas.

Os circuitos de acionamento de motores com chaves eletromecânicas são simples, robustos e fáceis de implementar; no entanto, não permitem variar a velocidade do motor.

ER 04. O que significa regeneração de energia?

Regenerar energia significa utilizar a capacidade do motor elétrico de operar como gerador, para devolver energia ao circuito de alimentação (baterias) em determinadas condições de funcionamento, por exemplo em descidas, no caso de veículos elétricos.

ER 05. Qual conversor utilizado para acionamento de motores elétricos permite a operação em quatro quadrantes?

O conversor ponte completa, também chamado de ponte H.

Exercícios Propostos

EP 01. A operação como motor e gerador, em apenas um sentido de rotação, é caracterizada como operação em quantos quadrantes?

EP 02. Quais tecnologias de semicondutores são utilizadas para acionamento de motores?

EP 03. Comente sobre características do conversor ponte completa.

EP 04. Que elementos de proteção podem ser utilizados nos circuitos de acionamento?

EP 05. Comente sobre o uso de relés para acionamento de motores.

6 Atividade Avaliativa

6.1 Introdução – O que preciso saber

Ao final deste objetivo de aprendizagem são apresentadas cinco questões, que devem ser respondidas sem consultar o material. Se você conseguir responder as questões e conferir as respostas com o gabarito abaixo, parabéns, você concluiu com êxito este tópico. Caso tenha errado alguma questão, revise o conteúdo relacionado com a mesma e refaça a questão, procurando se concentrar mais desta vez, para acertar o exercício e fixar bem o conteúdo.

AA 01. Qual a finalidade do diodo de roda-livre nos circuitos de acionamento de motores?

AA 02. Para controlar a velocidade do motor de corrente contínua utilizando modulação por largura de pulsos (PWM), deve-se utilizar quais componentes principais no circuito de acionamento?

AA 03. Cite um exemplo de circuito integrado utilizado para acionamento de motores.

AA 04. O que significa realizar o cálculo térmico ao se projetar o circuito de acionamento?

AA 05. Comente sobre as perdas nos componentes semicondutores em circuitos de acionamento.

AA 01. O diodo de roda-livre nos circuitos de acionamento tem a finalidade de oferecer um caminho para a circulação da corrente elétrica do motor, ao se abrir o interruptor principal. AA 02. Para aplicar modulação por largura de pulsos (PWM) deve-se utilizar transistores, que podem ser com tecnologia BJT, MOSFET ou IGBT, por exemplo. AA 03. O circuito integrado L293 é muito utilizado para acionamento de motores. AA 04. Realizar o cálculo térmico em componentes eletrônicos significa determinar as perdas nos mesmos, a seguir verificar a temperatura na junção e se necessário, calcular o dissipador adequado para aquele caso em específico. AA 05. As perdas nos transistores e diodos, utilizados em circuitos de acionamento de motores, aumentam consideravelmente quando a potência do motor é alta, podendo atingir valores de algumas dezenas de Watts, implicando no uso de dissipadores de calor e ventilação forçada em alguns casos.



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA

DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA

CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM ELETRÔNICA INDUSTRIAL

Acionamentos Eletrônicos



GUIA DE ESTUDO

- OBJETIVO DE APRENDIZAGEM - MOTORES DE PASSO

MOTORES DE PASSO

Objetivo de Aprendizagem

Estudar motores de passo.

Objetivos parciais

- Conhecer os princípios de funcionamento dos motores de passo;
- Conhecer os principais tipos de motores de passo;
- Conhecer as aplicações dos motores de passo;
- Entender o funcionamento dos circuitos de acionamento dos motores de passo.

Aulas relacionadas

Este objetivo de aprendizagem está relacionado com a aula 09 da disciplina.

Pré-requisitos

Ter estudado o objetivo de aprendizagem 08 relacionado ao acionamento dos motores de corrente contínua.

Continuidade dos Estudos

O próximo objetivo de aprendizagem será o estudo dos motores sem escovas.

Roteiro para estudos

Os estudos referentes a este objetivo de aprendizagem consistem em:

1. Estudar este documento resumo, realizando as atividades propostas no mesmo;
2. Responder o quiz relacionado a este objetivo de aprendizagem;
3. Caso perceba necessidade, estudar a apresentação deste assunto ou consultar os livros texto indicados para esta disciplina;
4. Realizar os exercícios deste tópico da matéria;
5. Realizar a avaliação final para progredir ao próximo conteúdo.

Referências

- Material disponibilizado para a disciplina de Acionamentos Eletrônicos – 2021/1.
Departamento Acadêmico de Eletrônica, Instituto Federal de Santa Catarina, Campus Florianópolis.

Check-list

Caro estudante, verifique se você completou as atividades deste objetivo de aprendizagem e obteve êxito para continuar seus estudos.

Assinale as atividades realizadas:

Estudo do documento resumo:

- Leitura do documento resumo;
- Exercícios do documento resumo;
- Atividade avaliativa do documento resumo.
- Obtive êxito e entendi o conteúdo deste documento;
- Ainda não entendi bem o conteúdo e estudarei o mesmo com mais profundidade.

Estou com dúvidas, irei estudar com mais detalhes este conteúdo:

- Assistir a apresentação relacionada ao conteúdo (apresentação 09);
- Ler este guia de estudo (objetivo de aprendizagem 09).

Ainda estou com dúvidas:

- Entrarei em contato com o professor.

Obtive êxito, então seguirei em frente:

- Responder ao quiz deste conteúdo no Moodle;
- Informar ao professor que estou avançando com o conteúdo.

Parabéns, continue estudando com afinco e vamos em frente!!

CONTEÚDO

- OBJETIVO DE APRENDIZAGEM - MOTORES DE PASSO

1 Introdução

Os capítulos anteriores foram dedicados ao estudo e acionamento dos motores de corrente contínua, onde se estudaram os tipos, funcionamento, aplicações e circuitos para acionamento destas máquinas de corrente contínua.

Este capítulo terá como objetivo principal o estudo dos motores de passo e seu acionamento.

1.1 Conteúdo – O que irei estudar

Estudaremos neste tópico:

- Princípio de funcionamento dos motores de passo;
- Principais tipos de motores de passo;
- Aplicações dos motores de passo;
- Acionamento de motores de passo.

1.2 Metodologia – O que devo fazer e como fazer

Leia com atenção o conteúdo a seguir. Ao final deste tópico são apresentados exercícios resolvidos. Após são apresentados alguns exercícios propostos.

Ao realizar estas atividades e se sentir confiante para progredir, siga os passos indicados na primeira página deste documento.

Espera-se que após estudar este assunto, você consiga:

- Descrever o funcionamento de um motor de passo;
- Citar os principais tipos de motores de passo;
- Comentar sobre algumas aplicações dos motores de passo;
- Descrever o funcionamento de circuitos de acionamento de motores de passo.

A atividade avaliativa deste objetivo de aprendizagem consistirá em perguntar ao estudante para descrever o funcionamento de um circuito de acionamento de um motor de corrente contínua, por exemplo.

Exemplo de atividade avaliativa:

1. Explicar com suas palavras o funcionamento de um motor de passo.
2. Citar aplicações dos motores de passo.
3. Comentar os tipos de motores de passo;
4. Explicar o funcionamento de circuitos de acionamento de motores de passo;
5. Citar características de motores de passo.

2 Princípio de Funcionamento dos Motores de Passo

2.1 Introdução

Os motores elétricos de corrente contínua podem ser de diferentes tipos, conforme estudado nos capítulos anteriores, tendo-se, dentre eles, os motores de passo.

Este capítulo irá apresentar o princípio de funcionamento dos motores de passo e sua classificação, para na sequência se apresentar os tipos e os circuitos de acionamento dos mesmos.

2.2 Definição de motor elétrico de passo

O motor elétrico de passo é uma máquina elétrica rotativa de corrente contínua, que converte energia elétrica em movimento.

A principal diferença dos motores de passo para os motores de corrente contínua é o controle preciso da rotação e dos deslocamentos do eixo do motor, permitindo variações angulares discretas e conhecidas.

Assim, os motores de passo são utilizados quando se necessita realizar deslocamentos precisos, como por exemplo em impressoras, braços robóticos, mesas digitalizadoras, dentre outras aplicações.

Importante destacar também que no caso dos motores de passo se tem alto torque sem rotação, ou seja, com o rotor parado, o que permite ao mesmo manter a posição pré-estabelecida sem movimento no seu eixo. Além disso, ao usar motores de passo não se tem por objetivo movimentar cargas indefinidamente, como em veículos elétricos, mas sim, deslocar estas cargas por distâncias bem definidas.

2.3 Símbolo do motor de passo

O símbolo do motor de passo é semelhante ao motor de corrente contínua, como mostrado na Figura 1, podendo se ter variações ou até mesmo representar o motor pelo esquema de ligação de suas bobinas, como será visto posteriormente.

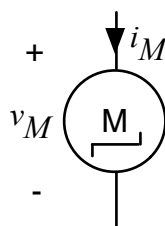


Figura 1 – Símbolo do motor de passo.

2.4 Princípio de funcionamento do motor de passo

O princípio de funcionamento do motor de passo, do mesmo modo que os motores de corrente contínua, se deve ao surgimento de uma força quando uma espira ou bobina estiver imersa em um campo magnético, devido à Força de Lorentz.

A Figura 2 mostra o estator (parte fixa) e o rotor (parte móvel) do motor de passo representados por ímãs permanentes, para simplificar a explicação do princípio de funcionamento do mesmo. Os eletroímãs do estator serão acionados sequencialmente, com posições conforme os ponteiros de um relógio, iniciando por 12 horas, passando por 15 horas, 18 horas e retornando à posição inicial. O ímã permanente que representa o rotor poderá girar livremente em seu eixo de rotação.

As posições que o rotor irá ocupar conforme o acionamento dos eletroímãs do estator são descritas como:

- Posição inicial – A posição inicial mostrada na Figura 3 apresenta o polo sul do rotor posicionado em frente ao polo norte do ímã permanente do estator, na posição 12 horas. Neste caso, apenas o eletroímã da posição 12 horas está acionado;
- Primeiro passo – A partir da posição inicial, o eletroímã da posição 12 horas é desligado, acionando-se o eletroímã da posição 15 horas, conforme mostra a figura. Neste caso o rotor irá girar por um ângulo de 90° no sentido horário, parando em frente ao eletroímã da posição 15 horas;
- Segundo passo – O eletroímã da posição 15 horas será desligado, acionando-se o eletroímã da posição 18 horas, fazendo com que o rotor gire por mais 90° no sentido horário, conforme mostrado na Figura 4;
- Terceiro passo – A partir do desligamento do eletroímã da posição 15 horas e de novo acionamento do eletroímã da posição 12 horas, se tem o rotor girando novamente por 90° no sentido horário, voltando à posição inicial.

A partir das Figura 3 e Figura 4 pode-se perceber que o acionamento dos eletroímãs do estator ocorreu sequencialmente, conforme se desejava que o rotor girasse, a cada passo em 90° , até completar uma volta completa ao se executarem os quatro passos descritos.

Ao manter o acionamento de determinado eletroímã, se fará com que o rotor permaneça parado em frente a posição deste elemento, permitindo a manutenção da posição desejada.

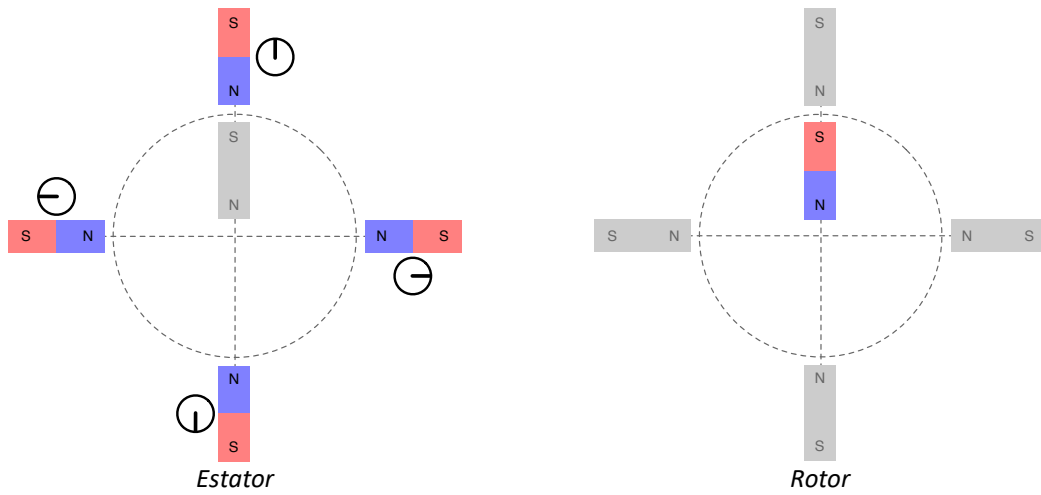


Figura 2 – Esquema simplificado para estudar o funcionamento do motor de passo.

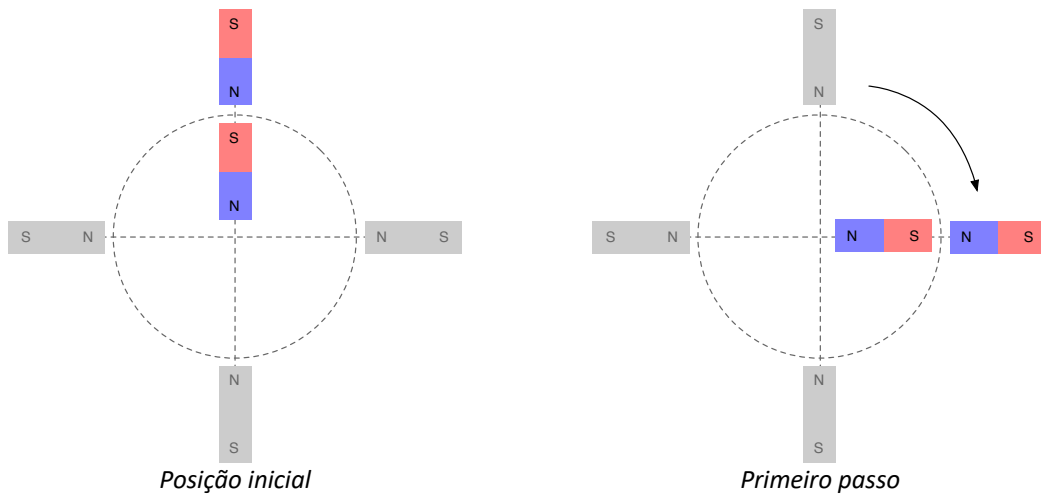


Figura 3 – Princípio de funcionamento do motor de passo.

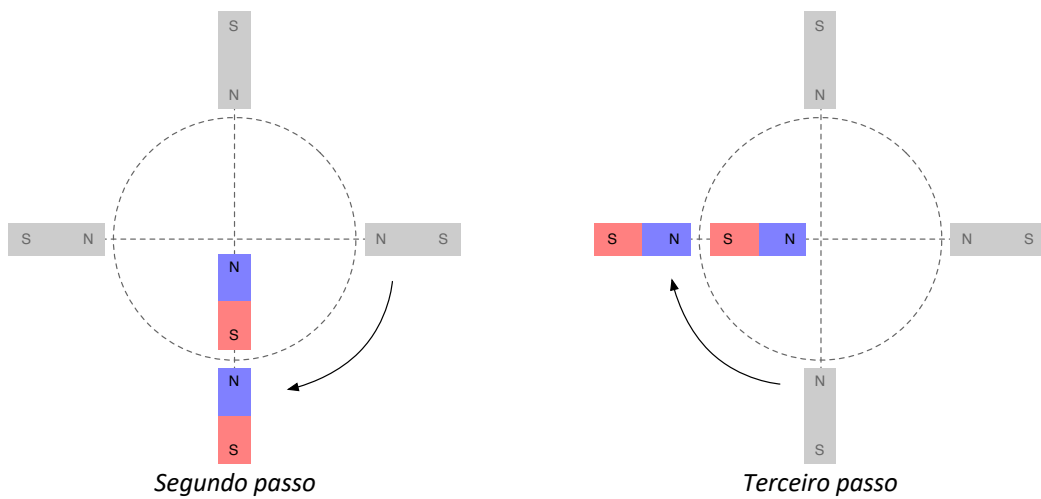


Figura 4 – Princípio de funcionamento do motor de passo.

O princípio de funcionamento descrito a partir de um esquema que representa o motor de passo de maneira mais próxima de sua construção final é apresentado na Figura 5¹. Neste caso, o posicionamento do rotor se dá pelo alinhamento dos dentes da parte móvel com a parte fixa, isto é, as linhas de campo magnético criadas nas bobinas do estator percorrem o material ferromagnético do rotor, fazendo que apareça uma força no sentido de diminuir a relutância do caminho magnético. Assim, os dentes do eletroímã do estator atraem os dentes do material ferromagnético do rotor, no qual ocorre a indução de um campo magnético em oposição ao campo do estator, conforme se estudou nos capítulos anteriores, pelas Leis de Faraday e Lenz.

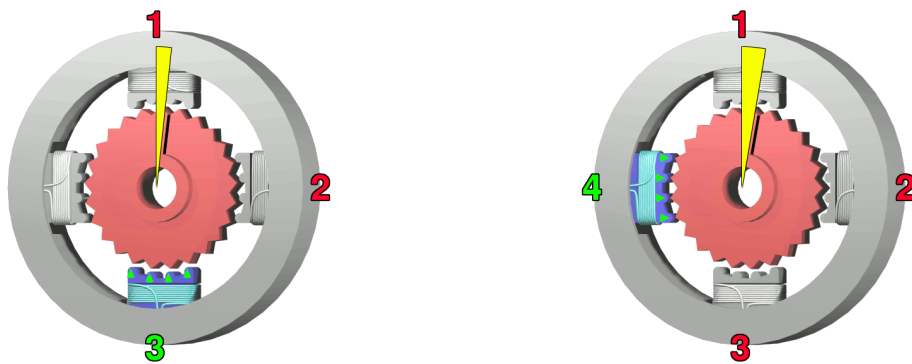
As Figura 5 e Figura 6 mostram os quatro passos para o acionamento das quatro bobinas do estator, provocando o giro do rotor, neste caso, por ângulos dados pela distância entre os dentes do mesmo, que são de 3,6° neste exemplo.



Passo 0

Passo 1

Figura 5 – Princípio de funcionamento do motor de passo.



Passo 3

Passo 4

Figura 6 – Princípio de funcionamento do motor de passo.

¹ Wikipédia. Motor de Passo. Disponível em https://pt.wikipedia.org/wiki/Motor_de_passo. Acessado em 28/07/2021.

O rotor apresentado nas figuras apresenta 25 dentes, com uma distância angular entre os mesmos de 3,6°. Assim, são necessários 100 passos para se percorrer uma volta completa (360°). Em geral, os motores de passo podem ter entre 3 a 72 passos para completar uma volta inteira.

2.5 Principais aplicações dos motores de passo

As principais aplicações dos motores de passo são em impressoras, máquinas de controle numérico (CNC), bombas volumétricas, robótica, câmeras de vídeo, brinquedos, automação industrial, mesas digitalizadoras, fresadoras, injeção eletrônica de automóveis, dentre outras.

A Figura 7 apresenta algumas aplicações de motores de passo, com o aspecto característico do motor aplicado em cada caso.

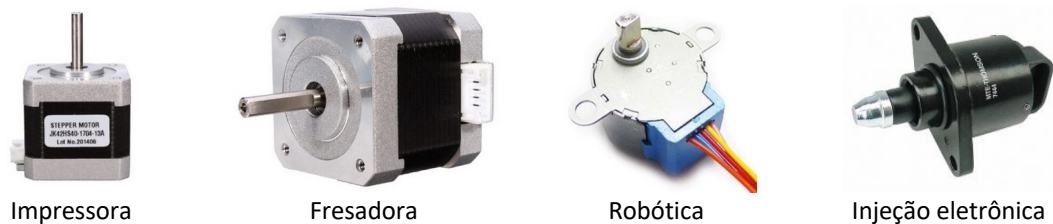


Figura 7 – Exemplos de motores de passo.

Fonte: <https://www.filipeflop.com/> e <https://www.americanas.com.br>. Acesso em 08/07/2021.

2.6 Principais características dos motores de passo

As principais características dos motores de passo estão relacionadas com a precisão dos deslocamentos permitidos em seu eixo, além do torque com o rotor parado. A Tabela 1 apresenta um comparativo levando em conta as principais características para os motores de corrente contínua, motores de passo e servomotores, onde se pode notar que conforme a aplicação se deve escolher o tipo de motor específico, em virtude justamente de seus aspectos funcionais.

Em termos de vantagens em relação aos motores de corrente contínua se tem²:

- Operam por lógica digital – São acionados por pulsos aplicados sequencialmente nas bobinas do motor;
- Posicionamento em alta precisão – Em geral tem erro de posicionamento menor do que 5%;
- Torque estável – Os motores de passo possuem torque com pouca variação;
- Resposta rápida – São motores que possuem excelente resposta para aceleração e desaceleração.

² BRITES, Felipe G. e SANTOS, Vinicius P. de A. Motor de Passo. Universidade Federal Fluminense, 2008. Disponível em <https://www.telecom.uff.br/pet/>. Acessado em 28/07/2021.

Por sua vez, também possuem desvantagens, que são:

- Baixo desempenho em altas velocidades – Aumentando a velocidade de acionamento das bobinas do motor de passo incorre em aumento na velocidade do rotor, mas com perda significativa de desempenho;
- Acionamento complexo – O circuito de acionamento e a lógica empregada devem ser compatíveis com o motor utilizado, sendo mais complexas dos que os circuitos de acionamento dos motores de corrente contínua;
- Ressonância e perda de passos – Em virtude da frequência natural de ressonância da estrutura física do motor, em ocorrendo coincidência entre esta e a frequência de acionamento e seus múltiplos e submúltiplos, podem ocorrer vibrações e rotações incorretas, conhecidas como perda de passos.

Tabela 1 – Comparativo do motor de passo em relação a outros motores.

Característica	Motor de corrente contínua	Motor de passo	Servomotor
Velocidade	Alta	Baixa	Média
Torque rotacional	Alto	Médio	Alto
Torque estacionário	Ausente	Alto	Baixo
Controle	Fácil	Complexo	Complexo
Precisão rotacional	Ausente	Alta	Muito alta
Durabilidade	Média	Alta	Média
Manutenção	Requer	Não requer	Requer

Fonte: Adaptado de (Brites e Santos, 2008).

3 Tipos de Motores de Passo

3.1 Introdução

Os motores de passo podem ser classificados, em termos de construção, em três tipos, que são: motores de relutância variável, motores de imã permanente e motores híbridos.

Em termos de conexões e acionamento podem ser classificados em unipolares e bipolares, que serão abordados no próximo capítulo quando serão estudados os circuitos elétricos e conexões dos motores de passo.

Este capítulo apresentará os motores em termos de construção, descrevendo-se brevemente seu funcionamento e aspectos característicos.

3.2 Partes do motor de passo

As principais partes de um motor de passo são mostradas na Figura 8, onde se podem notar as partes fixas no estator e as partes móveis no rotor. Neste exemplo o rotor é do tipo

relutância variável, que será descrito na sequência deste capítulo.

Observe pela Figura 8 que o motor de passo não possui rotor bobinado, por isso dispensa o uso de escovas e do coletor, diminuindo a manutenção e reduzindo o custo de fabricação, em comparação com os motores de corrente contínua estudados no capítulo anterior deste curso.

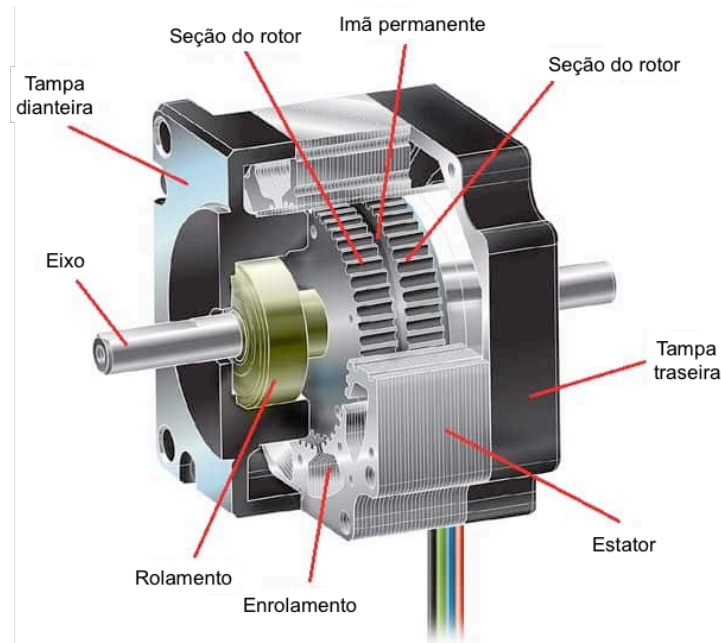


Figura 8 – Partes de um motor de passo.

Fonte: <https://islproducts.com>. Acesso em 28/07/2021.

3.3 Motores de passo de relutância variável

O motor de passo de relutância variável, conforme mostrado na Figura 9, é formado pelo estator contendo os enrolamentos (bobinas) em número de pares, formando os polos do estator, e o rotor de material ferromagnético (ferro, por exemplo), com múltiplos dentes, que serão atraídos pelos eletroímãs formados no estator.

Os enrolamentos A e A' mostrados na Figura 9 foram um par de polos, onde se verifica que o rotor estará alinhado com os mesmos, conforme estas estiverem sendo acionadas, isto é, o circuito aplicar corrente elétrica nestas bobinas. Assim, ao ocorrer o alinhamento dos dentes do rotor com os polos formados pelo estator, tem-se a menor relutância, que será a posição de repouso do rotor, caso não se altere a alimentação dos enrolamentos do estator.

Ao alimentar o conjunto de enrolamentos B e B', o rotor irá girar, para que ocorra o alinhamento entre os dentes do mesmo e os polos formados pelo estator, encontrando-se um novo ponto de equilíbrio (menor relutância) para o circuito.

Em virtude de não se ter um campo magnético permanente, como é o caso do motor de ímãs permanentes, o torque resultante será menor, em relação àquele motor.

O princípio de funcionamento do motor de ímã permanente é semelhante ao descrito anteriormente, considerando as Figura 3 e Figura 4, ocorrendo o alinhamento do campo magnético gerado nos enrolamentos do estator (conjuntos A e A', B e B') e os polos presentes no rotor, conforme mostrado na Figura 12.

O aumento da resolução do motor de passo de ímã permanente pode ser conseguido pelo aumento do número de polos do estator e do rotor, conforme mostrado na Figura 13.

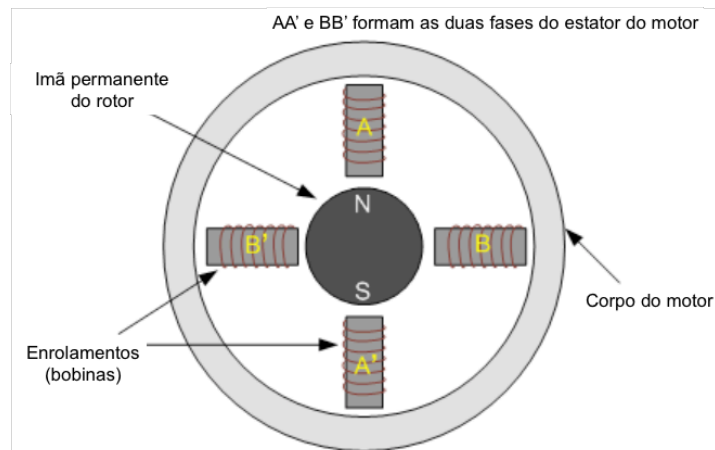


Figura 11 – Motor de passo de ímã permanente.

Fonte: <https://www.feis.unesp.br> e <https://www.engineersgarage.com>. Acesso em 28/07/2021.

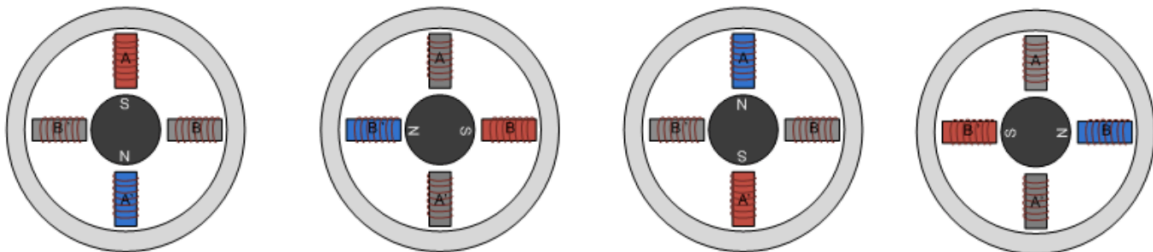


Figura 12 – Funcionamento do motor de passo de ímã permanente.

Fonte: <https://www.engineersgarage.com>. Acesso em 28/07/2021.

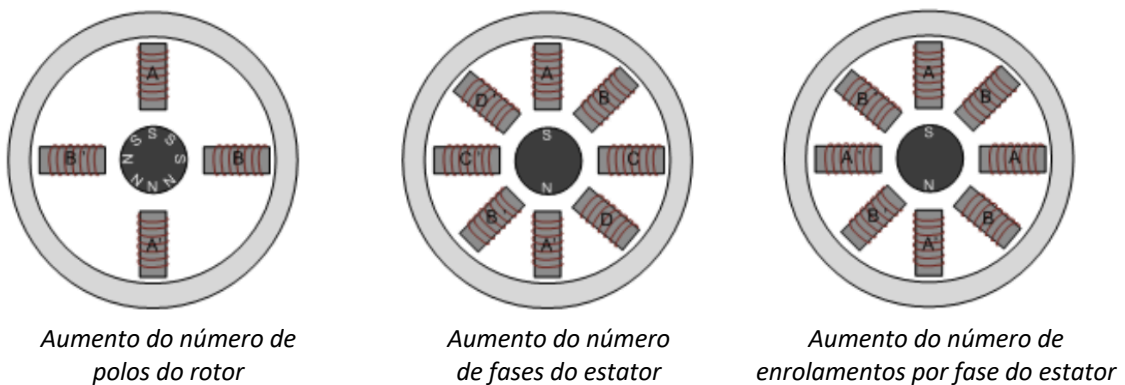


Figura 13 – Incremento na resolução do motor de ímã permanente.

Fonte: <https://www.engineersgarage.com>. Acesso em 28/07/2021.

3.5 Motores de passo híbrido

Os motores de passo híbridos são uma combinação dos motores de passo de relutância variável com os motores de passo de ímã permanente, combinando características dos dois modelos. Estes motores são mais caros e mais complexos de serem construídos, mas em contrapartida, apresentam boa resolução, torque e velocidade, tendo ângulos de rotação entre $3,6^\circ$ a $0,9^\circ$ (100 a 400 passos por volta completa).

O estator do motor de passo híbrido é semelhante aos estatores dos motores de passo de ímã permanente e de relutância variável. Por sua vez, o rotor possui dentes, como aquele do motor de ímã permanente, e um ímã permanente, como aquele do motor de ímã permanente.

A estrutura de montagem do eixo de um motor de passo híbrido é mostrada na Figura 15 onde se nota a presença dos dentes de material ferromagnético e do ímã permanente, originando a alternância entre os polos norte e sul.

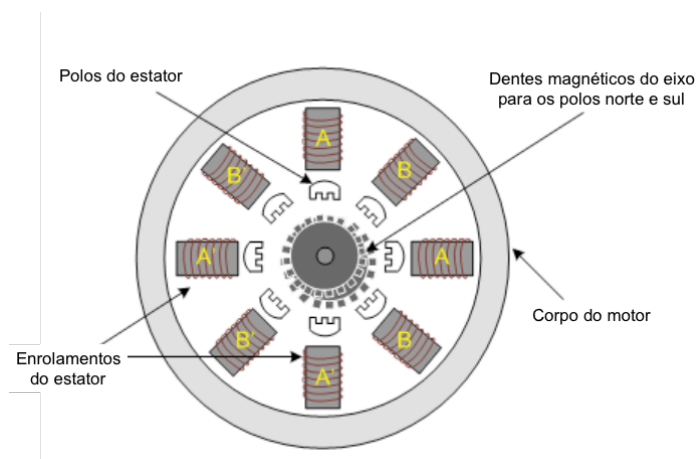


Figura 14 – Motor de passo híbrido.

Fonte: <https://www.feis.unesp.br> e <https://www.engineersgarage.com>. Acesso em 28/07/2021.

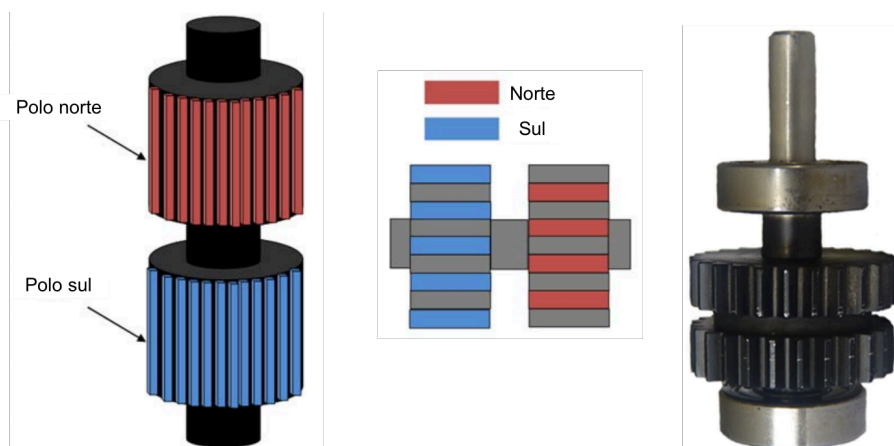


Figura 15 – Eixo do motor de passo híbrido.

Fonte: <https://www.feis.unesp.br> e <https://www.engineersgarage.com>. Acesso em 28/07/2021.

4 Conexões dos Motores de Passo

4.1 Introdução

A seguir serão apresentados aspectos importantes relacionados com o circuito elétrico e as conexões dos motores de passo, diferenciando-se os mesmos conforme o número de fases e forma de conexão dos polos dos mesmos.

4.2 Fases dos motores de passo

A bobina ou enrolamento do estator do motor de passo permite originar um polo magnético, que estará posicionado de frente para o rotor. Assim, conforme o número de enrolamentos se tiver, se terá um correspondente número de polos.

Em geral, para proporcionar maior torque ao motor, os enrolamentos são posicionados mecanicamente no estator com simetria de 180° , gerando polos contrários para cada um. Assim, considerando a Figura 16, se tem um motor com quatro enrolamentos, gerando quatro polos simultaneamente. Como dito, em geral os enrolamentos montados mecanicamente com simetria de 180° são conectados em conjunto, formando um único enrolamento, denominado de fase do motor de passo.

Assim, na Figura 16, a fase A é formada pelos enrolamentos 1 e 3, com seu polo simétrico identificado por A', enquanto a fase B é formada pelos enrolamentos 2 e 4, tendo como polo simétrico B'.

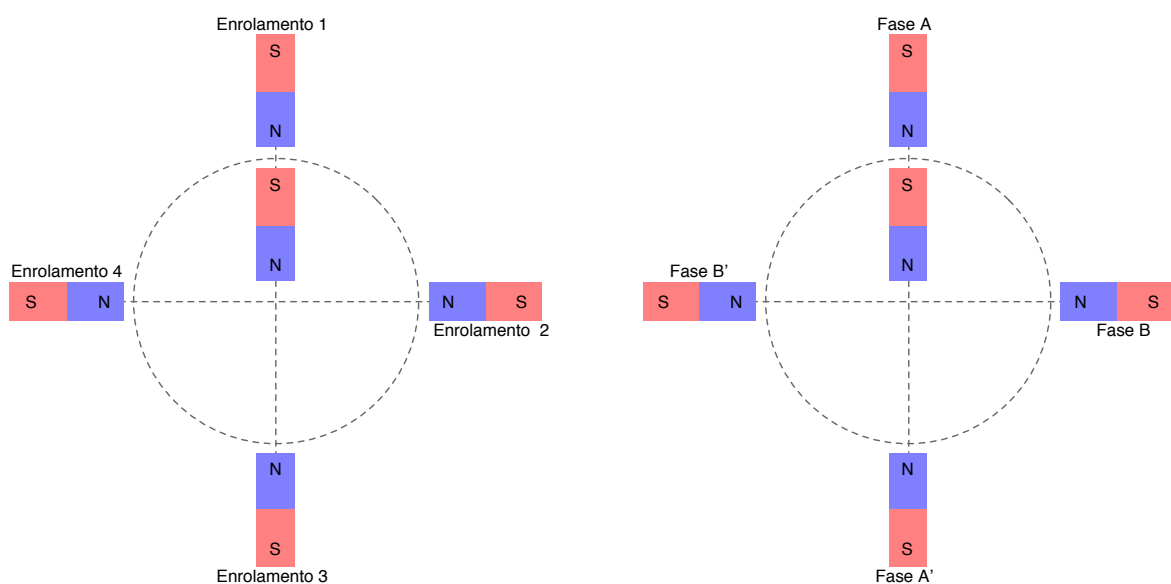


Figura 16 – Enrolamentos e polos do motor de passo.

A Figura 17 mostra as imagens de motores de passo de relutância variável com duas e cinco fases. O motor de 2 fases possui 8 polos magnéticos no estator, ou seja, 8 enrolamentos ou bobinas. Nota-se que no caso do motor de 2 fases, a fase A' está deslocada de 90° em relação a fase principal A. Por sua vez, o motor de 5 fases possui 10 enrolamentos e, portanto, 10 polos magnéticos.

Em termos de desempenho, os motores com maior número de fases implicam em menor vibração em virtude dos ângulos de passo menores, além de terem diferentes ângulos de deslocamento conforme o acionamento dos enrolamentos do estator.

Um motor de 2 fases tem 8 polos, fazendo com que o rotor de 50 dentes, por exemplo, precise se mover de $\frac{1}{4}$ de passo de dente para ocorrer o alinhamento com a próxima fase. Assim, um motor de 2 fases e 50 dentes, precisa de 200 passos para completar uma volta completa, onde o ângulo de deslocamento é de 1,8° por passo.

Em um motor de 5 fases se tem 10 polos, fazendo com que o rotor precise se deslocar de 1/10 de dente para se ter o alinhamento com a próxima fase. O número de passos para uma volta completa será de 500, com ângulo de deslocamento de 0,72° por passo; tendo-se uma resolução maior do que no motor de 2 fases.

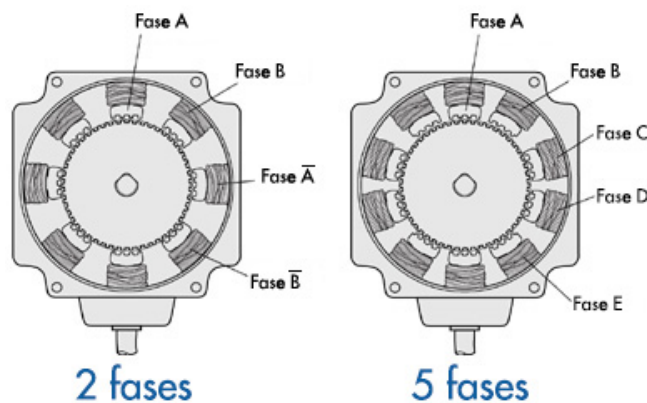


Figura 17 – Exemplo de motor de 2 e 5 fases.

Fonte: <https://www.orientalmotor.com.br>. Acesso em 28/07/2021.

4.3 Tipos de polos de motores de passo

Em relação ao tipo de configuração dos polos dos motores de passo, estes podem ser unipolares ou bipolares, alterando-se a conexão ao circuito externo, conforme cada caso.

4.3.1 Motores de passo unipolares

Os motores de passo unipolares utilizam 2 enrolamentos por fase, tendo em geral, uma conexão comum, resultando em 5, 6 ou 8 fios para conexões externas. Quando a conexão comum é separada por fase, se tem um motor de 6 fios; enquanto nos motores onde a conexão comum é

unida internamente, se terá um motor com 5 fios. A Figura 18 mostra as conexões terminais dos motores de passo unipolares com 5, 6 e 8 fios. As cores dos fios, conforme a Figura 18, podem ser diferentes conforme o fabricante do motor, devendo-se consultar as folhas de dados do motor ao utilizar o mesmo e implementar seu circuito de acionamento.

A Figura 19 mostra um motor unipolar de 2 fases, onde se nota que o terminal 1 é o condutor comum da fase 1, enquanto o terminal 2 é o condutor comum da fase 2. Os enrolamentos (polos) são conectados aos terminais a e b, para cada fase, respectivamente.

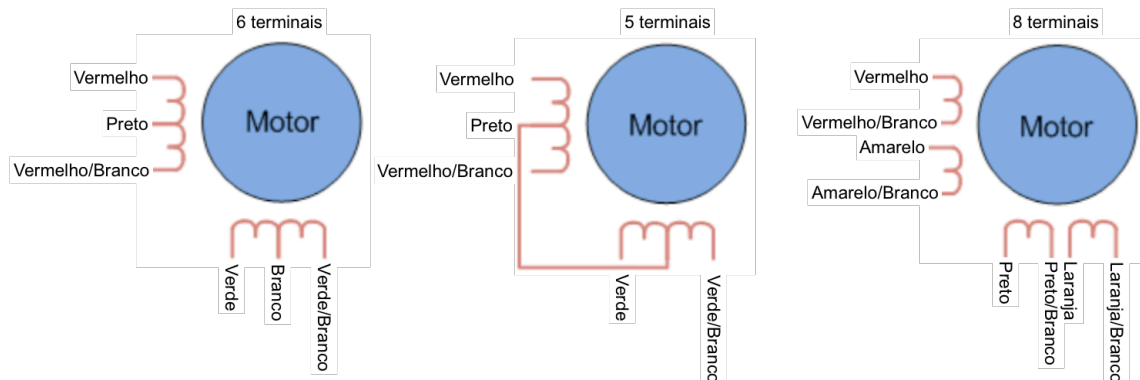


Figura 18 – Conexões do motor unipolar.

Fonte: <https://www.feis.unesp.br> e <https://www.engineersgarage.com>. Acesso em 28/07/2021.

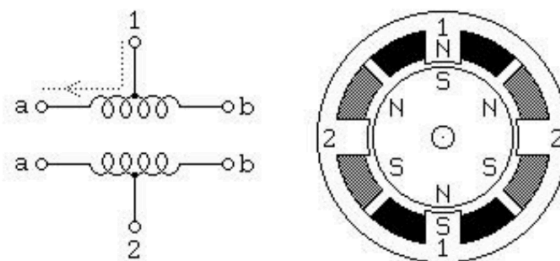


Figura 19 – Conexões do motor unipolar.

Fonte: Adaptado de (Brites e Santos, 2008).

4.3.2 Motores de passo bipolares

Os motores de passo bipolares possuem apenas uma conexão para cada polo (enrolamento), necessitando de circuitos de acionamento que possibilitem a inversão do sentido da corrente, conforme mostrado na Figura 20.

Os terminais de conexão da fase 1 são identificados por 1a e 1b, enquanto a fase 2 é identificada por 2a e 2b, como se observa na Figura 21.

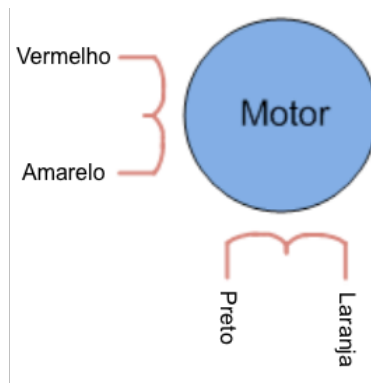


Figura 20 – Conexões do motor bipolar.

Fonte: <https://www.feis.unesp.br> e <https://www.engineersgarage.com>. Acesso em 28/07/2021.

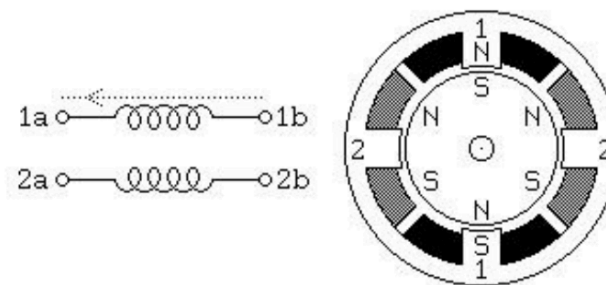


Figura 21 – Conexões do motor bipolar.

Fonte: Adaptado de (Brites e Santos, 2008).

4.3.3 Motores de passo unipolares e bipolares

Em termos práticos, um motor unipolar pode ser conectado como sendo bipolar, utilizando para isso a ligação série dos enrolamentos, ou seja, na Figura 19 se iriam conectar os terminais a e b de cada fase, sem utilizar o condutor comum 1 e 2.

Um exemplo de motor que permite conexão unipolar e bipolar é mostrado na Figura 22. As possibilidades de conexões dependerão da quantidade de terminais de conexão do motor, tendo-se então:

- 4 terminais – Os motores de 4 fios permitem apenas a conexão do tipo bipolar série;
- 6 terminais – Motores de 6 fios podem ser conectados fazendo-se a ligação bipolar série ou unipolar;
- 8 terminais – Os motores de 8 fios podem ser ligados em todos os tipos de conexões mostradas na Figura 22, que são bipolar série, bipolar paralela e unipolar.

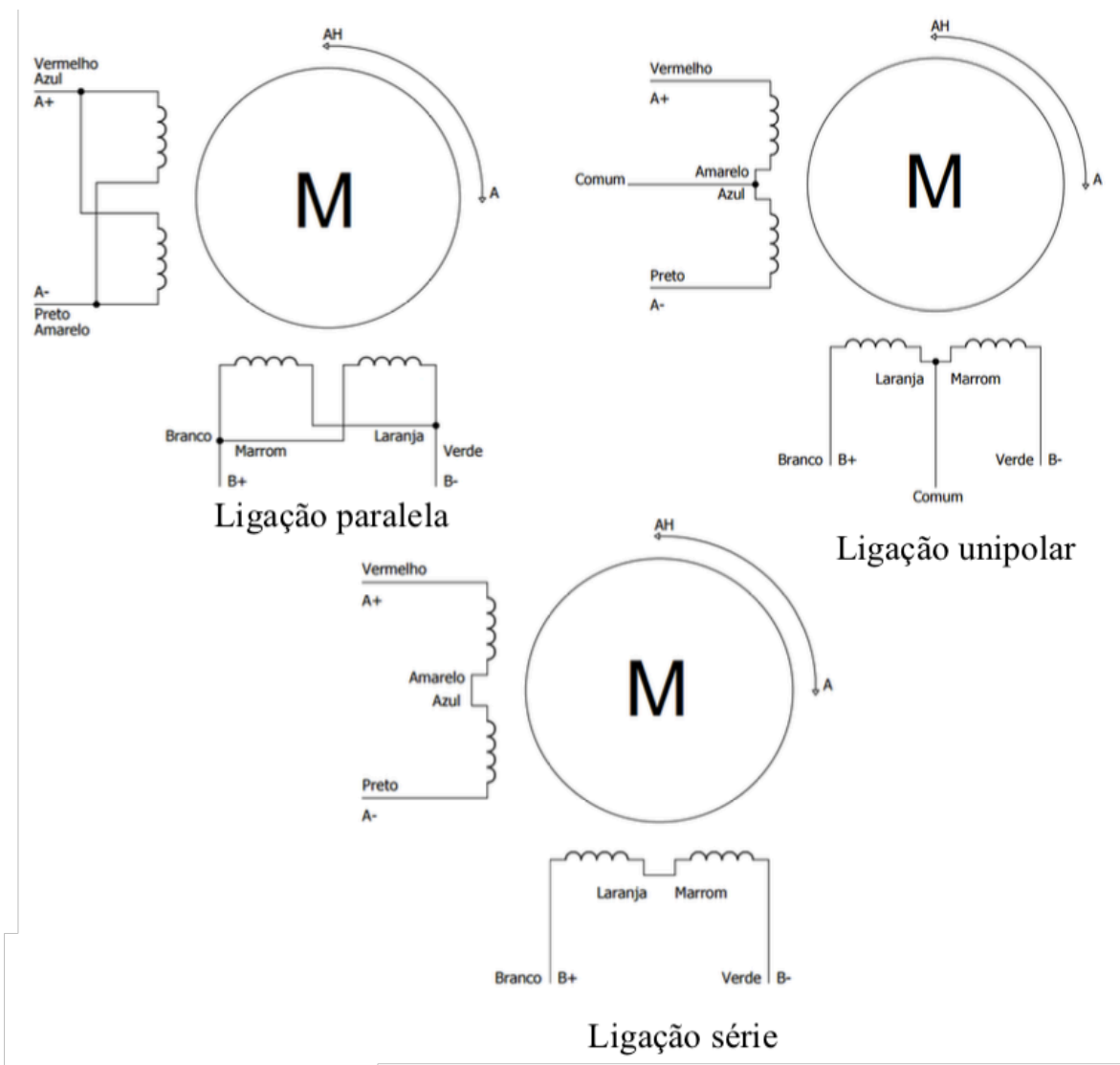


Figura 22 – Diferentes ligações de um motor de passo.

Fonte: <https://www.neomotion.com.br>. Acesso em 28/07/2021.

4.4 Circuito elétrico equivalente do motor de passo

O circuito elétrico equivalente do motor de passo, por fase, é mostrado na Figura 23, onde se tem a resistência do enrolamento (R_a), a indutância do enrolamento (L_a) e a tensão induzida ou força contraeletromotriz (E_a).

Este circuito pode ser adaptado, conforme a ligação das diferentes fases do motor, desde que se tenha os parâmetros fornecidos pelo fabricante.

As tensões terminais nas fases A e B do motor serão dadas por:

$$v_A = R_A \cdot i_A + L_A \cdot \frac{di_A}{dt} + e_A$$

$$v_B = R_B \cdot i_B + L_B \cdot \frac{di_B}{dt} + e_B$$

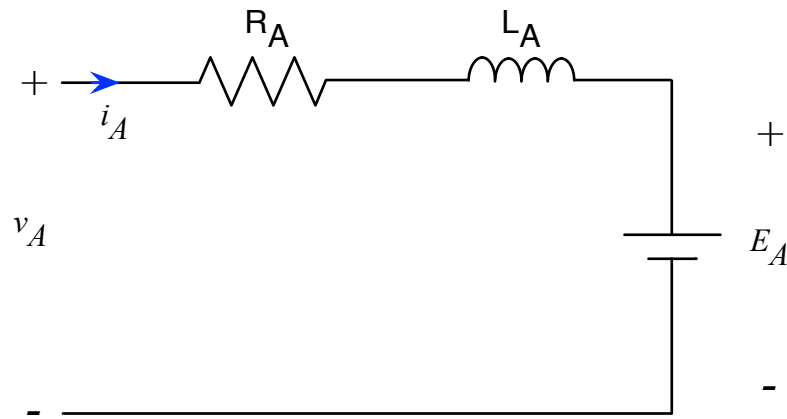


Figura 23 – Circuito elétrico equivalente de uma fase de um motor de passo.

5 Circuitos de Acionamento de Motores de Passo

5.1 Introdução

A seguir serão apresentados alguns circuitos de acionamento de motores de passo, buscando-se mostrar o funcionamento básico dos mesmos e permitir que a partir dos mesmos diferentes soluções e circuitos sejam propostos e implementados.

5.2 Modos de passo

Um motor de passo pode ser acionado de diferentes maneiras para se ter ângulos de deslocamento diferentes conforme a aplicação. Assim, se pode ter os modos de passo, que definem o incremento de giro que será dado ao eixo conforme a técnica de acionamento utilizada, sendo eles:

- Passo completo – O passo completo é realizado energizando ambas as fases (A e B) e alternando-se o sentido de corrente nas mesmas. Por exemplo, para um motor que executa 200 passos completos por rotação, se terá um ângulo de $1,8^\circ$ para cada passo completo ($360^\circ/200$);
- Meio passo – Neste caso o número de passos para uma volta completa será o dobro do modo passo completo, implicando, para um motor de 200 passos completos por rotação, em um deslocamento de $0,9^\circ$ por passo, o que é obtido energizando-se uma fase e em seguida ambas as fases, de maneira alternada. Este modo apresenta um torque menor do que no modo passo completo;
- Micropasso – No modo de acionamento de micropassos, um passo completo é dividido em passos menores, obtido aplicando-se correntes com intensidades variáveis nos enrolamentos do motor. O torque é em torno de 30% menor do que

no modo de passo completo (Fonte: <https://br.omega.com>. Acesso em 29/07/2021.). O movimento neste modo de acionamento é muito suave, sendo utilizado quando se tem necessidade de posicionamentos exatos e grande gama de velocidades para o motor.

Os diferentes modos de acionamento do motor de passo são obtidos por diferentes circuitos de acionamento, implicando em aumento de complexidade para o modo meio passo e micropasso. No entanto, é possível se dividir um passo completo de $1,8^\circ$ em 256 micropassos, obtendo-se em deslocamentos de $0,007^\circ$ por passo e um total de 51200 passos (Fonte: <https://br.omega.com>. Acesso em 29/07/2021.).

A Figura 24 mostra exemplos de circuitos de acionamento (*drive*) de motor de passo, com potências da ordem de algumas dezenas de watts, alimentação na faixa 12 a 40 V, correntes de operação de até 3,5 A e acionamento nos modos passo completo, meio passo e micropasso.



Passo completo e meio passo

Micropassos

Figura 24 – Exemplo de drive de acionamento de motor de passo.

Fonte: <https://br.omega.com>. Acesso em 28/07/2021.

A Figura 25 mostra o funcionamento simplificado de um motor de passo de ímã permanente, do tipo unipolar, com acionamento no modo passo inteiro. Nota-se que, neste exemplo, após 4 passos o motor completa uma volta inteira, sendo que é acionado um enrolamento a cada passo.

O funcionamento do mesmo motor, mas agora com acionamento no modo meio passo é mostrado na Figura 26, onde se tem 8 passos para uma volta completa do rotor.

A Figura 27 apresenta a sequência de passos para o acionamento do motor de passo do tipo bipolar no modo passo inteiro, enquanto a Figura 28 mostra o funcionamento deste motor do exemplo, com acionamento no modo meio passo.

A descrição apresentada nas Figura 25 a Figura 28 tem o intuito de mostrar o posicionamento do rotor e a sequência de passos, não correspondendo fielmente ao modo de conexão dos enrolamentos para motores comerciais, pois neste caso deve-se levar em conta o número de terminais do motor e o diagrama de ligações sugerido pelo fabricante, conforme cada caso e aplicação em particular.

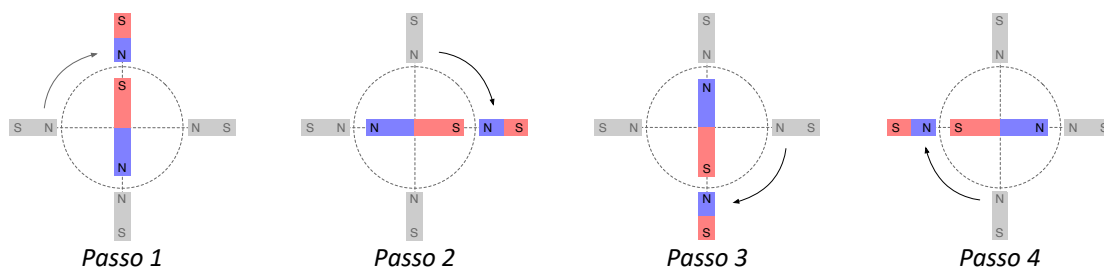


Figura 25 – Acionamento de motor de passo unipolar no modo passo inteiro.

Fonte: Adaptado de (Brites e Santos, 2008).

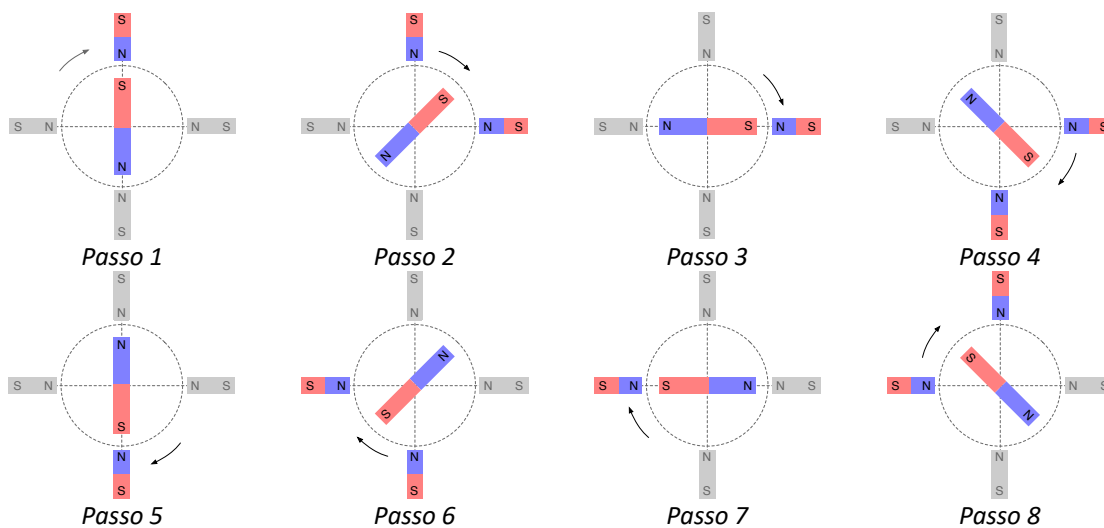


Figura 26 – Acionamento de motor de passo unipolar no modo meio passo.

Fonte: Adaptado de (Brites e Santos, 2008).

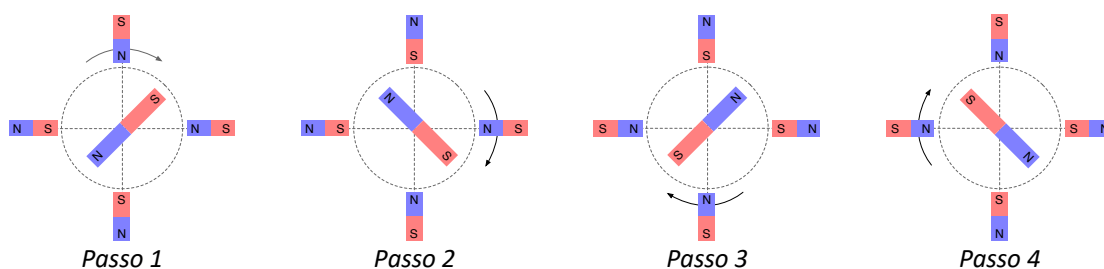


Figura 27 – Acionamento de motor de passo bipolar no modo passo inteiro.

Fonte: Adaptado de (Brites e Santos, 2008).

A título de exemplo, na Figura 29 se mostra uma sequência de acionamentos dos enrolamentos de um motor para operar no modo micropasso. Neste caso, os deslocamentos são menores, tendo-se entre as posições 0° e 45° duas posições intermediárias, conseguidas pela gradação da amplitude da corrente aplicada nos enrolamentos em uso.

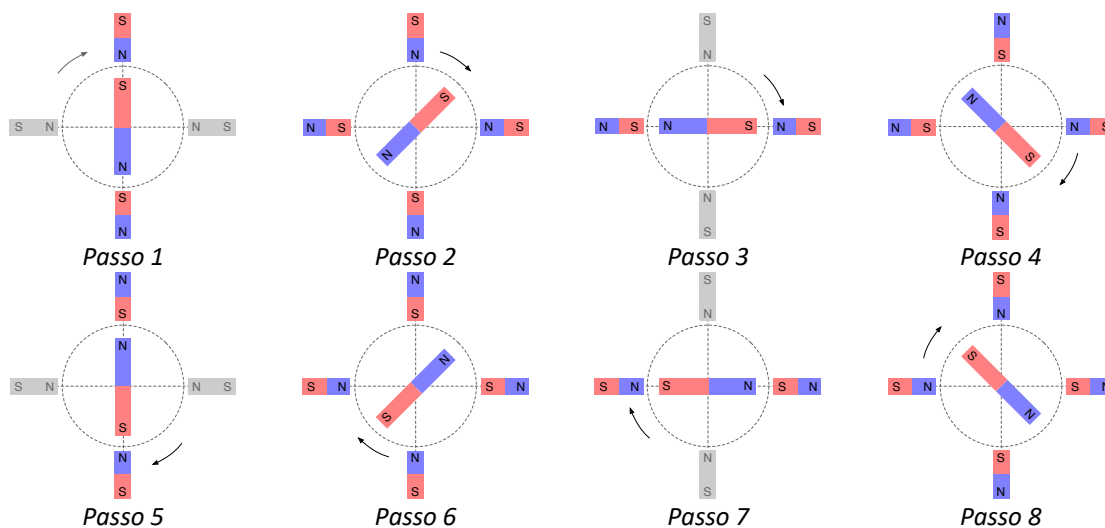


Figura 28 – Acionamento de motor de passo bipolar no modo meio passo.

Fonte: Adaptado de (Brites e Santos, 2008).

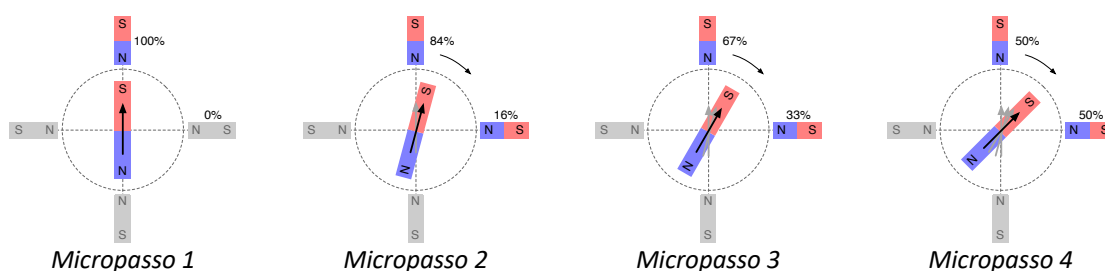


Figura 29 – Acionamento de motor de passo unipolar no modo micropasso.

5.3 Acionamento de motores de passo

Um motor de passo pode ser acionado de diferentes maneiras para se ter ângulos de deslocamento diferentes e operar com modos de passo distintos, conforme estudado anteriormente.

Assim, neste capítulo serão apresentados alguns circuitos para acionamento de motores de passo, não se pretendendo aprofundar em demasia ou exaurir o assunto, mas sim, dar as informações gerais para o desenvolvimento de soluções tecnológicas na área de acionamentos eletrônicos.

É interessante destacar, conforme comentado e mostrado na Figura 24 que existem circuitos e produtos no mercado que permitem diferentes configurações de operação e acionamento de motores em diferentes modos e operação utilizando o mesmo dispositivo para tal.

A Figura 30 mostra um diagrama de blocos exemplificando o acionamento de um motor de passo de 3 fases. Nota-se que as tensões aplicadas em cada fase seguem um padrão sequencial de A para C ou vice-versa, conforme o sentido de rotação desejado.

O circuito de potência tem por finalidade prover as amplitudes de tensão e de corrente adequadas para o funcionamento do motor, conforme suas especificações técnicas. Já o circuito lógico, a partir de sinais de comando que determinam a velocidade e a direção de giro do motor, originam a sequência correta dos pulsos de acionamento para as fases A, B e C.

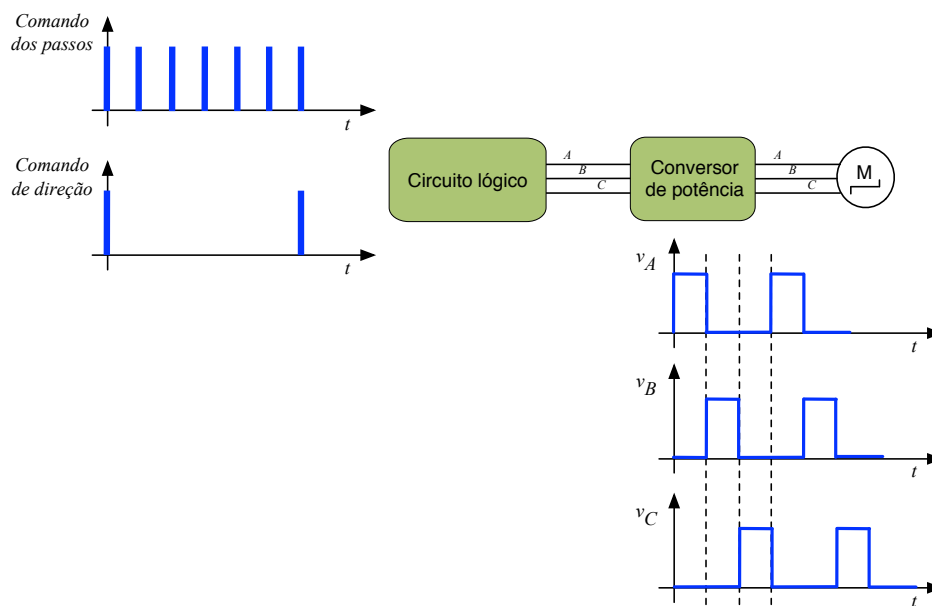


Figura 30 – Circuito de acionamento de motores de passo.

5.4 Acionamento de motor de passo de relutância variável

Os motores de passo de relutância variável podem ser controlados fazendo-se o acionamento de suas fases (enrolamentos) sequencialmente, pois em geral possuem de 3 a 5 bobinas. A sequência de acionamento pode ser no sentido horário ou anti-horário, conforme se desejar que o eixo do motor gire em um sentido ou outro.

A Figura 31 apresenta um circuito simples de acionamento do motor de relutância variável a partir de transistores, sendo que cada fase está sendo controlada por um elemento específico. Em sendo circuitos com características resistiva-indutivas, é necessário utilizar diodos de roda-livre para evitar sobretensões nos elementos do circuito.

Os sinais de comando para determinar a velocidade e sentido de giro do motor, além dos pulsos sequencialmente corretos, serão gerados por um circuito lógico ou microcontrolador, por exemplo, que não está sendo mostrado na figura.

O projeto do circuito mostrado na Figura 31 é realizado de maneira semelhante aos

exemplos mostrados no capítulo anterior sobre motores de corrente contínua, levando-se em conta as tensões e correntes de operação do motor, neste caso, especificamente para cada fase do mesmo.

Por exemplo, para um motor modelo AK23/7.0F8FN1.8 do fabricante Neoyama, a corrente na fase será de 1 A, a tensão para ligação em série será de 5 V, tendo resistência de 2,4 Ω e indutância de 9,2 mH.

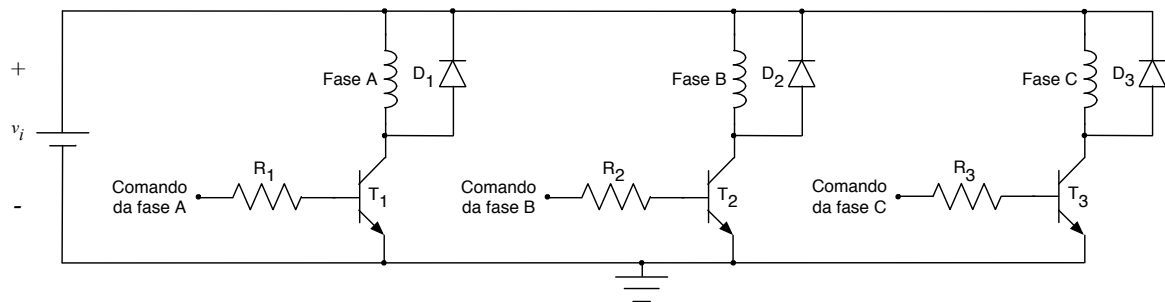


Figura 31 – Circuito de acionamento de motor de passo de relutância variável.

Fonte: Adaptado de <https://www.feis.unesp.br>. Acesso em 28/07/2021.

5.5 Acionamento de motor de passo unipolar

O acionamento de motores de passo unipolares é realizado fazendo-se o acionamento de cada fase, que neste caso possui um terminal comum, a partir de transistores, por exemplo, como mostrado na Figura 32, provendo a circulação de corrente pela metade do enrolamento com um sentido de circulação, e na sequência, fazendo-se o acionamento da outra metade do enrolamento, com sentido de corrente contrário ao anterior.

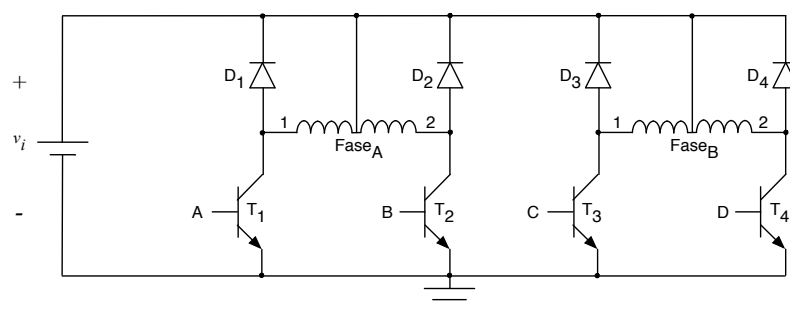


Figura 32 – Circuito de acionamento de motor de passo unipolar.

Fonte: Adaptado de <https://www.feis.unesp.br>. Acesso em 28/07/2021.

No circuito da Figura 32, ao comandar o transistor T_1 , o terminal 1 da fase A será ligado ao polo negativo da fonte de alimentação (v_i), enquanto o terminal comum estará permanentemente ligado ao polo positivo da fonte. O mesmo ocorre se o transistor T_3 for acionado,

neste caso para a fase B.

Por sua vez, se os transistores T_2 e T_4 forem acionados, então os terminais 2 das fases A e B serão conectados ao polo negativo da fonte de alimentação.

5.6 Acionamento de motor de passo bipolar

O acionamento dos motores de passo bipolares exige o uso de circuitos eletrônicos que possam proporcionar a inversão da polaridade da tensão sobre as fases do motor, o que em geral é realizado com conversores do tipo ponte completa (ponte H), como mostrado na Figura 33.

Os transistores S_1 e S_4 são acionados conjuntamente, conectando a fase A à fonte de alimentação, mantendo-se os transistores S_2 e S_3 bloqueados. Para inverter a polaridade da tensão sobre a fase A, acionam-se os transistores S_2 e S_3 , mantendo S_1 e S_4 bloqueados.

A fase B é acionada de maneira semelhante, agora com os transistores S_5 e S_8 e S_6 e S_7 atuando as pares, como descrito para a fase A.

É importante destacar que os interruptores de cada braço dos conversores ponte completa, por exemplo S_1 e S_2 , não podem ser acionados simultaneamente, pois aí se terá um curto-circuito na fonte de alimentação.

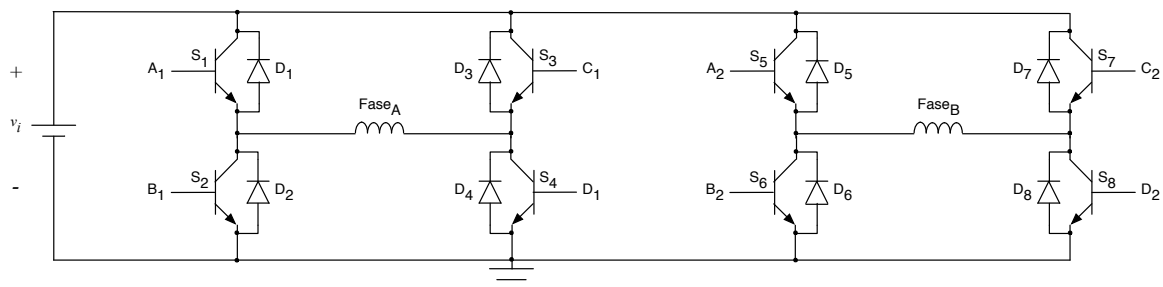


Figura 33 – Circuito de acionamento de motor de passo bipolar.

Fonte: Adaptado de <https://www.feis.unesp.br>. Acesso em 28/07/2021.

5.7 Acionamento de motor de passo com circuitos integrados

Os circuitos de acionamento de motores de passo podem ser implementados utilizando circuitos integrados dedicados, como mostrado em capítulo anterior para motores de corrente contínua.

A Figura 34 mostra uma placa de acionamento de motores que utiliza o circuito integrado L298N, que possui internamente dois conversores ponte completa, permitindo o desenvolvimento de um circuito semelhante ao mostrado na Figura 33 e que possibilita o controle por sinais em nível lógico, que podem ser originados em microcontroladores, como mostrado, em termos práticos, na Figura 35. Este exemplo da Figura 35 utiliza um Arduino para a geração dos sinais lógicos para acionamento do motor de passo, definindo por *software* a velocidade de rotação e sentido de giro.

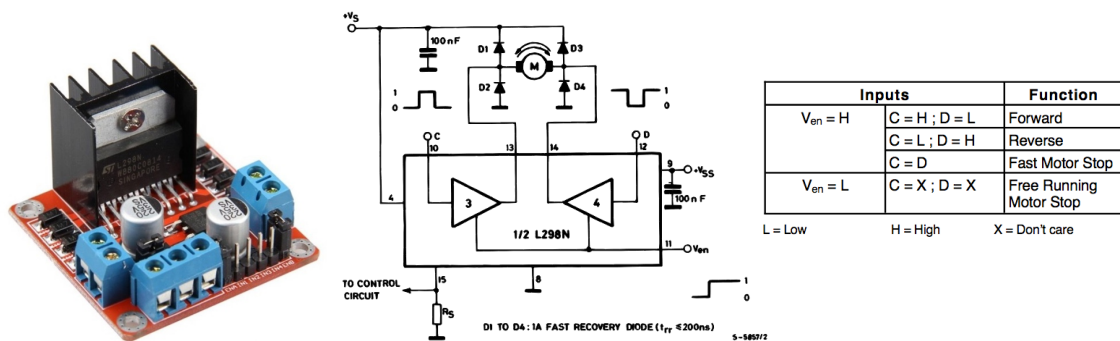


Figura 34 – Exemplo de circuito integrado para acionamento de motor de passo.

Fonte: Adaptado de <https://www.st.com>. Acesso em 28/07/2021.

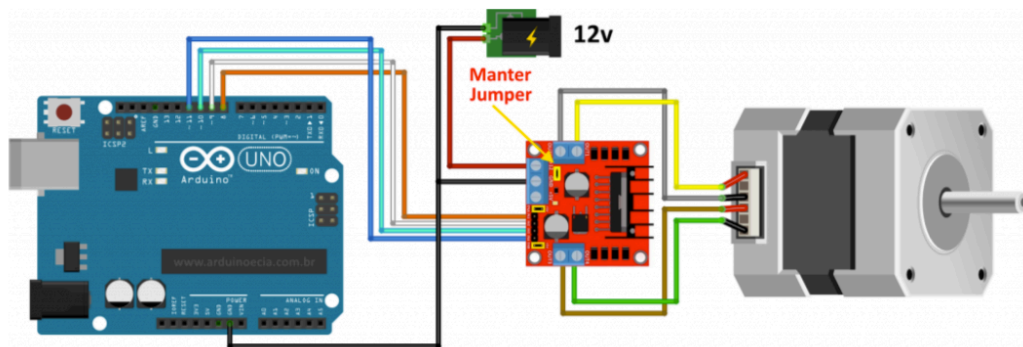


Figura 35 – Circuito de acionamento de motor de passo com circuito integrado.

Fonte: Adaptado de <https://www.arduinoecia.com.br>. Acesso em 28/07/2021.

6 Exercícios

Exercícios Resolvidos

ER 01. Comente sobre as aplicações dos motores de passo?

Os motores de passo são utilizados quando se necessita realizar deslocamentos precisos, como em impressoras, braços robóticos, mesas digitalizadoras, fresadoras, etc.

ER 02. Quais os tipos de motores de passo considerando sua estrutura construtiva?

Em relação a estrutura construtiva os motores de passo são de relutância variável, ímã permanente ou híbridos.

ER 03. Comente sobre o acionamento de um motor de passo no modo passo inteiro.

Acionar um motor de passo no modo passo inteiro significa que o rotor irá se deslocar de um polo magnético (enrolamento ou fase) do estator até o próximo, a cada pulso de acionamento aplicado ao motor.

ER 04. Qual a principal diferença dos motores de passo em relação aos motores de corrente contínua quando o rotor estiver parado?

A principal diferença é o torque de manutenção ao alimentar o motor e manter o rotor parado, que nos motores de passo é superior aos motores de corrente contínua.

ER 05. Os motores de passo podem ser alimentados por uma tensão contínua fixa?

Não, pois neste caso o rotor ficará travado. Os motores de passo devem ser alimentados por pulsos de tensão aplicados aos seus enrolamentos.

Exercícios Propostos

EP 01. Cite aplicações para os motores de passo?

EP 02. Quais os tipos de motores de passo levando em conta as conexões de seus enrolamentos?

EP 03. Comente sobre o modo de acionamento de micropassos.

EP 04. Quais as principais partes de um motor de passo?

EP 05. Comente sobre o acionamento de motores de passo de relutância variável.

7 Atividade Avaliativa

7.1 Introdução – O que preciso saber

Ao final deste objetivo de aprendizagem são apresentadas cinco questões, que devem ser respondidas sem consultar o material. Se você conseguir responder as questões e conferir as respostas com o gabarito abaixo, parabéns, você concluiu com êxito este tópico. Caso tenha errado alguma questão, revise o conteúdo relacionado com a mesma e refaça a questão, procurando se concentrar mais desta vez, para acertar o exercício e fixar bem o conteúdo.

AA 01. Qual o modo de acionamento do motor de passo deve ser usado para se ter deslocamentos de grande precisão?

AA 02. Comente sobre o conversor a ser utilizado para acionar motores de passo bipolares.

AA 03. Compare os motores de passo em relação aos motores de corrente contínua, em termos de manutenção.

AA 04. O que significa perda de passo no acionamento de motores de passo?

AA 05. Quais os elementos do circuito equivalente de um motor de passo?

AA 01. Para se ter deslocamentos de grande precisão deve-se utilizar o modo de acionamento por micropassos.

AA 02. O acionamento dos motores de passo bipolares deve ser realizado utilizando conversores ponte completa, pois é necessário inverter a polaridade da tensão sobre as fases.

AA 03. A manutenção dos motores de passo é mais simples do que nos motores de corrente contínua, pois estes não possuem escovas e coletor comutador.

AA 04. Perda de passo significa que o rotor girou incorretamente a partir dos pulsos de acionamento aplicados ao motor, o que pode ocorrer devido a vibração ou pela escolha incorreta da frequência de acionamento do circuito de controle do motor.

AA 05. O circuito equivalente, por fase, de um motor de passo é formado pela resistência do enrolamento, da indutância do enrolamento e da tensão induzida.



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA

DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA

CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM ELETRÔNICA INDUSTRIAL

Acionamentos Eletrônicos



GUIA DE ESTUDO

- OBJETIVO DE APRENDIZAGEM - MOTORES SEM ESCOVAS

Prof. Clóvis Antônio Petry.

Florianópolis, agosto de 2021.

MOTORES SEM ESCOVAS

Objetivo de Aprendizagem

Estudar motores sem escovas (*brushless*).

Objetivos parciais

- Conhecer os princípios de funcionamento dos motores sem escovas;
- Identificar os tipos de motores sem escovas;
- Conhecer as aplicações dos motores sem escovas;
- Entender o funcionamento dos circuitos de acionamento dos motores sem escovas.

Aulas relacionadas

Este objetivo de aprendizagem está relacionado com a aula 10 da disciplina.

Pré-requisitos

Ter estudado o objetivo de aprendizagem 09 relacionado aos motores de passo.

Continuidade dos Estudos

O próximo objetivo de aprendizagem será o estudo dos motores de indução.

Roteiro para estudos

Os estudos referentes a este objetivo de aprendizagem consistem em:

1. Estudar este documento resumo, realizando as atividades propostas no mesmo;
2. Responder o quiz relacionado a este objetivo de aprendizagem;
3. Caso perceba necessidade, estudar a apresentação deste assunto ou consultar os livros texto indicados para esta disciplina;
4. Realizar os exercícios deste tópico da matéria;
5. Realizar a avaliação final para progredir ao próximo conteúdo.

Referências

- Material disponibilizado para a disciplina de Acionamentos Eletrônicos – 2021/1.
Departamento Acadêmico de Eletrônica, Instituto Federal de Santa Catarina, Campus Florianópolis.

Check-list

Caro estudante, verifique se você completou as atividades deste objetivo de aprendizagem e obteve êxito para continuar seus estudos.

Assinale as atividades realizadas:

Estudo do documento resumo:

- Leitura do documento resumo;
- Exercícios do documento resumo;
- Atividade avaliativa do documento resumo.
- Obtive êxito e entendi o conteúdo deste documento;
- Ainda não entendi bem o conteúdo e estudarei o mesmo com mais profundidade.

Estou com dúvidas, irei estudar com mais detalhes este conteúdo:

- Assistir a apresentação relacionada ao conteúdo (apresentação 10);
- Ler este guia de estudo (objetivo de aprendizagem 10).

Ainda estou com dúvidas:

- Entrarei em contato com o professor.

Obtive êxito, então seguirei em frente:

- Responder ao quiz deste conteúdo no Moodle;
- Informar ao professor que estou avançando com o conteúdo.

Parabéns, continue estudando com afinco e vamos em frente!!

CONTEÚDO

- OBJETIVO DE APRENDIZAGEM - MOTORES SEM ESCOVAS

1 Introdução

Os capítulos anteriores foram dedicados ao estudo e acionamento dos motores de corrente contínua e motores de passo, onde se estudaram os tipos, funcionamento, aplicações e circuitos para acionamento destas máquinas de corrente contínua.

Este capítulo terá como objetivo principal o estudo dos motores sem escovas (brushless) e seu acionamento.

1.1 Conteúdo – O que irei estudar

Estudaremos neste tópico:

- Princípio de funcionamento dos motores sem escovas;
- Tipos de motores sem escovas;
- Aplicações dos motores sem escovas;
- Acionamento de motores sem escovas.

1.2 Metodologia – O que devo fazer e como fazer

Leia com atenção o conteúdo a seguir. Ao final deste tópico são apresentados exercícios resolvidos. Após são apresentados alguns exercícios propostos.

Ao realizar estas atividades e se sentir confiante para progredir, siga os passos indicados na primeira página deste documento.

Espera-se que após estudar este assunto, você consiga:

- Descrever o funcionamento de um motor sem escovas;
- Identificar os tipos de motores sem escovas;
- Comentar sobre algumas aplicações dos motores sem escovas;
- Descrever os circuitos de acionamento de motores sem escovas.

A atividade avaliativa deste objetivo de aprendizagem consistirá em perguntar ao estudante para descrever o funcionamento de um circuito de acionamento de um motor sem escovas, por exemplo.

Exemplo de atividade avaliativa:

1. Explicar com suas palavras o funcionamento de um motor sem escovas;
2. Citar aplicações dos motores sem escovas;
3. Comentar os tipos de motores sem escovas;
4. Explicar o funcionamento de circuitos de acionamento de motores sem escovas;
5. Citar características de motores sem escovas.

2 Princípio de Funcionamento dos Motores Sem Escovas

2.1 Introdução

Os motores elétricos de corrente contínua podem ser de diferentes tipos, conforme estudado nos capítulos anteriores, tendo-se, dentre eles, os motores sem escovas (*brushless*).

Este capítulo irá apresentar o princípio de funcionamento dos motores sem escovas e sua classificação, para na sequência se apresentar os tipos e os circuitos de acionamento dos mesmos.

2.2 Definição de motor elétrico sem escovas

O motor elétrico sem escovas é uma máquina elétrica rotativa de corrente contínua, que converte energia elétrica em movimento.

A principal diferença dos motores sem escovas para os motores de passo é a velocidade de rotação e suas aplicações, pois os últimos são motores de baixa velocidade, enquanto os primeiros podem operar com altas velocidades.

Os motores sem escovas, também conhecidos por motores síncronos para corrente contínua, são denominados de BLDC ou BLDM (*brushless direct current motor* – motor de corrente contínua sem escovas).

2.3 Símbolo do motor sem escovas

O símbolo do motor sem escovas é semelhante ao motor de corrente contínua, como mostrado na Figura 1, mas em geral possui 3 fases, tendo então 3 ou 4 fios de conexão.



Figura 1 – Símbolo do motor sem escovas.

2.4 Princípio de funcionamento do motor sem escovas

O princípio de funcionamento do motor sem escovas é semelhante ao funcionamento do motor de passos, com a distinção que agora se objetiva que o rotor gire continuamente com velocidade fixa.

Assim, o campo magnético gerado no estator deve originar um campo magnético girante, que exercerá uma força sobre os ímãs permanentes do rotor, fazendo com que o eixo da máquina

gire permanentemente enquanto esta estiver conectada à fonte de alimentação e acionada apropriadamente por um circuito de controle.

A Figura 2 mostra o estator (parte fixa) e o rotor (parte móvel) do motor sem escovas representados por ímãs permanentes, para simplificar a explicação do princípio de funcionamento do mesmo. Os eletroímãs do estator serão acionados sequencialmente, com posições conforme o sentido de giro desejado, seja no sentido horário ou anti-horário. O ímã permanente que representa o rotor poderá girar livremente em seu eixo de rotação.

Note que o estator é formado por 3 fases, tendo 6 enrolamentos ou polos magnéticos. A primeira fase foi identificada como A e seu polo oposto como A', enquanto a segunda fase foi identificada como B e seu oposto como B', sendo a terceira fase a C com oposto C'.

As posições que o rotor irá ocupar conforme o acionamento dos eletroímãs do estator são descritas como:

- Primeiro pulso – A fase A foi acionada, juntamente com seu polo oposto A'. O rotor está girando no sentido horário, vindo da posição 300° até a posição 0° ou 360°;
- Segundo pulso – A fase B é acionada, com seu polo oposto B'. O rotor gira da posição 0° até a posição 60°;
- Terceiro pulso – A fase C passa a ser acionada, com seu polo oposto C'. O rotor gira da posição 60° até a posição 120°;
- Quarto pulso – A fase A' é acionada, agora com seu polo oposto A. O rotor continua girando no sentido horário, vindo da posição 120° até a posição 180°;
- Quinto pulso – A fase B' é acionada, com seu polo oposto B. O rotor gira da posição 180° até a posição 240°;
- Sexto pulso – A fase C' passa a ser acionada, com seu polo oposto C. O rotor gira da posição 240° até a posição 360° ou 0°, fechando um ciclo completo, ou seja, uma volta completa.

As Figura 3, Figura 4 e Figura 5 mostram a sequência de pulsos de acionamento aplicados ao motor sem escovas, fazendo seu rotor girar em passos de 60°, desde 0° até 360°. Nota-se a semelhança com o funcionamento do motor de passo, estudado no capítulo anterior.

Este motor com 3 fases e 6 enrolamentos, terá deslocamentos de 60 em 60 graus, sendo possível subdividir as fases em mais enrolamentos para se ter passos menores e um giro mais suave, isto é, com menos variação no torque e diminuição da vibração da máquina de corrente contínua.

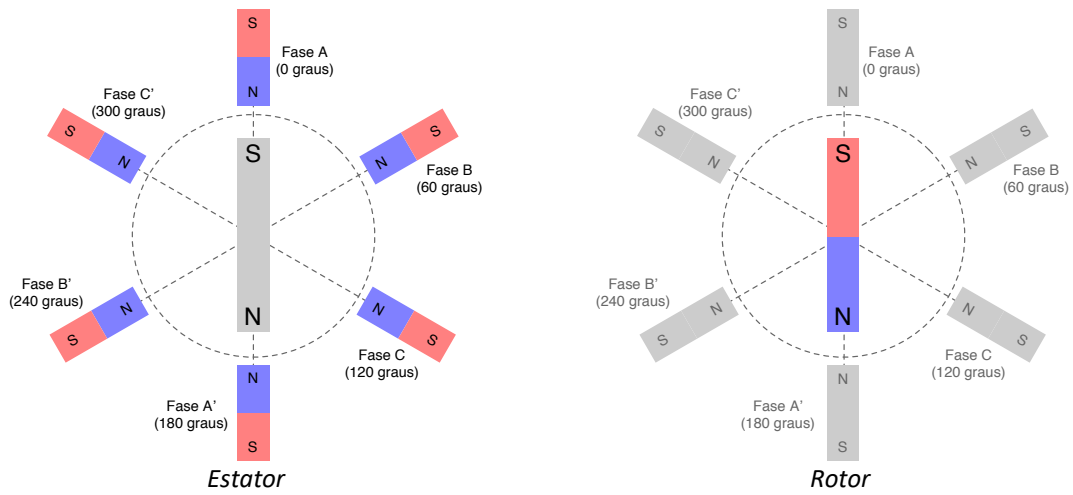
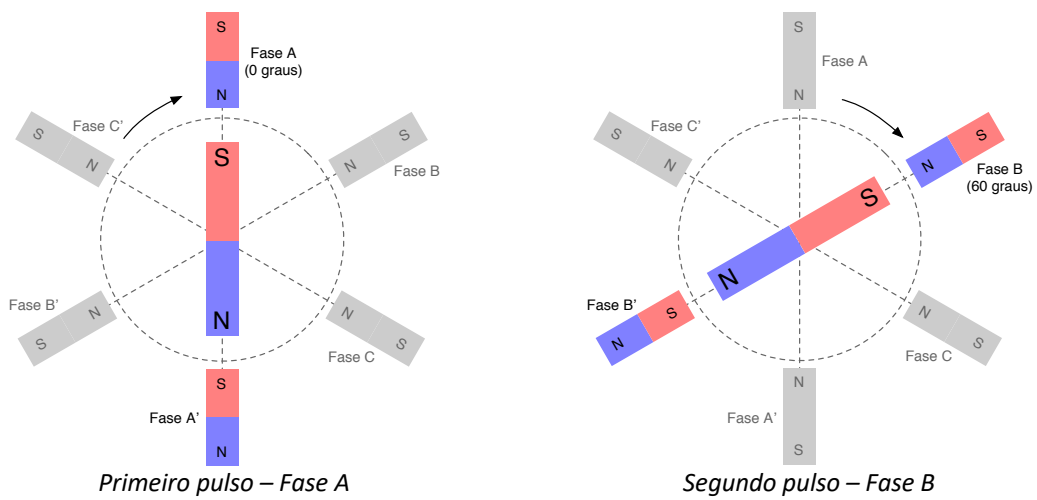


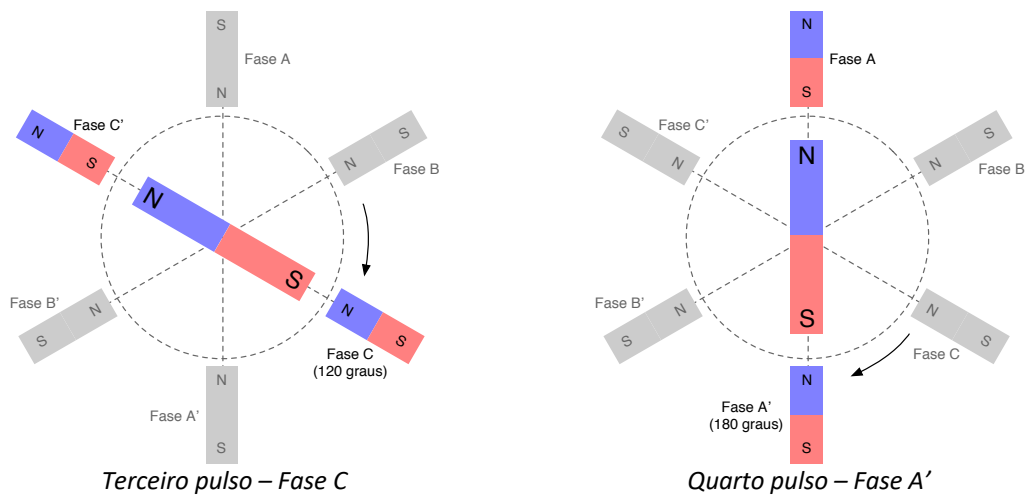
Figura 2 – Esquema simplificado para estudar o funcionamento do motor sem escovas.



Primeiro pulso – Fase A

Segundo pulso – Fase B

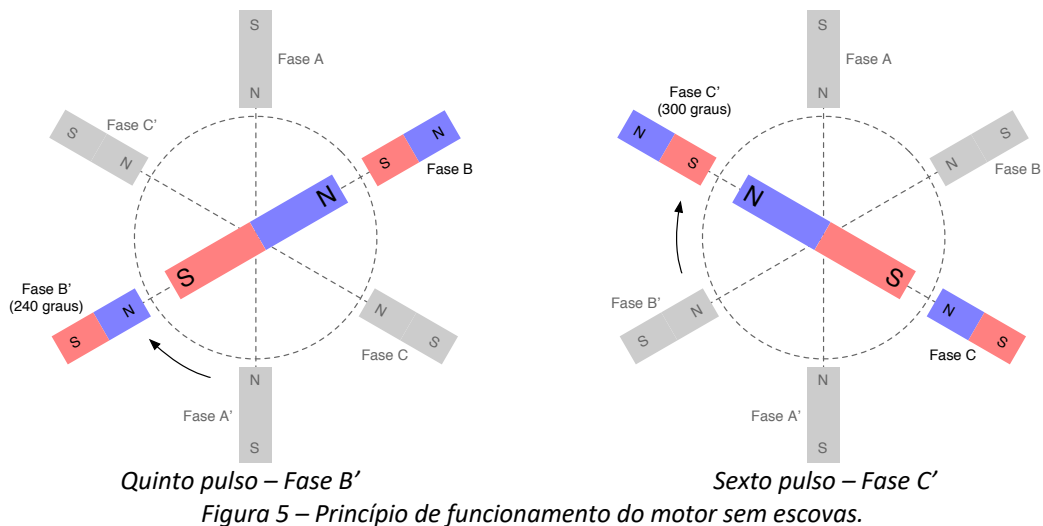
Figura 3 – Princípio de funcionamento do motor sem escovas.



Terceiro pulso – Fase C

Quarto pulso – Fase A'

Figura 4 – Princípio de funcionamento do motor sem escovas.



2.5 Principais aplicações dos motores sem escovas

As principais aplicações dos motores sem escovas são drones, aeromodelos, ferramentas elétricas, instrumentação, robótica, veículos elétricos, empilhadeiras, máquinas de costura, informática, dentre outras.

A Figura 6 apresenta algumas aplicações de motores sem escovas, com o aspecto característico do motor aplicado em cada caso.

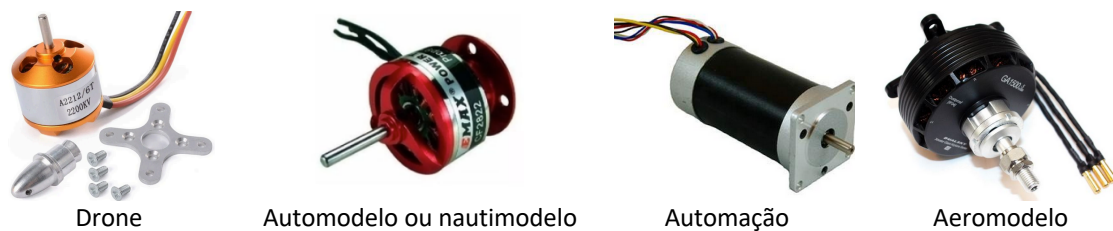


Figura 6 – Exemplos de motores sem escovas.

Fonte: <https://www.americanas.com.br> e <https://www.tekno.com.br>. Acesso em 08/07/2021.

2.6 Principais características dos motores sem escovas

As principais características dos motores sem escovas estão relacionadas com as altas velocidades de rotação que podem atingir e pouca manutenção dispensada aos mesmos.

Em termos de vantagens em relação aos motores de corrente contínua estudados anteriormente se tem¹:

- Operação em alta velocidade – Os motores sem escovas podem operar com elevado conjugado para altas velocidades de operação, superiores a 10000 rotações por minuto (RPM), por exemplo;

¹ LENZ, André Luiz. Motores BLDC. Disponível em <https://automoveiseletricos.blogspot.com>. Acesso em 05/08/2021.

- Baixa manutenção – Em sendo motores sem escovas e sem coletor, não exigem manutenção frequente como os motores de corrente contínua ou universais;
- Alta densidade de potência – Os motores sem escovas são compactos, com alta relação de potência versus volume construtivo;
- Alta eficiência – Em relação aos motores com escovas (motores de corrente contínua e universais) possuem menores perdas e mais simples de resfriar;
- Aceleração rápida – São motores com resposta rápida, permitindo acelerações e alterações no sentido de rotação rapidamente e com pouca inércia no rotor.

Por sua vez, também possuem desvantagens, que são:

- Acionamento complexo – O circuito de acionamento dos motores sem escovas deve ser específico, envolvendo conversores cc-ca e interruptores rápidos;
- Necessidade de sensores de posição – Para operar com altas velocidades e com velocidade constante, os motores sem escovas necessitam de sensores para identificar a posição exata do rotor, visando se aplicar os pulsos de acionamento corretamente;
- Dificuldade para alterar a velocidade – A velocidade do motor pode ser alterada modificando-se o intervalo de aplicação dos pulsos de acionamento, o que deve ser feito no comando do circuito de potência, envolvendo eletrônica de potência, não sendo possível apenas alterar a amplitude da tensão de alimentação como é feito no motor de corrente contínua.

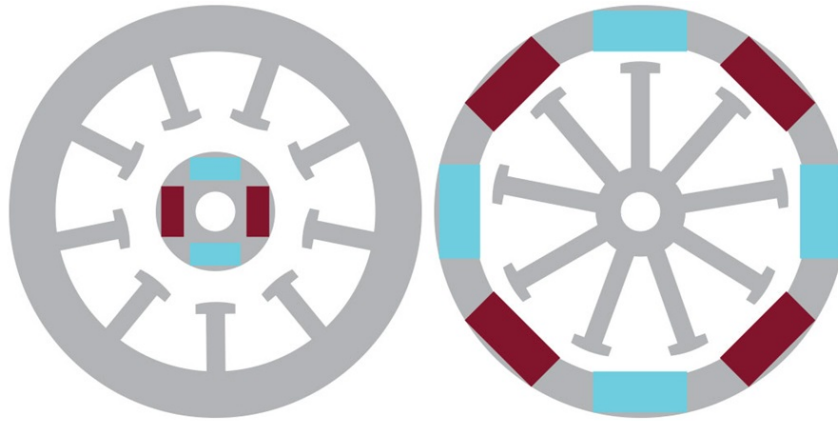
3 Tipos de Motores de Sem Escovas

3.1 Introdução

Os motores sem escovas podem ser de dois tipos levando em conta suas partes fixa e estacionária, sendo denominados de rotor interno (*inrunner*) ou rotor externo (*outrunner*), conforme mostrado na Figura 7.

O aspecto típico de um motor sem escovas é mostrado na Figura 8, onde se notam os enrolamentos do estator e a presença dos sensores de posição. Este motor possui 3 condutores para sua alimentação, 1 para cada fase, além dos condutores de sinal, que informam a posição do rotor, por meio dos sensores de posição.

O exemplo de motor mostrado na Figura 8 é do tipo rotor interno (*inrunner*), sendo estes os mais comuns encontrados comercialmente e nas mais diversas aplicações.



Rotor interno (inrunner)

Rotor externo (outrunner)

Figura 7 – Tipos de motores sem escovas.

Fonte: <https://www.analog.com>. Acesso em 05/08/2021.

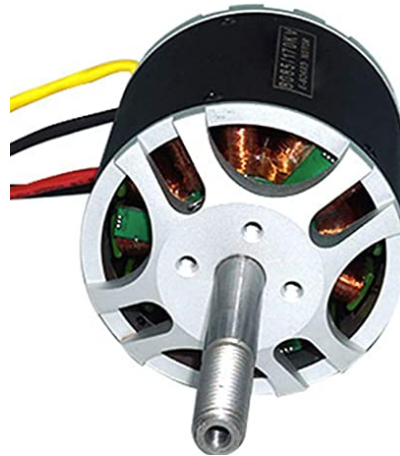


Figura 8 – Aspecto típico de um motor sem escovas.

Fonte: <https://www.amazon.com>. Acesso em 05/08/2021.

3.2 Partes do motor sem escovas

As principais partes de um motor sem escovas são mostradas na Figura 9, onde se podem notar as partes fixas no estator e as partes móveis no rotor. Neste exemplo o rotor é interno (*inrunner*).

Observe pela Figura 9 que o motor sem escovas possui os enrolamentos do estator formados por barras de fio, para se ter maior capacidade de corrente. O rotor é com ímãs permanentes.

Os motores sem escovas, como aquele apresentado na Figura 9, podem ser utilizados em competições esportivas, como a Fórmula E, para veículos elétricos, no estilo da Fórmula 1. Neste caso, os motores possuem potência da ordem de 120 kW, como é o caso do E-Motor da equipe McLaren.

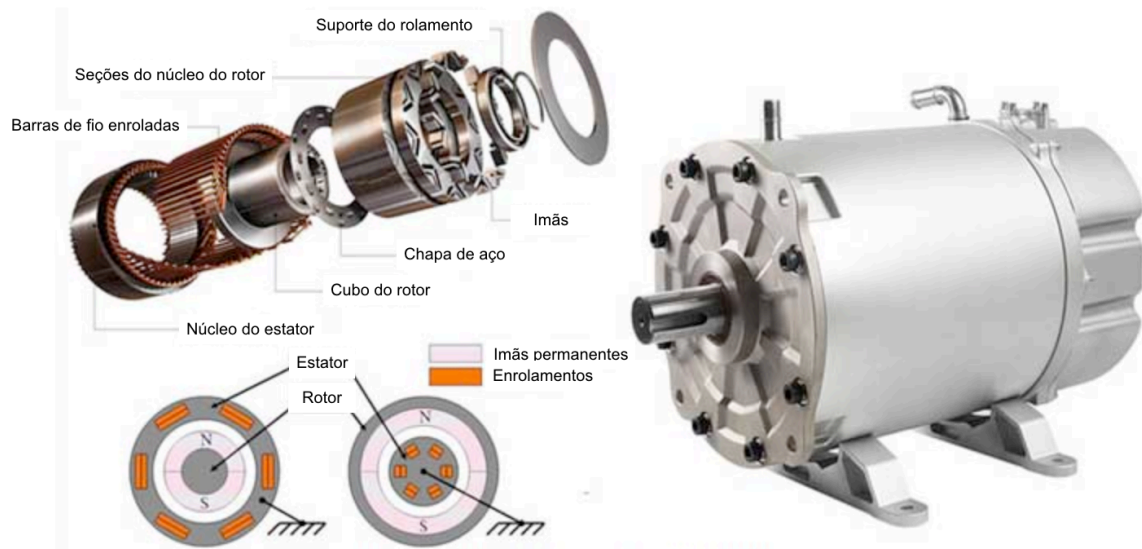


Figura 9 – Partes de um motor sem escovas.

Fonte: <https://www.autoracing.com.br>. Acesso em 05/08/2021.

3.3 Motores sem escovas com rotor interno (*inrunner*)

A Figura 10 mostra exemplos de motores sem escovas de rotor interno. Este tipo de montagem para o motor sem escovas tem como vantagens a facilidade para refrigeração do estator, onde ocorrem as perdas por efeito joule nos enrolamentos. Além disso, o rotor interno tem menor inércia, o que facilita as paradas e acelerações do motor.

As aplicações para o motor sem escovas de rotor interno são diversas, como ventiladores, pequenos veículos elétricos, máquinas e ferramentas elétricas, dentre outras; sendo utilizado sempre que o eixo do motor estiver acoplado a parte girante da carga.

Em termos de torque, os motores com rotor interno tem valores menores do que os motores com rotor externo, sendo que estes últimos também tem vibração menor do que os primeiros, o que podem ser características interessantes em determinadas aplicações para estes motores alimentados em corrente contínua e sem escovas.

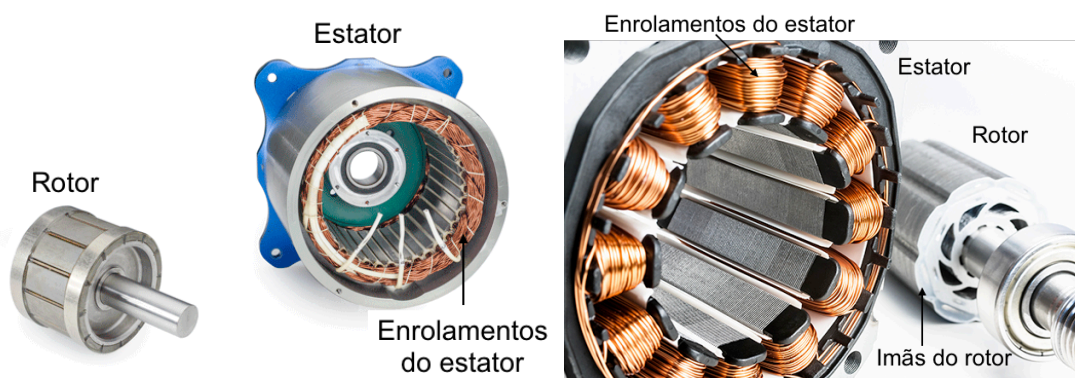


Figura 10 – Exemplos de motores sem escovas de rotor interno.

Fonte: <https://duryatechnologies.com> e <https://www.automate.org>. Acesso em 28/07/2021.

3.4 Motores sem escovas de rotor externo (*outrunner*)

A Figura 11 mostra um exemplo de motor sem escovas e rotor externo. Nota-se que neste caso os ímãs permanentes do rotor são montados externamente ao estator com seus enrolamentos.

A ventilação e retirada de calor do estator, em virtude do aquecimento produzido nos fios do mesmo, é mais difícil neste tipo de montagem, dificultando o processo de refrigeração do motor.

Estes motores são tipicamente utilizados quando se tem a montagem de maneira tal que a parte girante fica externa à parte fixa, como em elementos que tenham hélices, como aviões, drones, dentre outros.

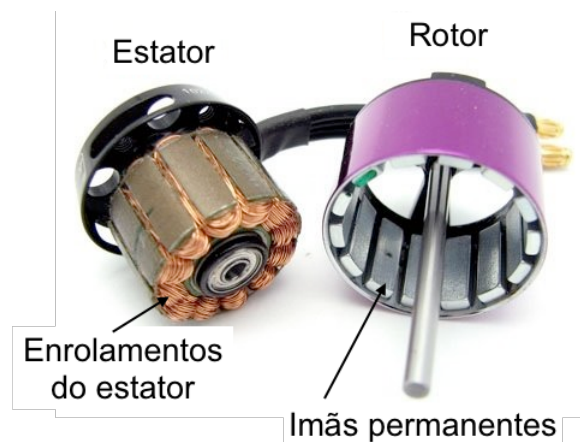


Figura 11 – Motor sem escovas de rotor externo.

Fonte: <https://www.researchgate.net>. Acesso em 28/07/2021.

4 Circuitos de Acionamento de Motores Sem Escovas

4.1 Introdução

A seguir será apresentado o circuito básico de acionamento de motores sem escovas, que consistem em um inversor de tensão, ou seja, um conversor cc-ca operando em alta frequência.

4.1 Circuito elétrico equivalente do motor sem escovas

O circuito elétrico equivalente do motor sem escovas é mostrado na Figura 12, onde se tem a representação das 3 fases do motor e seus elementos, quais sejam:

- Tensões e correntes nas fases – As tensões e correntes nas 3 fases do motor são representadas por v_A , v_B , v_C , i_A , i_B e i_C , para a fase A, B e C, respectivamente;
- Resistências dos enrolamentos – As resistências dos enrolamentos do estator são representadas por R_A , R_B e R_C , para cada fase respectivamente;

- Indutâncias equivalentes – As indutâncias equivalentes do motor são representadas por L_A , L_B e L_C ;
- Tensões induzidas – As tensões induzidas ou forças contra eletromotrizes são representadas por E_A , E_B e E_C .

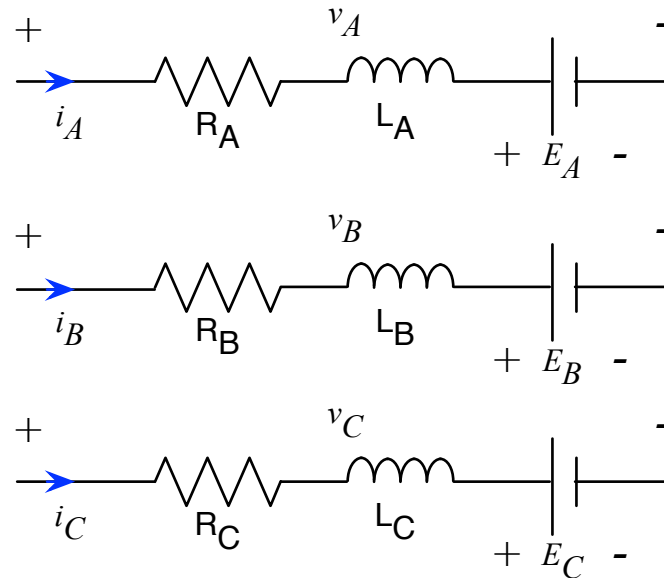


Figura 12 – Circuito equivalente de motor sem escovas.

Em geral o motor sem escovas possui 3 fios de conexão, 1 para cada fase, sendo que internamente pode ser realizada a conexão estrela ou triângulo, conforme mostrado na Figura 13.

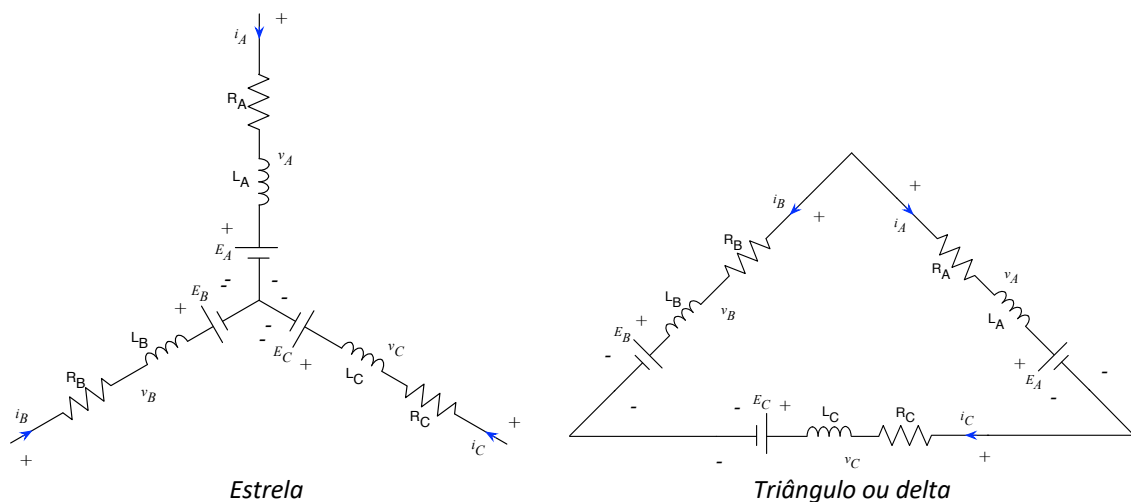


Figura 13 – Conexões estrela e triângulo das fases do motor sem escovas.

4.2 Acionamento de motores sem escovas

Os motores sem escovas são acionados por circuitos específicos de potência, pois seu funcionamento é diferente do motor de corrente contínua e do motor de passos, estudado anteriormente.

A Figura 14 mostra um diagrama de blocos exemplificando o acionamento de um motor sem escovas trifásico, ou seja, de 3 fases. As formas de onda mostradas são para os enrolamentos principais, das fases A, B e C, enquanto os enrolamentos dos polos opostos, A', B' e C', são alimentados por tensões em oposição de fase em relação aos sinais principais.

O circuito de potência tem por finalidade prover as amplitudes de tensão e de corrente adequadas para o funcionamento do motor, conforme suas especificações técnicas. Já o circuito lógico, a partir dos sinais dos sensores de posição e da velocidade e sentido de rotação desejados, gera os sinais de comando para o conversor de potência implementar o acionamento do motor.

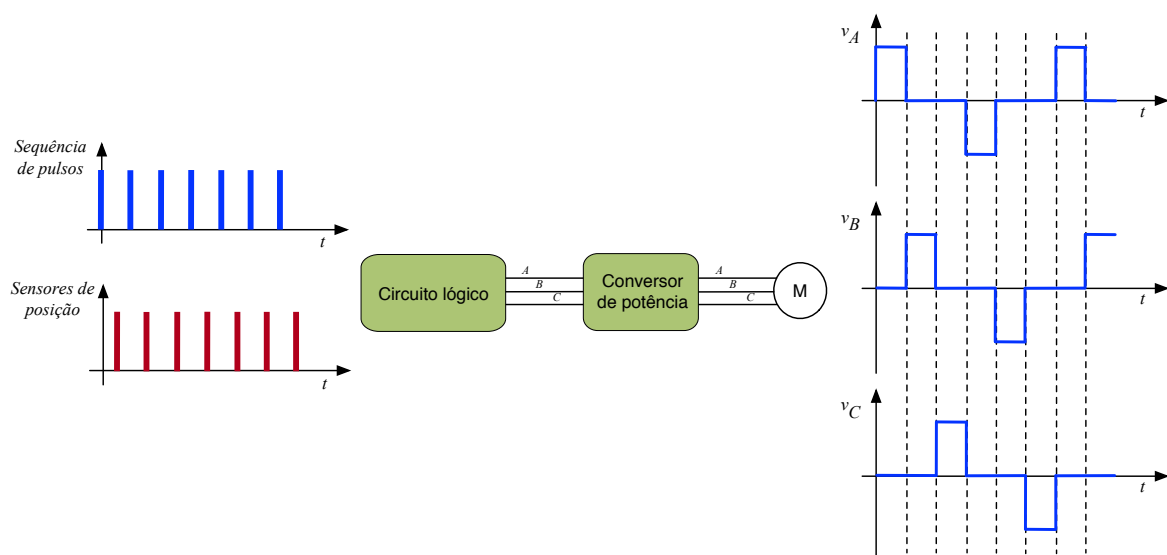


Figura 14 – Circuito de acionamento de motores sem escovas.

4.3 Conversor cc-ca para acionamento de motor sem escovas

A Figura 15 mostra um circuito de acionamento de motor sem escovas com 3 fases, isto é, trifásico. Este conversor é conhecido como ponte completa trifásico, com 6 transistores de potência com seus diodos de roda-livre, também em número de 6.

Os sinais de disparo dos transistores, ou seja, os sinais dos gatilhos dos mesmos, serão originados pelo circuito de acionamento dos mesmos, como mostrado na Figura 14 pelo bloco denominado de circuito lógico.

O detalhamento e projeto do conversor mostrado na Figura 15 não será apresentado aqui pela sua complexidade e por estar além do escopo deste Curso Básico de Acionamentos Eletrônicos.

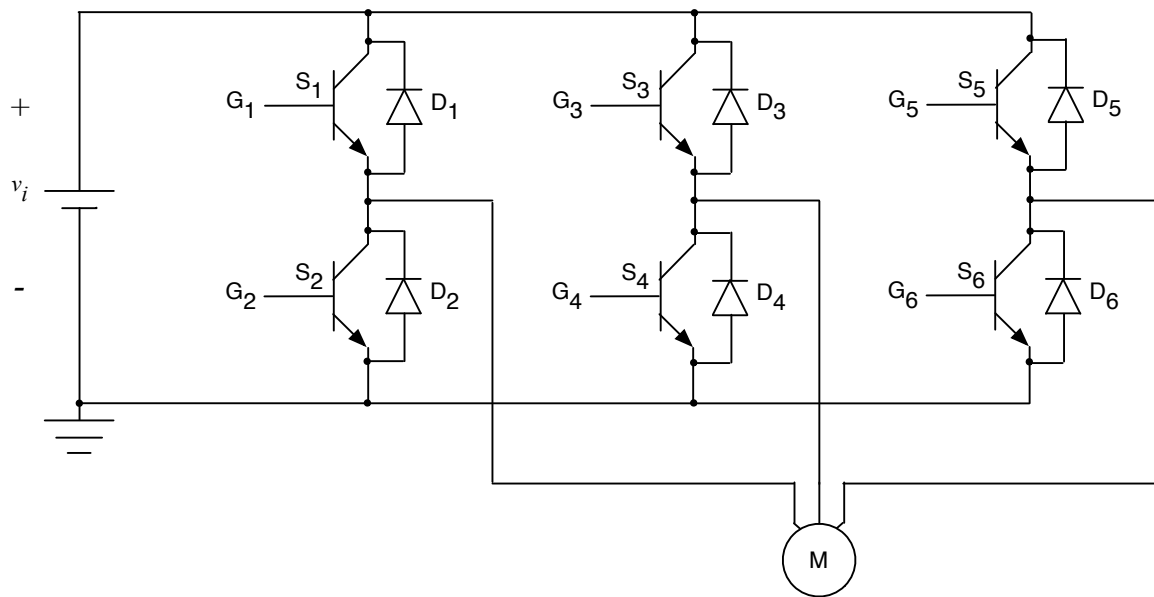


Figura 15 – Circuito de acionamento de motor sem escovas trifásico.

4.4 Acionamento de motor sem escovas com circuitos dedicados

A Figura 16 mostra um exemplo de diagrama de blocos com circuitos dedicados para acionamento de motores sem escova, englobando desde os elementos de potência, sensores e proteção.

Por sua vez, a Figura 17 um circuito com sua placa implementada, também para acionamento de motor sem escovas, para operar com tensões de entrada da rede de energia elétrica monofásica, com amplitude de 220 V, potência de 250 W, e controle com microcontrolador; destacando também os circuitos integrados para acionamento dos transistores de potência, sensores e proteção.

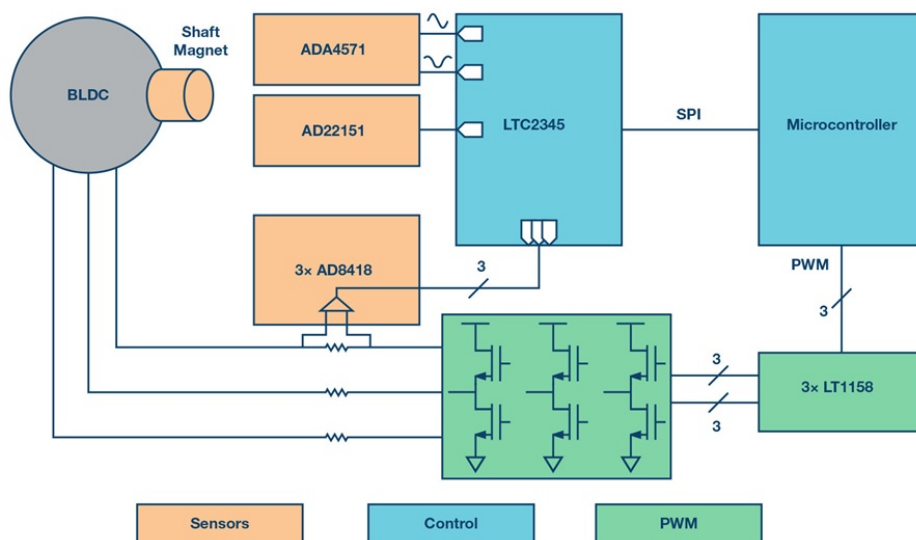


Figura 16 – Exemplo de diagrama de blocos com circuitos dedicados.

Fonte: Adaptado de <https://www.analog.com>. Acesso em 05/08/2021.

É interessante destacar que em ambos os circuitos e diagramas de blocos apresentados se utilizam microcontroladores, em função de sua flexibilidade para diferentes configurações e controle dos motores sem escovas, considerando que é necessário gerar um padrão sequencial de sinais para o comando do conversor de potência e posterior alimentação do motor.

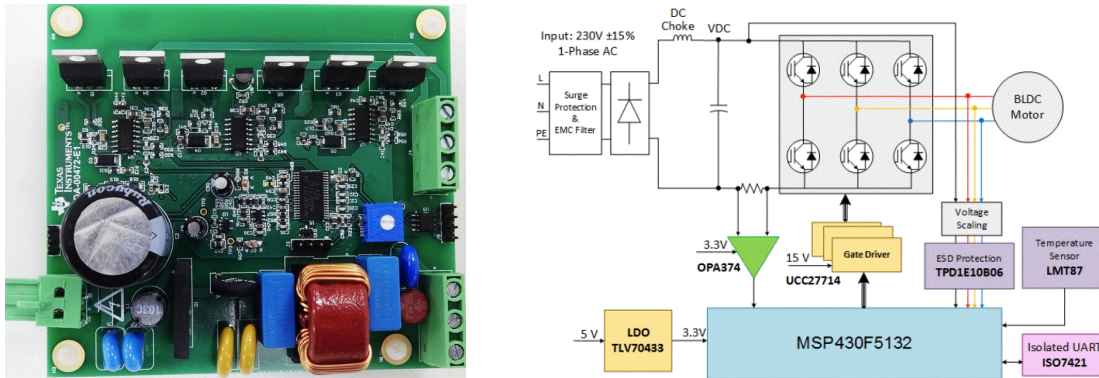


Figura 17 – Exemplo de drive de acionamento de motor sem escovas.

Fonte: Adaptado de <https://www.ti.com>. Acesso em 05/08/2021.

5 Exercícios

Exercícios Resolvidos

ER 01. Comente sobre as aplicações dos motores sem escovas?

Os motores sem escovas são utilizados quando se desejam altas e constantes velocidades, em aplicações como drones, aeromodelos, ferramentas elétricas, instrumentação, robótica, veículos elétricos, empilhadeiras, máquinas de costura, informática, dentre outras.

ER 02. Quais os tipos de motores de motores sem escovas?

Os motores sem escovas podem ser de 2 tipos: rotor interno (*inrunner*) e rotor externo (*outrunner*).

ER 03. Comente sobre o acionamento de motores sem escovas.

O acionamento de motores sem escovas é realizado por circuitos eletrônicos específicos, utilizando conversores de potência.

ER 04. Comente sobre algumas diferenças dos motores sem escovas em relação aos motores de corrente contínua?

As diferenças dos motores sem escovas em relação aos motores de corrente contínua são em termos de construção onde os primeiros não tem escovas, enquanto os últimos tem escovas e coletor comutador, velocidade de rotação e circuito de acionamento.

ER 05. Os motores sem escovas podem ser alimentados por uma tensão contínua fixa?

Não, pois neste caso o rotor ficará travado. Os motores sem escovas devem ser alimentados por pulsos de tensão aplicados aos seus enrolamentos, do mesmo modo que é feito nos motores de passo, mas agora sempre em sequência e utilizando como referência os sinais dos sensores de posição.

Exercícios Propostos

EP 01. Cite aplicações para os motores sem escovas?

EP 02. Comente sobre algumas características dos motores sem escovas.

EP 03. Em geral, quantas fases possuem os motores sem escovas?

EP 04. Quais as principais partes de um motor sem escovas?

EP 05. Comente sobre o acionamento de motores sem escovas.

6 Atividade Avaliativa

6.1 Introdução – O que preciso saber

Ao final deste objetivo de aprendizagem são apresentadas cinco questões, que devem ser respondidas sem consultar o material. Se você conseguir responder as questões e conferir as respostas com o gabarito abaixo, parabéns, você concluiu com êxito este tópico. Caso tenha errado alguma questão, revise o conteúdo relacionado com a mesma e refaça a questão, procurando se concentrar mais desta vez, para acertar o exercício e fixar bem o conteúdo.

AA 01. Cite algumas aplicações onde são utilizados os motores sem escovas.

AA 02. Comente sobre o conversor a ser utilizado para acionar motores sem escovas.

AA 03. Compare os motores sem escovas em relação aos motores de corrente contínua, em termos de manutenção.

AA 04. Qual a finalidade de se utilizar sensores de posição nos motores sem escovas?

AA 05. Como se altera a velocidade de um motor sem escovas?

AA 01. Os motores sem escovas são aplicados em drones, aeromodelos, ferramentas elétricas, instrumentação, robótica, veículos elétricos, empilhadeiras, máquinas de costura, informática, dentre outras utilizações.

AA 02. O conversor para acionamento dos motores sem escovas, em geral, é um conversor cc-ca (inversor de tensão), trifásico, utilizando semicondutores de potência como transistores e diodos.

AA 03. A manutenção dos motores sem escovas é mais simples do que nos motores de corrente contínua, pois estes não possuem escovas e coletor comutador.

AA 04. Os sensores de posição são utilizados para que os pulsos aplicados nos enrolamentos do motor tenham fase e largura adequada para manter a velocidade do motor constante.

AA 05. A velocidade do motor sem escovas é alterada modificando-se a frequência do sinal de comando dos interruptores, isto é, o tempo entre um pulso e outro, que são aplicados nos enrolamentos do motor.



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA

DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA

CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM ELETRÔNICA INDUSTRIAL

Acionamentos Eletrônicos



GUIA DE ESTUDO

- OBJETIVO DE APRENDIZAGEM - MÁQUINAS DE CORRENTE ALTERNADA

Prof. Clóvis Antônio Petry.

Florianópolis, agosto de 2021.

MÁQUINAS DE CORRENTE ALTERNADA

Objetivo de Aprendizagem

Estudar as máquinas de corrente alternada.

Objetivos parciais

- Conhecer o princípio de funcionamento das máquinas de corrente alternada;
- Conhecer os principais tipos de máquinas de corrente alternada;
- Conhecer as aplicações das máquinas de corrente alternada.

Aulas relacionadas

Este objetivo de aprendizagem está relacionado com a aula 11 da disciplina.

Pré-requisitos

Ter estudado o objetivo de aprendizagem 10 relacionado aos motores sem escovas.

Continuidade dos Estudos

O próximo objetivo de aprendizagem será o estudo do acionamento dos motores de indução monofásicos.

Roteiro para estudos

Os estudos referentes a este objetivo de aprendizagem consistem em:

1. Estudar este documento resumo, realizando as atividades propostas no mesmo;
2. Responder o quiz relacionado a este objetivo de aprendizagem;
3. Caso perceba necessidade, estudar a apresentação deste assunto ou consultar os livros texto indicados para esta disciplina;
4. Realizar os exercícios deste tópico da matéria;
5. Realizar a avaliação final para progredir ao próximo conteúdo.

Referências

- Material disponibilizado para a disciplina de Acionamentos Eletrônicos – 2021/1.
Departamento Acadêmico de Eletrônica, Instituto Federal de Santa Catarina, Campus Florianópolis.
- Kosow, Irving L. Máquinas Elétricas e Transformadores. 15ª edição. São Paulo: Globo, 2005.

Check-list

Caro estudante, verifique se você completou as atividades deste objetivo de aprendizagem e obteve êxito para continuar seus estudos.

Assinale as atividades realizadas:

Estudo do documento resumo:

- Leitura do documento resumo;
- Exercícios do documento resumo;
- Atividade avaliativa do documento resumo.
- Obtive êxito e entendi o conteúdo deste documento;
- Ainda não entendi bem o conteúdo e estudarei o mesmo com mais profundidade.

Estou com dúvidas, irei estudar com mais detalhes este conteúdo:

- Assistir a apresentação relacionada ao conteúdo (apresentação 11);
- Ler este guia de estudo (objetivo de aprendizagem 11).

Ainda estou com dúvidas:

- Entrarei em contato com o professor.

Obtive êxito, então seguirei em frente:

- Responder ao quiz deste conteúdo no Moodle;
- Informar ao professor que estou avançando com o conteúdo.

Parabéns, continue estudando com afinco e vamos em frente!!

CONTEÚDO

- OBJETIVO DE APRENDIZAGEM - MÁQUINAS DE CORRENTE ALTERNADA

1 Introdução

Os capítulos anteriores abordaram os aspectos e princípios gerais das máquinas elétricas rotativas, e na sequência as máquinas de corrente contínua, estudando-se os motores de corrente contínua, motores de passo e motores sem escovas (*brushless*).

A partir deste capítulo serão estudados os principais motores elétricos de corrente alternada, conhecidos como motores de indução, iniciando-se pelo motor monofásico e na sequência o motor trifásico.

Assim, este capítulo tem como objetivo o estudo das máquinas de corrente alternada (ca), com foco nos motores elétricos de indução monofásicos e trifásicos.

1.1 Conteúdo – O que irei estudar

Estudaremos neste tópico:

- Princípio de funcionamento das máquinas de corrente alternada;
- Principais tipos de máquinas de corrente alternada;
- Aplicações das máquinas de corrente alternada.

1.2 Metodologia – O que devo fazer e como fazer

Leia com atenção o conteúdo a seguir. Ao final deste tópico são apresentados exercícios resolvidos. Após são apresentados alguns exercícios propostos.

Ao realizar estas atividades e se sentir confiante para progredir, siga os passos indicados na primeira página deste documento.

Espera-se que após estudar este assunto, você consiga:

- Descrever o funcionamento de uma máquina de corrente alternada;
- Citar as principais partes de uma máquina de corrente alternada;
- Comentar sobre algumas aplicações das máquinas de corrente alternada.

A atividade avaliativa deste objetivo de aprendizagem consistirá em perguntar ao estudante para descrever o funcionamento de um motor de indução, por exemplo.

Exemplo de atividade avaliativa:

1. Explicar com suas palavras o funcionamento de um motor elétrico de indução monofásico ou trifásico.
2. Citar aplicações das máquinas de corrente alternada.
3. Comentar sobre as conexões dos motores de indução monofásicos.
4. Citar as principais partes de uma máquina de corrente alternada.

2 Máquinas de Corrente Alternada

2.1 Introdução

As máquinas elétricas de corrente alternada, diferente das máquinas de corrente contínua, são projetadas e construídas, especificamente para funcionarem como geradores ou como motores, conforme a aplicação desejada.

Este capítulo irá abordar o princípio de funcionamento das máquinas de corrente alternada, focando-se nos elementos comuns aos motores e geradores de corrente alternada.

2.1 Definição de motor elétrico de corrente alternada

O motor elétrico de corrente alternada é uma máquina elétrica rotativa que converte energia elétrica em energia mecânica para acionamento de cargas acopladas em seu eixo, sendo alimentado por uma fonte de alimentação em tensão alternada (ca).

2.2 Definição de gerador elétrico de corrente alternada

O gerador elétrico de corrente alternada é uma máquina elétrica rotativa que converte energia mecânica em energia elétrica a partir da rotação provida ao seu eixo, servindo como fonte de alimentação de circuitos em tensão alternada (ca).

2.3 Princípio de funcionamento da máquina de corrente alternada

A partir dos estudos realizados nos capítulos anteriores deste curso, especialmente sobre as máquinas de corrente contínua, pode-se lembrar que a partir da interação da força resultante sobre uma espira ou conjunto de espiras (bobina) conforme se observa na Figura 1, e o campo magnético no qual a espira está imersa, se terá duas possibilidades, que darão origem aos motores e aos geradores.

Os princípios motor e gerador são:

- Princípio motor – O princípio motor determina que um conjunto de espiras imerso em um campo magnético estará sujeito a uma força, denominada de Força de Lorentz;
- Princípio gerador – O princípio gerador, por sua vez, determina que uma espira ou bobina, imersa em um campo magnético variante no tempo, estará sujeita a uma corrente induzida, constituindo um gerador eletromagnético.

A diferença básica entre as máquinas de corrente contínua e as máquinas de corrente alternada é que o campo magnético gerado nos enrolamentos (bobinas) será variável nestas últimas, em virtude da variação senoidal da tensão de alimentação aplicada nos terminais de conexão dos motores, por exemplo.

A Figura 2 mostra o funcionamento do gerador de corrente alternada, mas onde o campo magnético é originado por ímãs permanentes. Esta construção tem o intuito de servir para explicar o funcionamento da máquina rotativa como gerador. Nota-se que a espira que constitui o rotor está conectada ao circuito externo por meio de escovas e anéis coletores.

A posição da espira em relação ao campo magnético, conforme mostrado na Figura 2 é de 90° , fazendo com que a tensão gerada tenha amplitude nula. Na sequência da Figura 2 tem-se a posição relativa entre a espira e as linhas de campo magnético dos ímãs permanentes em 0° , gerando uma tensão com amplitude máxima positiva.

A seguir, na Figura 3, tem as posições da espira em relação ao campo magnético em 90° e 0° novamente, gerando tensão nula e com amplitude máxima negativa, respectivamente. Em virtude do uso de coletor não-comutador, a tensão gerada é alternada.

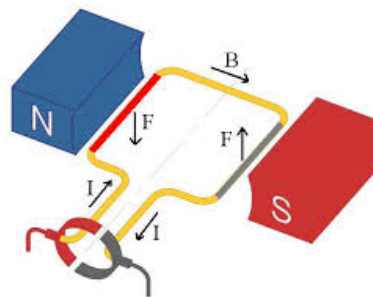


Figura 1 – Espira imersa em um campo magnético.

Fonte: <https://www.dt.fee.unicamp.br>. Acessado em 17/06/2021.

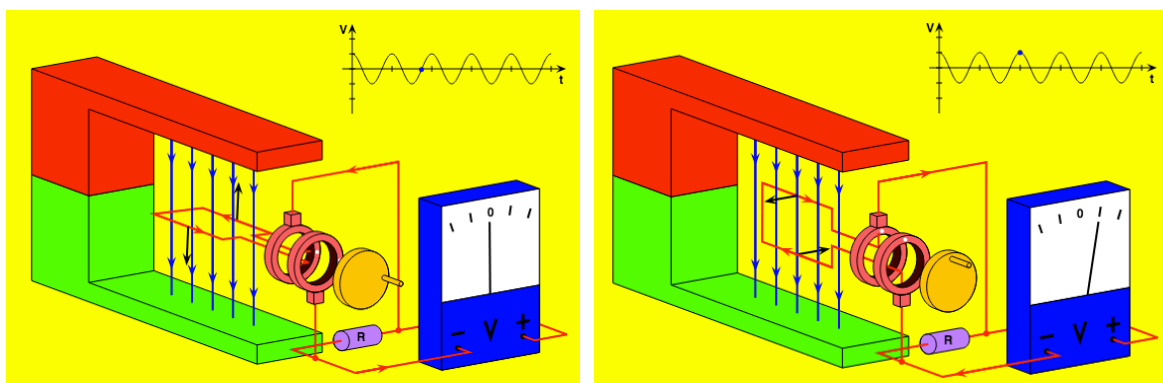


Figura 2 – Funcionamento do gerador de corrente alternada.

Fonte: <https://www.walter-fendt.de>. Acessado em 19/08/2021.

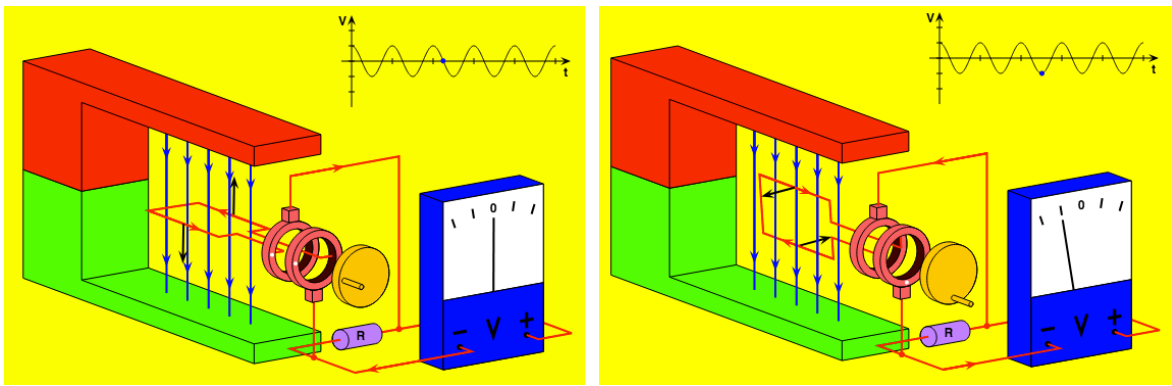


Figura 3 – Funcionamento do gerador de corrente alternada.

Fonte: <https://www.walter-fendt.de>. Acessado em 19/08/2021.

Anteriormente se estudou, com relação às máquinas de corrente contínua, que o uso de um coletor comutador, utilizando os demais elementos de maneira idêntica, que se gerava uma tensão contínua.

Ao usar coletor comutador, a tensão alternada é retificada mecânica pela troca de polaridade das conexões da espira com o circuito externo, configurando, de certa maneira, em uma conversão de tensão alternada (ca) em tensão contínua (cc), isto é, em um conversor cc-ca rotativo, em contraste com os retificadores utilizando diodos semicondutores, por exemplo.

2.4 Símbolos elétricos da máquina de corrente alternada

Os motores elétricos podem ter diferentes símbolos, mas em geral são representados por um círculo com a letra M de motor. A Figura 4 mostra o símbolo típico para um motor elétrico, identificando-se sua tensão e corrente. De modo similar, um gerador de corrente alternada terá símbolo semelhante, mas com a corrente saindo do mesmo e a letra G no interior do círculo, como mostrado na mesma figura. Em relação às máquinas de corrente contínua, é usual para máquinas de corrente alternada se utilizar o símbolo de uma senoide junto a letra M ou G, conforme mostrado na figura.

A polaridade da tensão e sentido da corrente indicadas na Figura 4 são instantâneas, visto se tratar de máquinas que operam com formas de onda alternadas.

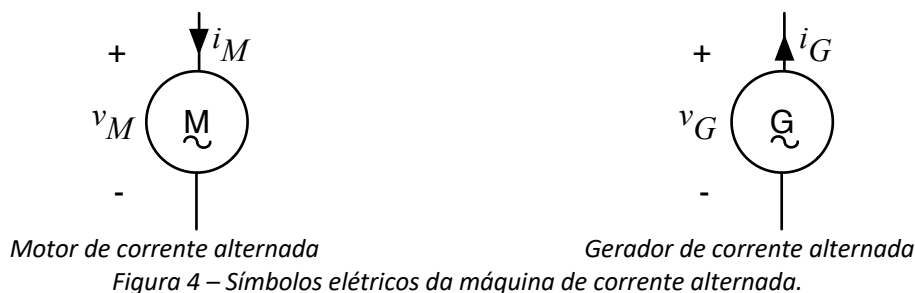


Figura 4 – Símbolos elétricos da máquina de corrente alternada.

2.5 Exemplos de máquinas de corrente alternada

A Figura 5 mostra exemplos de máquinas rotativas de corrente alternada, neste caso de um motor e de um gerador de corrente alternada. O gerador tem potência da ordem de 4,8 kW, com tensão de 48 V e corrente de 100 A, aplicado em geração de energia elétrica a partir da energia eólica. Por sua vez, o motor de corrente contínua com ímãs permanentes, tem potência de 200 W e tensão de alimentação de 90 V.

Os exemplos mostrados são de máquinas de potência baixa, indo de centenas de watts até alguns quilowatts. Em diferentes aplicações podem se encontrar motores e geradores desde potências de alguns watts, denominadas de potências fracionárias, pois são menores do que 736 watts, que é a potência de 1 cv (cavalo vapor), até milhares de quilowatts, em usos específicos de potências muito altas.



Motor de corrente alternada



Gerador de corrente alternada

Figura 5 – Exemplos de máquinas de corrente alternada.

Fonte: <https://www.novamotores.com.br> e <https://www.bosch.com.br>. Acesso em 19/08/2021.

2.6 Construção de máquinas de corrente alternada

A construção de uma máquina de corrente alternada pode ter alterações conforme seu tipo, aplicação, potência e tecnologias empregadas.

Os geradores de corrente alternada, a exemplo de um alternador para uso em automóveis, conforme mostrado na Figura 6, possui uma construção mais complexa, em relação ao motor de corrente alternada mostrado na Figura 7.

As principais partes de uma máquina de corrente alternada são:

- Estator – É a parte fixa da máquina, sendo construído de material ferromagnético, em geral de chapas de ferro-silício, possuindo ranhuras que irão alojar os condutores dos enrolamentos. O número de bobinas do estator irá variar conforme se tratar de um gerador, motor monofásico, bifásico ou trifásico, e levando em conta também o número de polos magnéticos da máquina;
- Rotor – É a parte móvel da máquina transmitindo movimento pelo eixo do

mesmo, no caso de motores, ou recebendo movimento no caso de geradores. Também possui um conjunto de lâminas de aço ou ferro silício formando ranhuras, que irão alojar as espiras, onde estas podem ser de fios ou barras de cobre ou alumínio, compondo os enrolamentos do rotor;

- Coletor com anéis – Elemento que conecta o bobinado da parte móvel (rotor) ao circuito externo por meio das escovas;
- Escovas – Constituídas de carvão grafite ou carbono, permitem conectar os contatos do comutador ao circuito externo, sem afetar seu movimento, provendo contato por pressão, ocorrendo atrito entre os mesmos e desgaste ao longo do tempo.

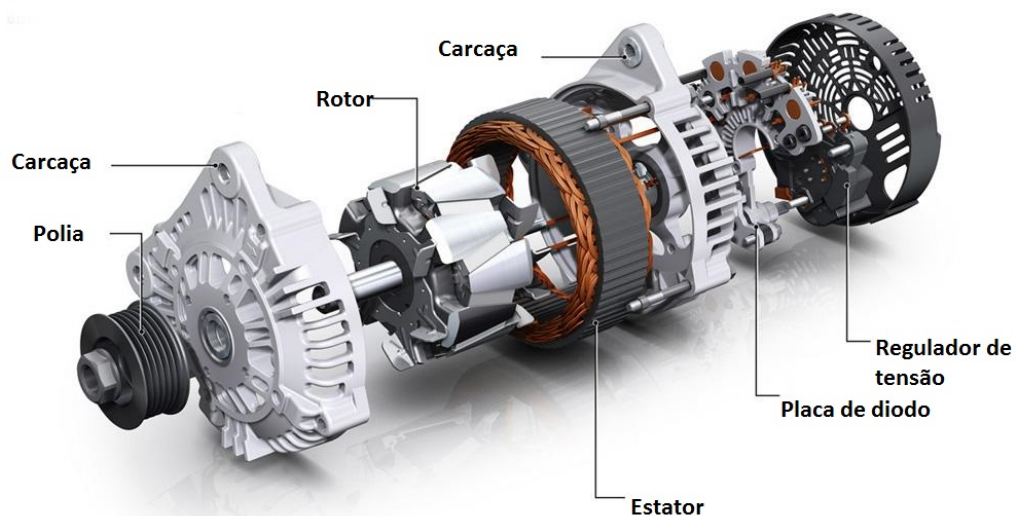


Figura 6 – Principais partes de um gerador de corrente alternada.

Fonte: <https://www.bosch.com.br>. Acesso em 19/08/2021.

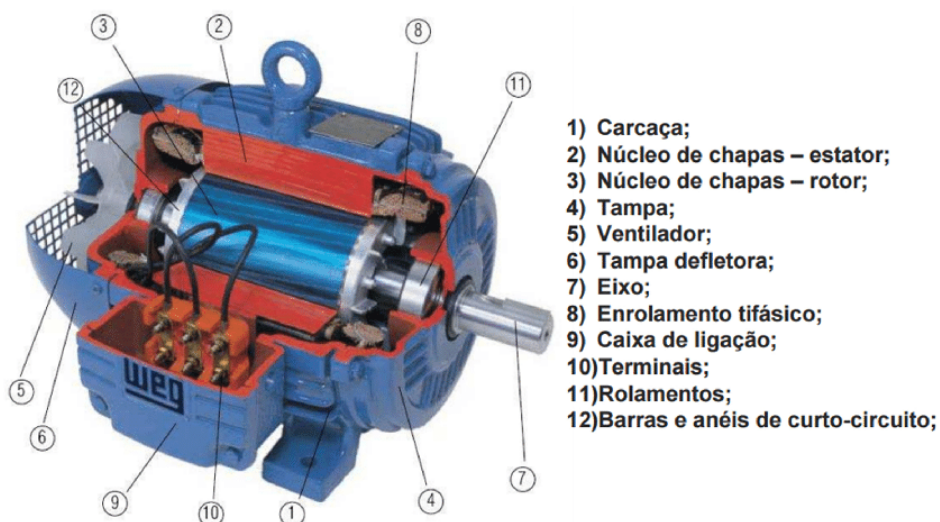
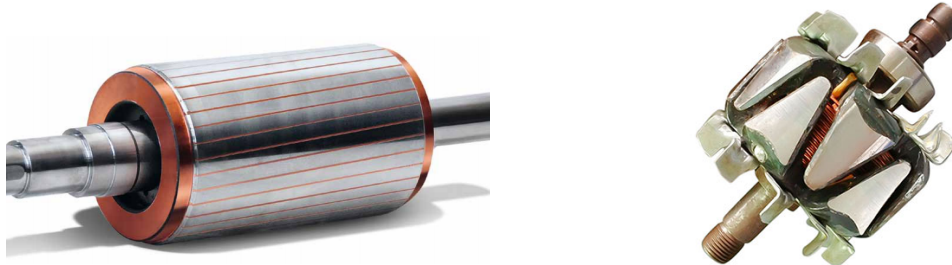


Figura 7 – Principais partes de um motor de corrente alternada.

Fonte: <https://www.weg.net>. Acesso em 19/08/2021.

A Figura 8 mostra exemplos de rotores de máquinas de corrente alternada, tendo o rotor do tipo gaiola de esquilo, formado por anéis que curto-circuitam as lâminas condutoras, empregado em motores de indução monofásicos e trifásicos; e o rotor bobinado com anéis coletores, utilizado em alternadores para automóveis, por exemplo.



Rotor gaiola de esquilo

Rotor bobinado

Figura 8 – Tipos de rotores de máquinas de corrente alternada.

Fonte: <https://www.fundicaobitencourt.com.br> e <https://www.bosch.com.br>. Acesso em 19/08/2021.

3 Geradores de Corrente Alternada

3.1 Introdução

A seguir se apresentam aspectos particulares dos geradores de corrente alternada, do ponto de vista de seu funcionamento e aplicações, de maneira resumida, visto este curso focar no acionamento eletrônico, principalmente aplicado aos motores elétricos.

3.2 Funcionamento do gerador de corrente alternada

Um gerador elementar, conforme mostrado na Figura 9, que possui apenas uma espira, terá em sua saída uma corrente induzida, conforme a posição relativa do plano da espira em relação ao campo magnético dos ímãs permanentes ou eletroímãs do estator.

O sentido da corrente elétrica, conforme os trechos da espira, de a até b, b até c e c até d, pode ser determinado a partir da Regra de Fleming, conforme estudados nos capítulos anteriores deste curso.

Assim, para os trechos de a até b e c até d, tem-se que se o plano formado pela espira estiver na posição 0, a tensão induzida será nula, pois o ângulo entre a mesma e o campo magnético é zero, pois a tensão induzida depende do valor do seno do ângulo entre as linhas de campo magnético e o plano formado pela bobina, conforme visto nas Figura 1 e Figura 2.

Por outro lado, quando a bobina estiver na posição 2 o ângulo será de 90° , com seno valendo um, e a tensão gerada será máxima positiva.

As posições 1 e 3 serão intermediárias, com ângulos de 45° e 135° e amplitudes de tensão

maiores que zero e menores que o valor máximo. Ao se posicionar a bobina em 4, o ângulo será de 180° e o valor de tensão será nulo de maneira idêntica à posição 0.

Por sua vez, ao se percorrer as posições de 4 até 0, passando por 5, 6 e 7, a tensão gerada será negativa, caracterizando o funcionamento como um gerador de corrente alternada.

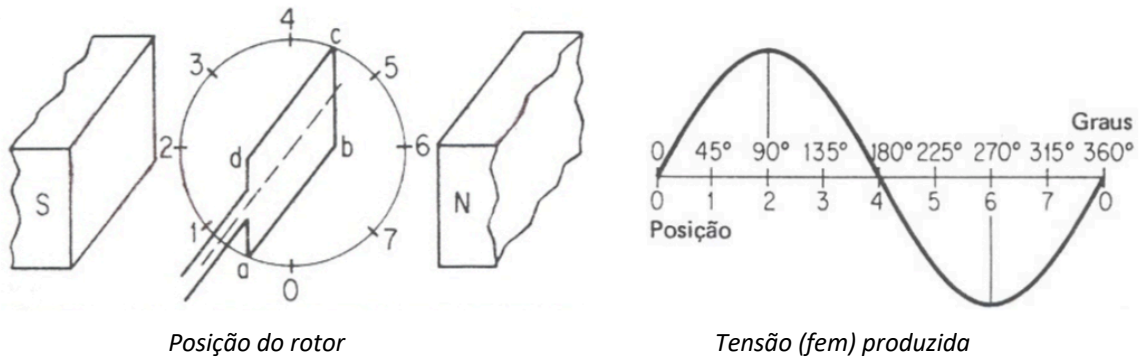


Figura 9 – Funcionamento do gerador de corrente alternada.

Fonte: (Kosow, 2005).

3.3 Aplicações dos geradores de corrente alternada

Os geradores de corrente alternada possuem inúmeras aplicações, tais como: sistemas de alimentação de emergência, sistemas de geração de aeronaves, barcos e veículos, geração de energia (hidroelétrica, térmica, eólica, etc), geração de energia alternativa, dentre outras.

A Figura 10 mostra exemplos de geradores de corrente alternada para diferentes aplicações e níveis de potências. Por exemplo, o gerador eólico ou roda d'água tem potência da ordem de $\frac{1}{2}$ kW, enquanto o grupo gerador, formado por motor diesel e gerador de corrente alternada, tem potências de dezenas de kW até centenas de kW, sendo utilizado para alimentação de cargas em diferentes situações, como alimentação de emergência, espetáculos de entretenimento, dentre outras.



Gerador eólico ou para roda d'água



Gerador de alta potência

Figura 10 – Exemplos de geradores de corrente alternada.

Fonte: <https://www.enersud.com.br> e <https://www.cummins.com.br>. Acesso em 13/07/2021.

4 Motores de Corrente Alternada

4.1 Introdução

A seguir se apresentam aspectos particulares dos motores de corrente alternada, conhecidos como motores de indução, do ponto de vista de sua construção e funcionamento, além de suas aplicações e tipos.

Os motores de indução são assim denominados por operarem em corrente alternada, e, em virtude da variação da corrente no tempo, pois as formas de onda da tensão e da corrente são senoidais, se tem variação de fluxo magnético também no tempo, fazendo com que condutores, espiras ou bobinas inseridas na região de linhas de campo magnético do estator, sofram a indução de correntes, conforme os princípios das Leis de Faraday e Lenz. Assim, o estator induz correntes no rotor, gerando-se um campo magnético e que irá interagir com o campo magnético do estator, podendo ou não provocar o giro do eixo do motor, por exemplo.

4.2 Princípio de funcionamento do motor de indução

A Figura 11 mostra um dispositivo elementar, formado por um ímã permanente preso em um fio, com capacidade de ser girado ao redor de seu eixo. Em frente aos polos do ímã é montado um disco de material condutor (cobre ou alumínio), fixado de tal forma que possa girar livremente. Na parte inferior, após o disco, é montada uma placa de material ferromagnético, para fechar o caminho magnético, isto é, concentrar as linhas de campo entre os polos norte e sul do ímã permanente, passando pelo disco de material condutor.

Ao se girar o ímã permanente, irá ocorrer variação de fluxo, fazendo com que no disco, visto ser de material condutor, apareçam correntes induzidas. Estas correntes induzidas são denominadas de correntes parasitas. A tensão induzida no disco e por conseguinte as correntes parasitas, conforme a Lei de Lenz, será no sentido de o campo magnético produzido ser em oposição ao campo magnético do ímã permanente, isto é, em oposição ao movimento que produziu a tensão induzida.

Assim, a partir da interação entre os campos magnéticos (do ímã e induzido no disco) se terá o surgimento de uma força eletromagnética, que fará o disco girar, justamente pela atração e repulsão entre os polos do ímã e eletroímãs induzidos no disco. Deste modo, o disco irá acompanhar o sentido de giro do ímã permanente, mostrando de maneira simples, o funcionamento do motor de indução.

Ao manter o ímã permanente parado, não haverá mais variação de fluxo e cessará a indução de tensão e correntes parasitas no disco, desaparecendo o campo magnético induzido,

fazendo com que o disco pare de girar.

Ainda, conforme o sentido de giro do ímã permanente, o disco seguirá o movimento inicial do campo indutor, movimentando-se então conforme o ímã for movimentado.

Este exemplo básico para explicar o princípio da indução e a rotação provocada em um disco (rotor) é ilustrativo para mostrar que no motor de indução, o campo magnético do rotor é induzido pelo estator, sendo que este último será alimentado por uma rede de alimentação alternada, ocorrendo naturalmente a variação de fluxo, não sendo utilizados ímãs permanentes, tampouco fazendo-se seu deslocamento mecanicamente.

A Figura 12 mostra exemplos de motores e dispositivos que utilizam o princípio de funcionamento do motor de indução, conforme explicado anteriormente. Em destaque, o medidor de energia elétrica utiliza um disco de alumínio, que gira pelo princípio explicado a partir da Figura 11, valendo-se da corrente que circula entre a rede de energia elétrica e a unidade consumidora, além da tensão da rede de alimentação, para prover rotação a medida que a corrente consumida for maior, tornando o mecanismo um contador, isto é, registrando o consumo de energia elétrica conectado na saída do instrumento de medidas.

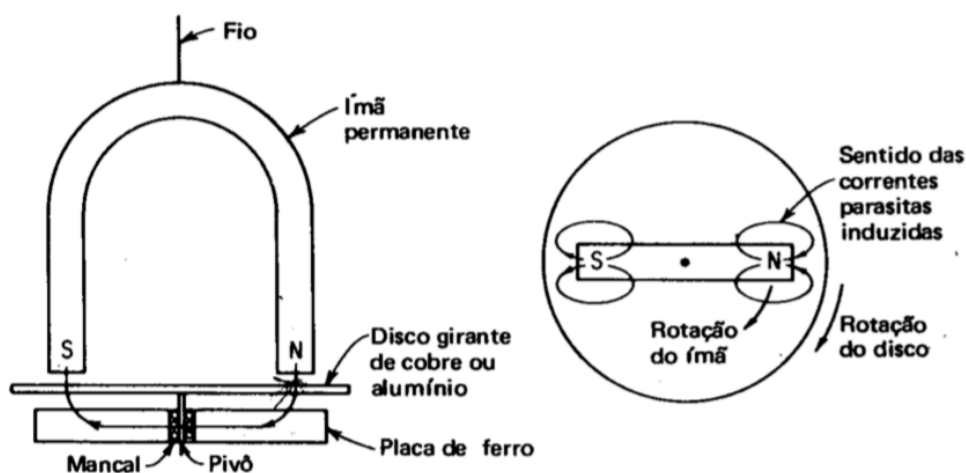
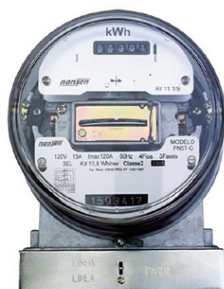


Figura 11 – Funcionamento do motor de corrente alternada.

Fonte: (Kosow, 2005).



Medidor de energia elétrica



Motor monofásico



Motor trifásico

Figura 12 – Exemplos de uso do princípio do motor de indução.

Fonte: <https://www.eletricanardini.com.br> e <https://www.weg.net>. Acesso em 19/08/2021.

4.3 Circuito elétrico do motor de corrente alternada

O circuito elétrico de um motor trifásico de indução, obtido por fase e visto pelo estator, é mostrado na Figura 13, onde se tem:

- Tensão nos terminais por fase (v_1) – Tensão terminal por fase do motor;
- Tensão induzida no estator por fase (v_2) – Tensão equivalente interna da máquina;
- Correntes do motor (i_1, i_2, i_{cm}) – Correntes na entrada, de magnetização e de perdas no motor e no rotor da máquina;
- Resistência do enrolamento (R_1) – Resistência do enrolamento por fase no estator;
- Resistência do enrolamento (R_2) – Resistência do enrolamento por fase;
- Perdas no núcleo (R_c) – Resistência que representa as perdas no núcleo do motor;
- Reatância de dispersão (X_1) – Reatância de dispersão por fase no estator;
- Reatância de dispersão (X_2) – Reatância de dispersão por fase no rotor;
- Reatância de magnetização (X_m) – Reatância de magnetização por fase do motor;
- Velocidade do rotor (s) – Velocidade de giro do rotor.

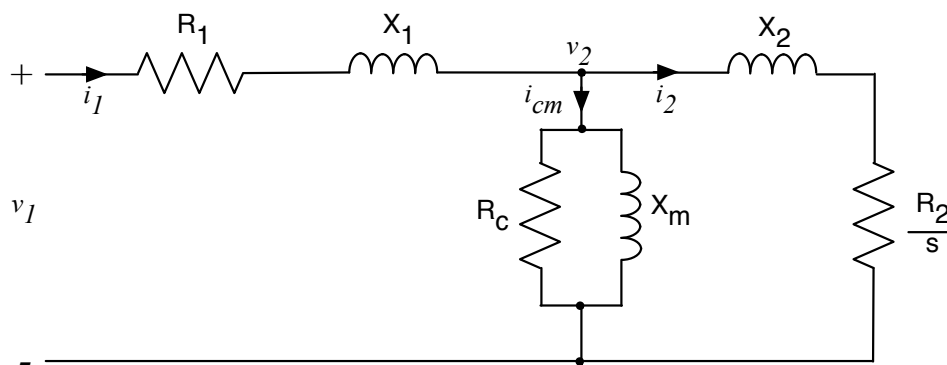


Figura 13 – Circuito elétrico equivalente de uma fase de um motor trifásico.

4.4 Campo girante no motor trifásico

A Figura 14 mostra um motor trifásico conectado em um circuito de alimentação também trifásico. As correntes nas fases A, B e C estão defasadas de 120° entre si, tendo amplitude variável com formato senoidal. A figura mostra 6 instantes diferentes, para um ciclo (período) completo da tensão senoidal de alimentação.

Os enrolamentos montados no estator, conforme a Figura 14 estão montados com um defasamento geométrico de 120° entre si. Assim, tem-se a defasagem elétrica entre as correntes nas 3 fases do motor e a defasagem geométrica pela montagem espaça de 120° entre os enrolamentos de cada fase.

As Figura 15 e Figura 16 mostram os fluxos e campos magnéticos nos enrolamentos de cada fase e para os diferentes instantes de tempo (1 até 6), onde se pode notar que o vetor que representa o fluxo magnético resultante gira no sentido horário, conforme a corrente elétrica variar ao longo de um ciclo completo.

A partir das Figura 15 e Figura 16 é possível concluir que um enrolamento trifásico no estator produz um campo magnético girante constante, com velocidade correspondente à frequência do circuito de alimentação do motor.

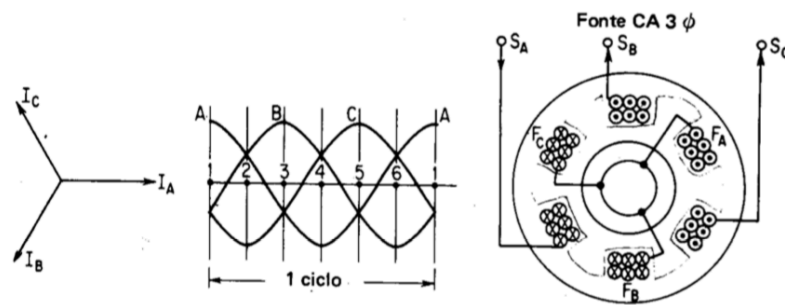
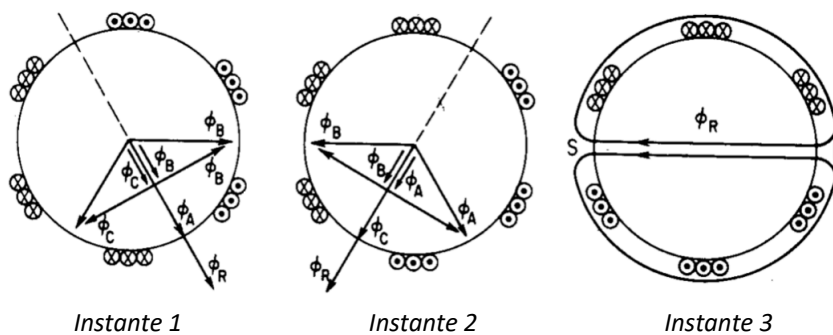


Figura 14 – Campo girante em um motor trifásico.

Fonte: (Kosow, 2005).



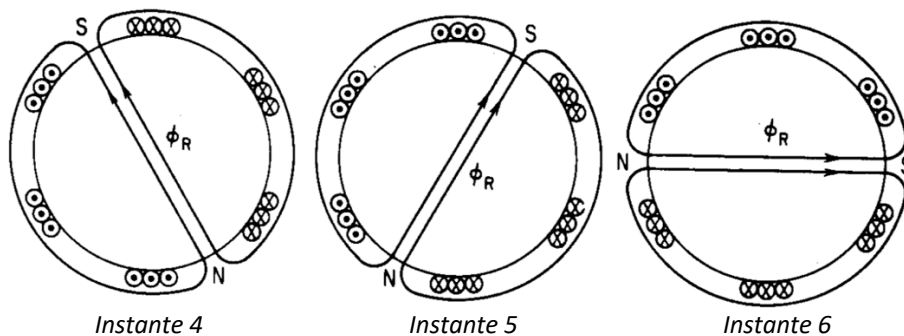
Instante 1

Instante 2

Instante 3

Figura 15 – Campo girante em um motor trifásico.

Fonte: (Kosow, 2005).



Instante 4

Instante 5

Instante 6

Figura 16 – Campo girante em um motor trifásico.

Fonte: (Kosow, 2005).

Este exemplo da Figura 14 produziu 2 polos, com 6 ranhuras para alojar o enrolamento trifásico, enquanto os exemplos da Figura 17 são para 4 e 6 polos.

A velocidade girante ou síncrona é calculada por:

$$N_s = \frac{120 \cdot F}{P} [\text{rpm}]$$

Onde:

- N_s – Velocidade do campo girante, denominada de velocidade girante ou síncrona em rotações por minuto (rpm);
- F – Frequência da rede de alimentação em Hertz;
- P – Número de polos formados no estator.

Assim, para o motor da Figura 14 com 2 polos se terá uma velocidade de 3600 rpm, e para os motores da Figura 17 se terá 1800 rpm para o motor de 4 polos e 1200 rpm para o motor de 6 polos.

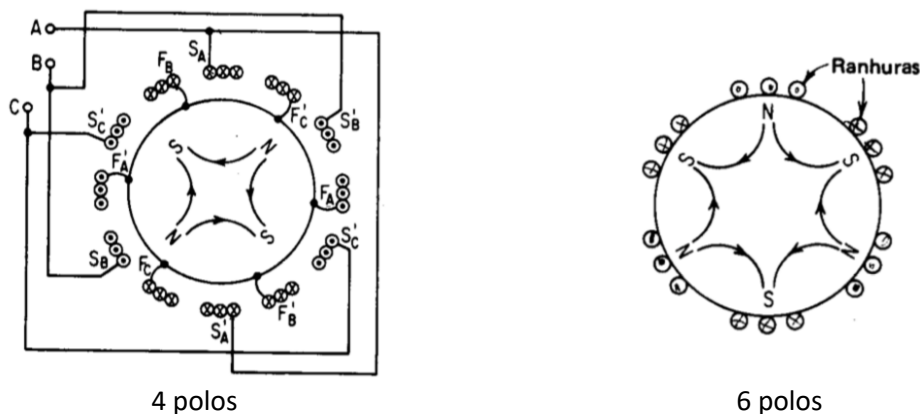


Figura 17 – Campo girante com diferente número de polos magnéticos.

Fonte: (Kosow, 2005).

A partir do que foi estudado considerando a Figura 11, verificou-se que a velocidade do disco (rotor) em relação a velocidade do campo girante (ímã permanente sendo girado) precisa ser menor, para que se tenha variação de fluxo e indução, promovendo o funcionamento do motor.

Assim, a diferença de velocidade entre o campo girante e a velocidade do rotor é denominada de escorregamento, calculado percentualmente por:

$$s = \frac{(N_s - N_r)}{N_s} \cdot 100 [\%]$$

Onde:

- s – Escorregamento percentual da máquina;
- N_s – Velocidade do campo girante, denominada de velocidade girante ou síncrona em rotações por minuto (rpm);
- N_r – Velocidade do rotor em rotações por minuto (rpm).

Assim, a título de exemplo, se um motor tiver velocidade síncrona de 1200 rpm e velocidade no rotor de 1000 rpm, então o escorregamento será de 16,7%.

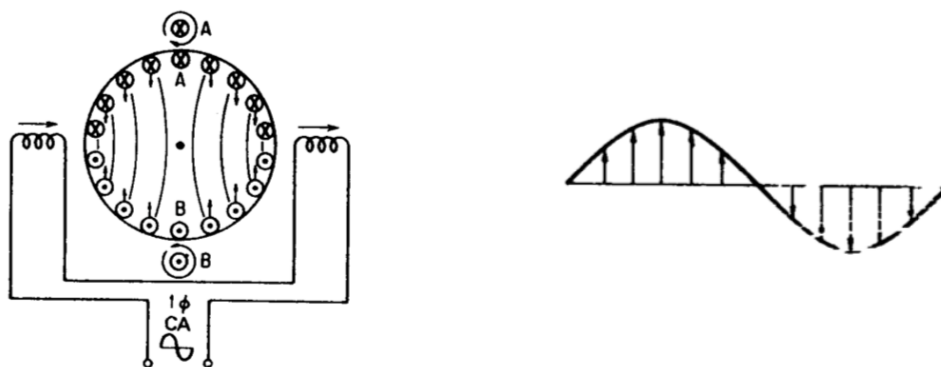
4.5 Campo girante no motor monofásico

Um motor monofásico é conectado na rede de alimentação de energia elétrica, em geral nos condutores fase e neutro. Assim, a alimentação do motor é realizada por uma tensão senoidal apenas, não se tendo a defasagem elétrica entre diferentes tensões nas fases, como anteriormente mostrado para o motor trifásico.

O campo magnético produzido pelos enrolamentos do motor monofásico é semelhante aquele produzido por uma das fases do motor trifásico, conforme mostrado nas Figura 14, Figura 15 e Figura 16.

A Figura 18 mostra o campo magnético produzido pelo enrolamento do estator, apontando da esquerda para a direita. Este campo varia de intensidade conforme a tensão de alimentação variar senoidalmente. As correntes induzidas no rotor, e conforme a Lei de Lenz, com sentido tal a criarem um campo que se opõe ao campo magnético indutor, tem sentido entrando em A e saindo em B, originando um campo que aponta da direita para a esquerda.

O torque produzido será pulsante, mas não girante, não provando o giro do rotor, como visto anteriormente para o motor trifásico, concluindo-se que um motor monofásico não fará o rotor girar naturalmente pela alimentação do enrolamento do estator.



Torques no rotor do motor

Torque pulsante

Figura 18 – Torques em um motor monofásico com rotor em gaiola de esquilo.

Fonte: (Kosow, 2005).

Assim, um motor monofásico ao ser ligado à rede de energia elétrica, não tem capacidade de promover a rotação em seu eixo de maneira natural, apenas a partir do enrolamento do estator e da indução de correntes no rotor, pois o torque será pulsante, mas estacionário.

Ao iniciar o giro do rotor por algum método, por exemplo impulsionando mecanicamente o mesmo, se terá um torque resultante diferente de zero, como mostrado na Figura 19, pois os fluxos magnéticos do estator (ϕ_f) e no rotor (ϕ_r) permitirão obter a componente resultante não nula (ϕ_r), como mostrado na figura.

Deste modo, se o rotor estiver girando, então o motor monofásico de indução tem capacidade de manter seu funcionamento correto, isto é, o campo magnético do estator irá induzir um campo magnético no rotor, produzindo um fluxo magnético resultante diferente de zero e um torque que permitirá ao eixo continuar seu sentido de giro inicial.

A partir daí se pode concluir que os motores monofásicos de indução necessitam de algum método que auxilie em sua partida, para então operarem adequadamente, diferente dos motores trifásicos, que possuem torque para girar o rotor a partir do momento que são ligados na rede de energia elétrica.

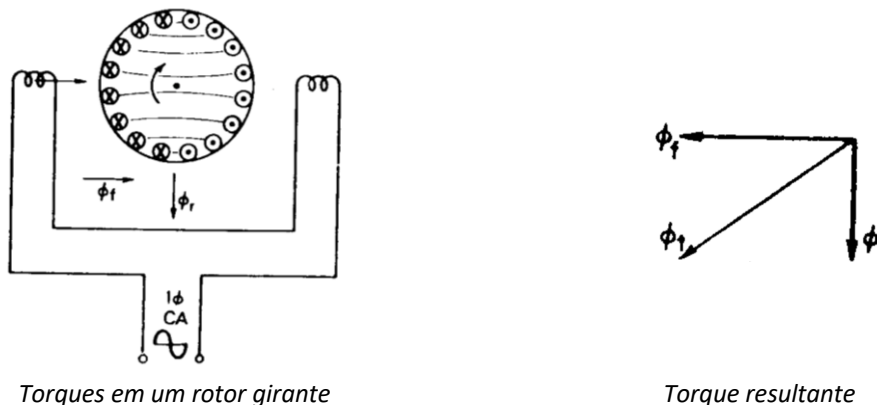


Figura 19 – Torques em um motor monofásico com rotor em gaiola de esquilo com o rotor em movimento.

Fonte: (Kosow, 2005).

5 Tipos e Aplicações de Motores de Indução

5.1 Introdução

Os motores de indução podem ser monofásicos, bifásicos ou trifásicos, se for considerado o número de fases para alimentação dos mesmos, sendo amplamente utilizados nas mais diferentes aplicações.

A seguir serão apresentados alguns modelos de motores monofásicos e trifásicos, não buscando-se exaurir o assunto em virtude da ampla gama de opções disponíveis no mercado.

5.2 Motores monofásicos

Os motores monofásicos podem ser de diferentes tipos conforme o sistema auxiliar de partida empregado para prover a rotação inicial ao eixo do motor.

A seguir serão apresentados alguns exemplos de motores monofásicos de indução, de pequena potência, entendendo-se, neste caso, que tenham potências fracionárias, isto é, menores que 1 cv. No entanto, são fabricados motores monofásicos com potências maiores também, para uso onde estiver disponível apenas uma tensão de alimentação monofásica. Em geral, quando estiver disponível uma rede de alimentação trifásica, torna-se interessante a utilização de motores trifásicos, pois são de construção simples e dispensam elementos auxiliares de partida.

Os motores monofásicos de baixa potência são amplamente utilizados em circuitos onde se tem disponível a alimentação a dois fios, isto é, monofásica ou bifásica, como no interior das residências, por exemplo.

5.2.1 Motor monofásico de fase auxiliar ou fase dividida

O motor monofásico de fase auxiliar ou fase dividida possui dois enrolamentos, um deles, identificado como principal (E_{n_p}) e outro como auxiliar (E_{n_a}), conforme mostrado na Figura 20. O enrolamento auxiliar é montado geometricamente defasado do enrolamento principal, além de ter impedância distinta do primeiro, gerando assim uma defasagem entre a corrente que circula em cada enrolamento e conseqüentemente no fluxo magnético produzido. Em virtude da defasagem entre os campos magnéticos principal e auxiliar, surge um torque resultante diferente de zero, aproximando o funcionamento do motor monofásico daquele de um motor bifásico, por exemplo.

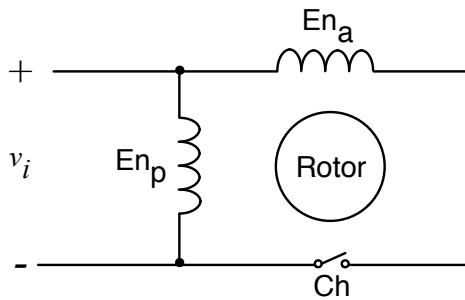
Assim, em virtude do enrolamento auxiliar, é possível fazer a partida do motor monofásico, mantendo a rotação após se atingir velocidade acima da necessária para que o mesmo tenha torque resultante diferente de zero.

O enrolamento de auxiliar ou de partida é projetado para operar por alguns instantes, podendo ser desligado após o motor atingir determinada velocidade, o que será feito por uma chave centrífuga (Ch) ligada em série com este enrolamento. Assim, com o rotor parado a chave estará fechada e quando o motor partir e o rotor atingir velocidade suficiente, pela ação da força centrípeta sobre as massas do mecanismo da chave, esta irá abrir, desligando o enrolamento auxiliar.

Os motores monofásicos de fase auxiliar não permitem a reversão da rotação enquanto estiverem em funcionamento, pois como o rotor acompanhará o campo girante do estator, não se tem torque suficiente para vencer a inércia de seu eixo no sentido contrário ao da rotação inicial. Para inverter o sentido de giro, será necessário inverter o sentido da corrente elétrica no

enrolamento auxiliar, pela inversão de sua conexão elétrica, o que deverá ser feito por dispositivos adequados, conforme será estudado no próximo capítulo.

O torque de partida dos motores com fase auxiliar não é elevado, sendo então utilizados em aplicações onde são exigidas poucas partidas e baixo conjugado de partida, como em ventiladores, sistemas de bombeamento de água, bombas comerciais e industriais, bombas centrífugas, bombas hidráulicas, polidores, compressores, máquinas de escritório, dentre outras.



Circuito simplificado do motor



Exemplo de motor de fase dividida

Figura 20 – Motor monofásico de fase dividida.

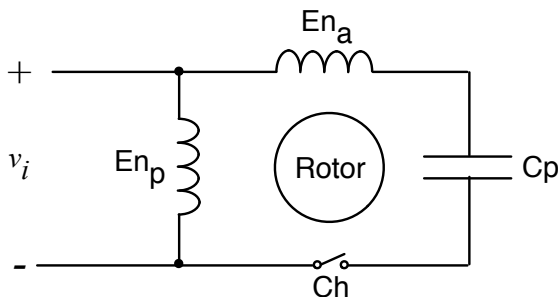
Fonte: Adaptado de <https://www.novamotores.com.br> e <https://www.weg.net>. Acesso em 19/08/2021.

5.2.2 Motor monofásico com capacitor de partida

A Figura 21 mostra o circuito interno simplificado e o aspecto típico de um motor monofásico com capacitor de partida. Os elementos são semelhantes aqueles do motor monofásico de fase dividida, mas agora com a presença do capacitor (C_p) em série com o enrolamento auxiliar.

As correntes elétricas nos enrolamentos principal e de partida estarão defasadas com ângulo de 90° aproximadamente, gerando maior torque de partida. Após a partida do motor, o circuito auxiliar formado pelo capacitor de partida e pelo enrolamento auxiliar será desligado pela atuação da chave centrífuga.

Os motores monofásicos com capacitor de partida, por terem maior torque de partida, são utilizados, por exemplo, em bombas, compressores, lavadoras de roupas, geladeiras industriais, ventiladores, trituradores, dentre outras aplicações.



Circuito simplificado do motor



Exemplo de motor de com capacitor de partida

Figura 21 – Motor monofásico com capacitor de partida.

Fonte: Adaptado de <https://www.novamotores.com.br> e <https://www.weg.net>. Acesso em 19/08/2021.

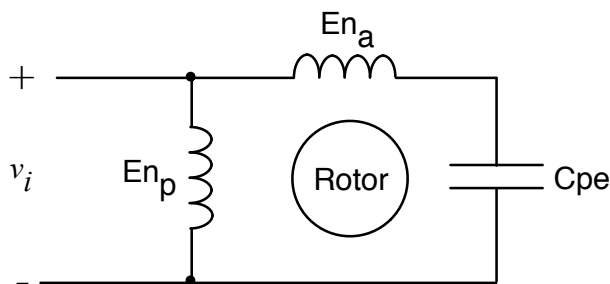
5.2.3 Motor monofásico com capacitor permanente

A Figura 22 apresenta o circuito simplificado e o aspecto do motor monofásico com capacitor permanente, notando-se a ausência da chave centrífuga. Assim, o enrolamento auxiliar e o capacitor permanente (Cpe) permanecem conectados durante toda a operação do motor.

Em virtude da presença constante do circuito auxiliar (enrolamento auxiliar e capacitor permanente), estes motores tem torque máximo e rendimento elevados e melhor fator de potência, se comparado aos motores monofásicos de fase dividida e capacitor de partida. A ausência da chave centrífuga diminui os ruídos na partida do motor e aumenta a vida útil do mesmo, pois não se tem elementos móveis no circuito auxiliar.

Em virtude de seu baixo torque de partida, mas alto torque de funcionamento, os motores monofásicos com capacitor permanente permitem a inversão de sua rotação diretamente quando em funcionamento, o que pode ser feito por meio de uma chave que inverte a conexão do capacitor com os enrolamentos En_a e En_b , como mostrado na Figura 23.

Os motores monofásicos com capacitor permanente, por não terem elevado torque de partida, são utilizados em condicionadores de ar, condensadores, ventiladores, dentre outras aplicações.



Circuito simplificado do motor



Exemplo de motor de capacitor permanente

Figura 22 – Motor monofásico com capacitor permanente.

Fonte: <https://www.novamotores.com.br> e <https://www.weq.net>. Acesso em 19/08/2021.

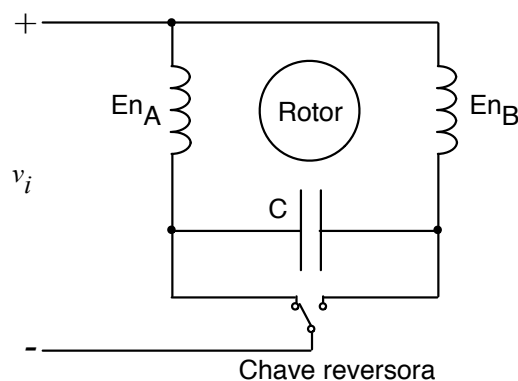


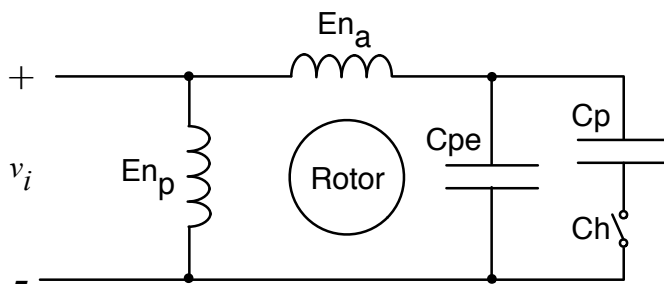
Figura 23 – Motor monofásico de capacitor permanente e chave reversora.

Fonte: Adaptado de (Kosow, 2005).

5.2.4 Motor monofásico com dois capacitores

A Figura 24 mostra o circuito simplificado e um exemplo de motor elétrico monofásico com dois capacitores, ficando um permanentemente ligado com o enrolamento auxiliar, enquanto o outro é ligado apenas durante a partida do motor, por meio da chave centrífuga.

Estes motores com dois capacitores têm maior torque de partida, tendo as vantagens dos motores com capacitor de partida e capacitor permanente, mas tendo maior custo; por isso, sendo utilizados em aplicações que exigem potências superiores a 1 cv.



Circuito simplificado do motor



Exemplo de motor com dois capacitores

Figura 24 – Motor monofásico com dois capacitores.

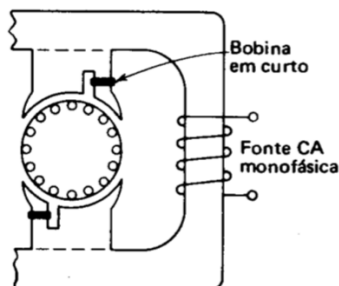
Fonte: Adaptado de <https://www.novamotors.com.br> e <https://www.lememotors.com.br>.

Acesso em 19/08/2021.

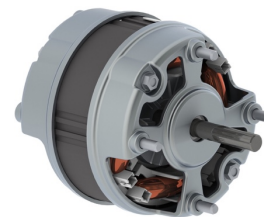
5.2.5 Motor monofásico com campo distorcido ou polos sombreados

A Figura 25 mostra o esquema construtivo simplificado de um motor de campo distorcido ou polos sombreados. As bobinas em curto colocadas em cada polo do estator geram um campo defasado do campo magnético principal, fazendo com que o rotor do tipo gaiola de esquilo tenha torque suficiente para sua partida.

O sentido de giro do rotor dependerá da montagem dos polos salientes ou sombreados no estator, fazendo com que neste motor não seja possível inverter o sentido de rotação de seu eixo.



Esquema construtivo simplificado do motor



Exemplo de motor com polos sombreados

Figura 25 – Motor monofásico com polos sombreados.

Fonte: (Kosow, 2005) e <https://www.lememotors.com.br>. Acesso em 19/08/2021.

Estes motores tem baixo custo, são robustos e simples de serem construídos, sendo fabricados para potências pequenas, até geralmente $\frac{1}{4}$ de cv, tendo como principais aplicações: ventiladores, exaustores, purificadores de ambientes, unidades de refrigeração, secadores de roupa, bombas, compressores, coifas, secadores de cabelo profissionais, condensadores, desumidificadores, dentre outras.

5.1 Motores trifásicos

Os motores trifásicos não necessitam de elementos auxiliares de partida, sendo então construídos com o número de enrolamentos desejados em virtude do número de polos especificado, constituindo um circuito com 3 fases e 6 condutores terminais. As conexões e circuitos de partida dos motores trifásicos serão estudadas em capítulo específico mais a frente neste curso.

A Figura 26 mostra exemplos de diferentes motores trifásicos, em termos de construção mecânica ou em termos de circuito elétrico interno. Assim, os motores trifásicos para bombeamento de água e IP21 são similares em termos elétricos, mas possuem diferenças em termos de construção de seu gabinete e sistemas de ventilação. Por sua vez, o motor trifásico Dahlander é um motor com 2 enrolamentos, com diferente número de polos, permitindo que o motor opere com duas velocidades distintas, conforme com qual dos enrolamentos for alimentado.

A técnica de comutar dentre diferentes enrolamentos, no caso de motores Dahlander, era muito utilizada antes do desenvolvimento dos inversores de frequência, que permitem alterar a frequência das tensões de alimentação do motor e conseqüentemente alterar sua velocidade de rotação, conforme explicado anteriormente.

Algumas aplicações para os motores trifásicos, dentre as inúmeras possíveis, são: bombas, ventiladores, exaustores, britadores, moinhos, talhas, compressores, centrais de ar condicionado, transportadores contínuos, máquinas operatrizes, bobinadeiras, trefiladeiras, centrífugas, prensas, guindastes, pontes rolantes, elevadores, dobradeiras, etc.



Figura 26 – Exemplos de motores trifásicos.

Fonte: <https://www.weg.net>. Acesso em 19/08/2021.

6 Exercícios

Exercícios Resolvidos

ER 01. Defina motor elétrico de corrente alternada.

Motor elétrico de corrente alternada é uma máquina rotativa que converte energia elétrica em energia mecânica, a partir da tensão de alimentação em corrente alternada.

ER 02. Quais os principais tipos de motores elétricos de corrente alternada monofásicos.

Os motores monofásicos podem ser com fase dividida, capacitor de partida, capacitor permanente, dois capacitores e polos sombreados.

ER 03. Os motores de corrente alternada são denominados de motores de indução. Comente a respeito.

Os motores de corrente alternada são chamados de motores de indução em virtude de terem um rotor com espiras ou enrolamentos, que em virtude do campo magnético variável criado no estator, sofre a indução de correntes elétricas, gerando um campo magnético no rotor, que irá interagir com o campo magnético do estator e provocar a rotação do eixo da máquina.

ER 04. Como pode ser alterada a velocidade de um motor de indução?

A velocidade de rotação dos motores de indução pode ser alterada modificando-se o número de polos do estator ou a frequência da tensão de alimentação da máquina.

ER 05. Cite aplicações para os motores de corrente alternada.

Ventiladores, compressores, elevadores, bombas, esteiras transportadoras, dentre outras.

Exercícios Propostos

EP 01. Explique com suas palavras como funciona um motor elétrico de corrente alternada.

EP 02. Comente sobre as vantagens dos motores trifásicos em relação aos motores monofásicos.

EP 03. Comente sobre as principais características dos motores monofásicos com capacitores de partida.

EP 04. Cite as principais partes de um motor de corrente alternada.

EP 05. Comente sobre as aplicações dos motores de corrente alternada.

7 Atividade Avaliativa

7.1 Introdução – O que preciso saber

Ao final deste objetivo de aprendizagem são apresentadas cinco questões, que devem ser respondidas sem consultar o material. Se você conseguir responder as questões e conferir as respostas com o gabarito abaixo, parabéns, você concluiu com êxito este tópico. Caso tenha errado alguma questão, revise o conteúdo relacionado com a mesma e refaça a questão, procurando se concentrar mais desta vez, para acertar o exercício e fixar bem o conteúdo.

AA 01. O que são máquinas de corrente alternada?

AA 02. Cite as principais partes de uma máquina de corrente alternada.

AA 03. Como se pode alterar a velocidade de rotação de um motor de corrente alternada?

AA 04. Cite exemplos de motores de indução monofásicos.

AA 05. Comente sobre as características dos motores de indução trifásicos.

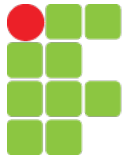
AA 01. Máquinas de corrente alternada são máquinas elétricas rotativas que podem converter a energia elétrica em mecânica no caso de motores, quando alimentados com uma fonte de alimentação em tensão alternada, ou converter energia mecânica em energia elétrica na forma de corrente alternada, no caso dos geradores.

AA 02. As principais partes de uma máquina de corrente alternada são: estator com os enrolamentos a serem alimentados pela rede de energia elétrica e o rotor, com espiras ou barras, curto-circuitadas nas extremidades, formando um rotor do tipo gaiola de esquilo.

AA 03. A velocidade de rotação do motor de corrente alternada pode ser alterada modificando o número de polos do estator ou a frequência da tensão de alimentação.

AA 04. Motores monofásicos de indução de fase dividida, de capacitor de partida, de capacitor permanente, com dois capacitores e com polos sombreados.

AA 05. Os motores trifásicos não exigem elementos auxiliares para a partida, sendo simples de serem fabricados, robustos e necessitando de pouca manutenção, no entanto, precisam ser alimentados por uma rede de alimentação trifásica.



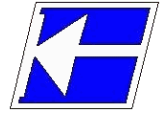
INSTITUTO FEDERAL
SANTA CATARINA

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA

DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA

CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM ELETRÔNICA INDUSTRIAL

Acionamentos Eletrônicos



GUIA DE ESTUDO

- OBJETIVO DE APRENDIZAGEM -

ACIONAMENTO DE MOTORES DE INDUÇÃO

MONOFÁSICOS

Prof. Clóvis Antônio Petry.

Florianópolis, agosto de 2021.

ACIONAMENTO DE MOTORES DE INDUÇÃO MONOFÁSICOS

Objetivo de Aprendizagem

Acionamento de motores de motores de indução monofásicos.

Objetivos parciais

- Estudar os aspectos relacionados com o acionamento de motores de indução monofásicos;
- Conhecer os principais elementos para acionamento de motores de indução;
- Conhecer circuitos para acionamento de motores de indução monofásicos.

Aulas relacionadas

Este objetivo de aprendizagem está relacionado com a aula 12 da disciplina.

Pré-requisitos

Ter estudado o objetivo de aprendizagem 11 relacionado ao estudo dos motores de corrente alternada.

Continuidade dos Estudos

O próximo objetivo de aprendizagem será o estudo do acionamento dos motores de indução trifásicos.

Roteiro para estudos

Os estudos referentes a este objetivo de aprendizagem consistem em:

1. Estudar este documento resumo, realizando as atividades propostas no mesmo;
2. Responder o quiz relacionado a este objetivo de aprendizagem;
3. Caso perceba necessidade, estudar a apresentação deste assunto ou consultar os livros texto indicados para esta disciplina;
4. Realizar os exercícios deste tópico da matéria;
5. Realizar a avaliação final para progredir ao próximo conteúdo.

Referências

- Material disponibilizado para a disciplina de Acionamentos Eletrônicos – 2021/1.
Departamento Acadêmico de Eletrônica, Instituto Federal de Santa Catarina, Campus Florianópolis.
- STEPHAN, Richard M. Acionamento Comando e Controle de Máquinas Elétricas. Rio de Janeiro: UFRJ, 2009.

Check-list

Caro estudante, verifique se você completou as atividades deste objetivo de aprendizagem e obteve êxito para continuar seus estudos.

Assinale as atividades realizadas:

Estudo do documento resumo:

- Leitura do documento resumo;
- Exercícios do documento resumo;
- Atividade avaliativa do documento resumo.
- Obtive êxito e entendi o conteúdo deste documento;
- Ainda não entendi bem o conteúdo e estudarei o mesmo com mais profundidade.

Estou com dúvidas, irei estudar com mais detalhes este conteúdo:

- Assistir a apresentação relacionada ao conteúdo (apresentação 12);
- Ler este guia de estudo (objetivo de aprendizagem 12).

Ainda estou com dúvidas:

- Entrarei em contato com o professor.

Obtive êxito, então seguirei em frente:

- Responder ao quiz deste conteúdo no Moodle;
- Informar ao professor que estou avançando com o conteúdo.

Parabéns, continue estudando com afinco e vamos em frente!!

CONTEÚDO

- OBJETIVO DE APRENDIZAGEM -
ACIONAMENTO DE MOTORES DE INDUÇÃO
MONOFÁSICOS

1 Introdução

O capítulo anterior foi relacionado ao estudo das máquinas de corrente alternada, com especial enfoque nos motores de indução monofásicos e trifásicos.

Este capítulo terá como objetivo principal o estudo dos circuitos de acionamento dos motores de indução monofásicos.

1.1 Conteúdo – O que irei estudar

Estudaremos neste tópico:

- Conexões dos motores de indução monofásicos;
- Principais elementos para acionamento de motores de indução;
- Circuitos para acionamento de motores de indução monofásicos.

1.2 Metodologia – O que devo fazer e como fazer

Leia com atenção o conteúdo a seguir. Ao final deste tópico são apresentados exercícios resolvidos. Após são apresentados alguns exercícios propostos.

Ao realizar estas atividades e se sentir confiante para progredir, siga os passos indicados na primeira página deste documento.

Espera-se que após estudar este assunto, você consiga:

- Descrever as conexões de um motor de indução monofásico;
- Citar os principais elementos para acionamento dos motores de indução;
- Explicar o funcionamento dos circuitos de acionamento de motores de indução monofásicos.

A atividade avaliativa deste objetivo de aprendizagem consistirá em perguntar ao estudante para descrever o funcionamento de um circuito de acionamento de um motor de indução monofásico, por exemplo.

Exemplo de atividade avaliativa:

1. Explicar com suas palavras as conexões de um motor monofásico de indução.
2. Citar elementos utilizados para acionamento de motores de indução.
3. Explicar o funcionamento de algum circuito de acionamento de motor de indução monofásico.

2 Motores de Indução Monofásicos

2.1 Introdução

Os motores elétricos podem ser de diferentes tamanhos, potências e aspectos funcionais, conforme se estudou nas aulas anteriores. Assim, dentre os motores que operam em corrente alternada (CA), se tem os motores monofásicos, dentre estes se tem os motores assíncronos, a seguir os motores gaiola de esquilo e por sua vez os motores com capacitores de partida; conforme mostrado na Tabela 1. Este último modelo de motor monofásico será estudado nesta aula.

Este capítulo irá apresentar os principais aspectos relacionados com as partes e conexões dos motores monofásicos de indução com capacitor de partida.

Tabela 1 – Classificação dos motores elétricos.

Níveis de classificação					
1	2	3	4	5	
Motor CA	Monofásico	Assíncrono	Gaiola de esquilo	Fase dividida	
				Capacitor de partida	
				Capacitor permanente	
				Pólos sombreados	
				Capacitor dois valores	
			Rotor bobinado	Repulsão	
			Rotor maciço	Histerese	
			Síncrono		Relutância
					Imãs permanentes
		Linear			Indução
					Imãs permanentes
		Trifásico	Assíncrono		De gaiola
				Rotor bobinado	
				Imãs permanentes	
			Síncrono		Relutância
				Pólos lisos	
				Pólos salientes	
Universal					
Motor CC	Excitação série				
	Excitação independente				
	Excitação composta				
	Imãs permanentes				
	Excitação paralela				

Fonte: Adaptado de (WEG, 2006)¹.

¹ WEG. Motores Elétricos. Disponível em <https://www.weg.net>. Acessado em 27/06/2006.

2.1 Motor de indução monofásico

Os motores de indução são do tipo assíncrono, isto é, são motores que tem velocidade no rotor (eixo) diferente da velocidade do campo girante, sendo de construção mais simples e por isso de custo menor, tem alto toque de partida e podem operar com redes de energia residencial e rural. As Figura 1 e Figura 2 apresentam as principais partes dos motores monofásicos com capacitores de partida, onde é possível identificar os capacitores de partida e a chave centrífuga, além dos demais elementos que constituem esta máquina de corrente alternada.

Os motores monofásicos são utilizados em aplicações de baixa potência, como por exemplo: elevadores de carros, ventiladores e sopradores, trituradores, bombas centrífugas, secadores de grãos, compressores, lavadoras de alta pressão, descarregadores de silos, distribuidores de ração, transportadores, dentre outras.

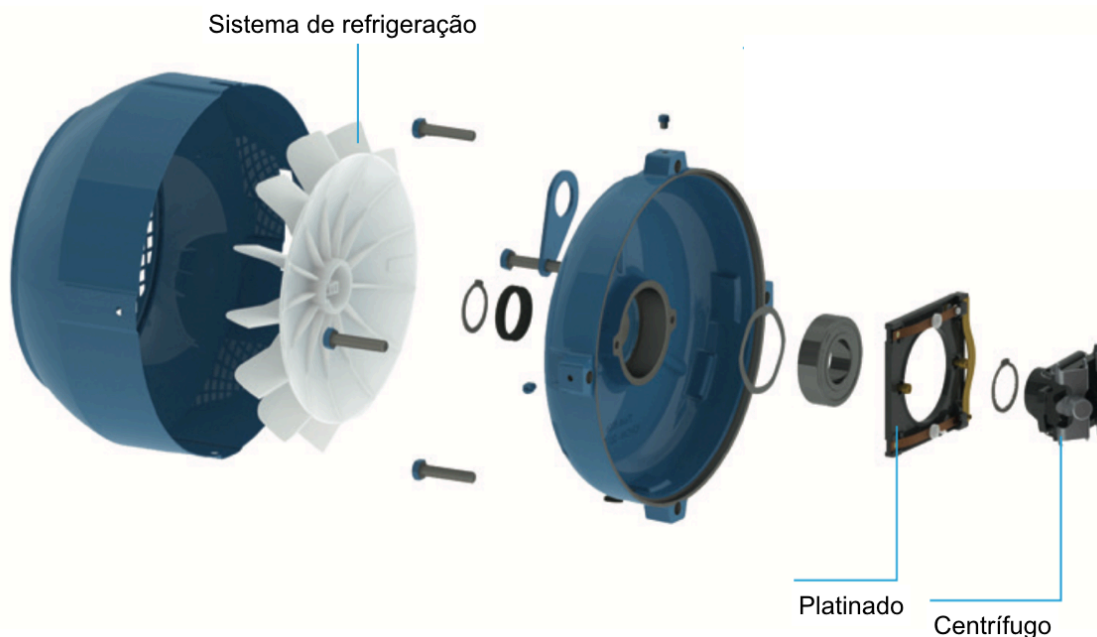


Figura 1 – Vista explodida de motor monofásico de fase auxiliar e capacitor de partida.

Fonte: Adaptado de (WEG, 2019)².

Os motores monofásicos de indução, em virtude de serem alimentados com tensão monofásica, não possuem capacidade de partida sem auxílio, por isso da presença do enrolamento auxiliar. Assim, com a defasagem produzida na corrente do enrolamento auxiliar em função do capacitor de partida, tem-se o campo eletromagnético do enrolamento principal defasado do campo magnético do enrolamento auxiliar, o que provoca um torque sobre o rotor do tipo gaiola

² WEG. Motor Elétrico Monofásico – Catálogo comercial, 2019. Disponível em: www.weg.net.

de esquilo. Deste modo o motor conseguirá partir, acelerando a velocidade do rotor, fazendo com que a chave centrífuga fique submetida a ação da rotação do eixo do motor, levando a sua abertura quando a velocidade for alta o suficiente para que o motor opere normalmente sem o enrolamento auxiliar. Assim, durante o funcionamento normal do motor o enrolamento auxiliar combinado ao capacitor de partida ficarão desligados. Ao desligar o motor, o rotor desacelerará, fazendo com que a chave centrífuga feche novamente, colocando o motor em estado adequado para a próxima partida.

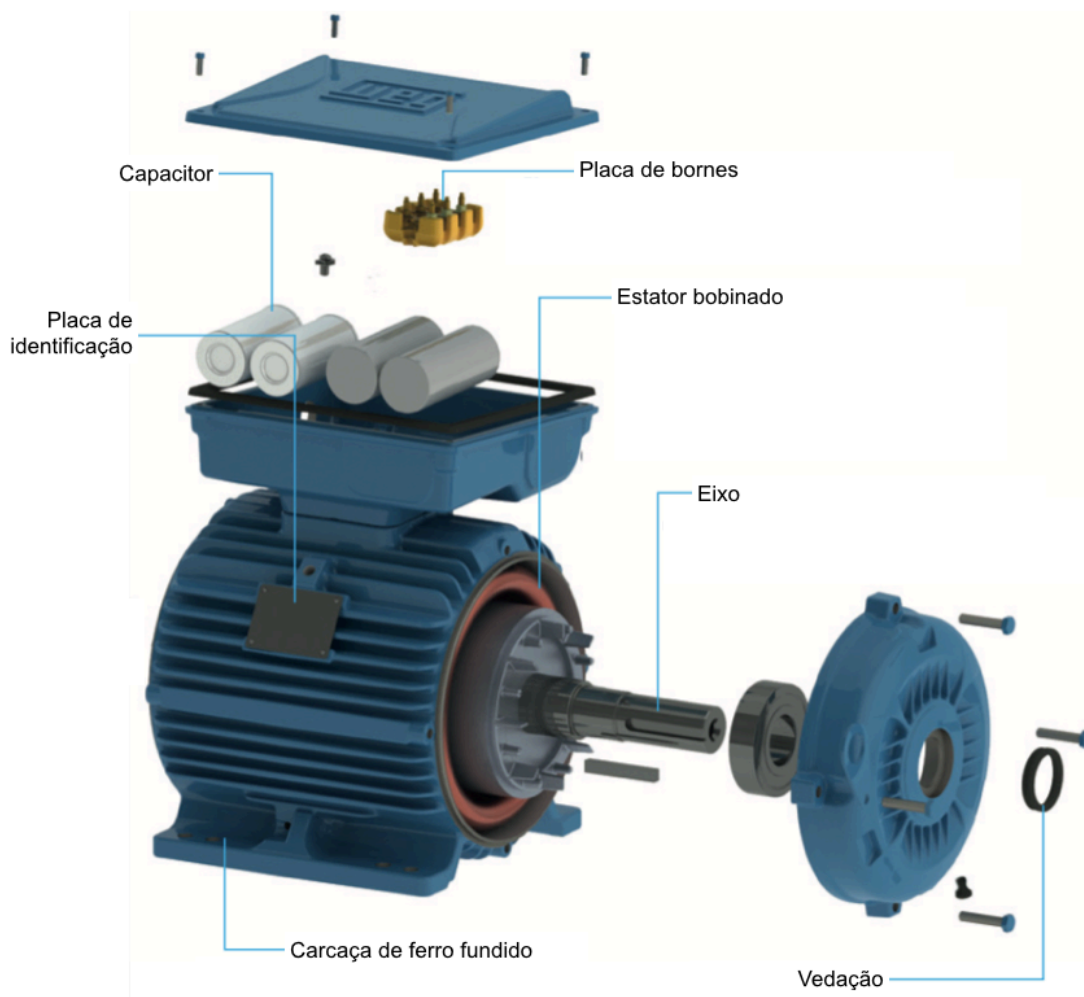


Figura 2 – Vista explodida de motor monofásico de fase auxiliar e capacitor de partida.

Fonte: Adaptado de (WEG, 2019).

2.2 Circuito elétrico simplificado do motor de indução monofásico

Em geral, os motores monofásicos de fase auxiliar e capacitor de partida possuem 6 fios de conexão, sendo 4 dos enrolamentos principais (fase principal) e 2 do enrolamento auxiliar (fase auxiliar). Conforme a tensão de alimentação, a conexão será realizada em série ou em paralelo. Já para inverter o sentido de rotação basta inverter a conexão dos fios do enrolamento auxiliar.

A Figura 3 mostra os terminais de conexão disponíveis para os motores de 6 fios, onde o enrolamento principal é formado por 2 conjuntos de bobinas, com terminais 1 e 2, para a primeira bobina, e 3 e 4 para a segunda bobina. Por sua vez, o enrolamento de partida é identificado pelos terminais 5 e 6.

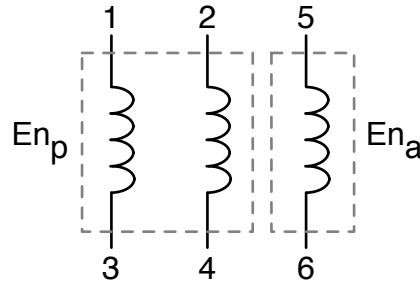


Figura 3 – Circuito elétrico simplificado do motor de indução monofásico.

2.3 Conexão do motor de indução monofásico para menor tensão

Os motores de indução, sejam monofásicos ou trifásicos, são dimensionados para operar com duas tensões distintas, isto é, seus enrolamentos suportam um determinado valor de tensão, mas conforme a conexão, nos terminais de ligação com a rede de energia elétrica pode-se ter valores de tensão distintos daqueles dos enrolamentos.

Assim, é comum se terem motores para operarem com tensões de alimentação de 110/220 V, sendo que na placa de identificação do motor será fornecido o esquema de conexão dos fios terminais do motor.

A Figura 4 apresenta as conexões dos terminais de conexão, tanto dos enrolamentos principais (terminais 1 e 3 e 2 e 4), como do enrolamento auxiliar (terminais 5 e 6), para operação na menor tensão de alimentação. Note que neste caso os enrolamentos são conectados em paralelo e ligados à rede de alimentação, representada pelos condutores L_1 e L_2 , podendo estes serem os fios fase e neutro ou fase e fase, dependendo do sistema de alimentação de energia elétrica utilizado.

Assim, a tensão de cada enrolamento deste motor tem valor igual, sendo, por exemplo 110 V. Todos os enrolamentos estão em paralelo, ficando submetidos ao mesmo valor de tensão.

Ao inverter a conexão dos terminais 5 e 6, faz-se a inversão de rotação do motor, mantendo as conexões dos enrolamentos principais inalteradas.

A representação utilizada nas Figura 3 e Figura 4 é simplificada, ou seja, junto ao enrolamento auxiliar (terminais 5 e 6) não foram representados a chave centrífuga e o capacitor de partida, isso para fins de facilitar o desenho do diagrama elétrico e o entendimento de seu funcionamento em termos de conexões elétricas dos terminais do motor.

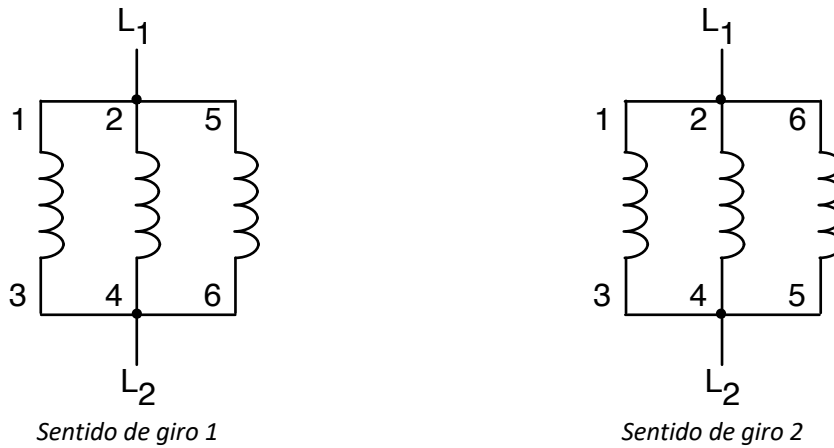


Figura 4 – Conexão dos terminais do motor monofásico para operação na menor tensão.

2.4 Conexão do motor de indução monofásico para maior tensão

Em contrapartida, se o motor for conectado na maior tensão, 220 V, por exemplo, então os enrolamentos devem ser ligados em série, conforme mostrado na Figura 5.

A partir das conexões conforme mostrado na Figura 5 se tem a divisão da tensão da rede de alimentação, resultando na metade da tensão sobre os enrolamentos, obtendo-se o valor de 110 V, por exemplo, que é a tensão nominal para a qual os enrolamentos foram dimensionados.

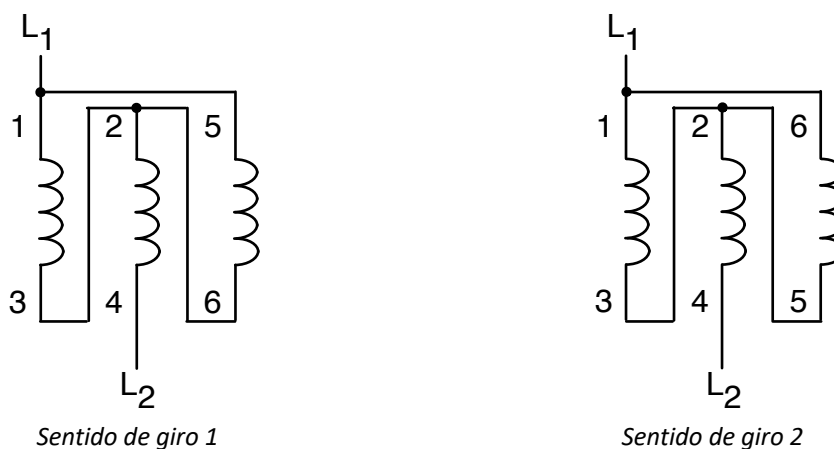


Figura 5 – Conexão dos terminais do motor monofásico para operação na maior tensão.

3 Elementos de Circuitos de Acionamento de Motores

3.1 Introdução

A seguir serão apresentados os principais elementos de circuitos de acionamento de motores de indução, tanto monofásicos como trifásicos.

O objetivo deste capítulo será apresentar alguns elementos, não se pretendendo abordar em profundidade os elementos em estudo, tampouco elencar todos os dispositivos e componentes

que podem ser empregados para circuitos de acionamento de motores de corrente alternada, que podem ser desde circuitos simples com poucos componentes, até circuito muito complexos, com conversores cc-ca, como em inversores de frequência, por exemplo.

3.2 Elementos de proteção

Os elementos de proteção mais simples para circuitos de acionamento de motores são os fusíveis e os disjuntores termomagnéticos.

Os disjuntores foram anteriormente estudados no capítulo relacionado aos elementos de instalações elétricas de baixa tensão, e também no capítulo referente ao acionamento de motores de corrente contínua.

A Figura 6 mostra o exemplo de um disjuntor para 25 A com curva do tipo C, que atuam para correntes entre 5 e 10 vezes acima da corrente nominal.



Figura 6 – Exemplos de disjuntores termomagnético para corrente alternada.

Fonte: <https://www.soprano.com.br>. Acesso em 26/08/2021.

Os fusíveis são dispositivos de proteção amplamente utilizados em circuitos elétricos e eletrônicos, podendo ser de ação rápida, ultrarrápida, normal ou retardada.

Em circuitos de partida de motores, em função da alta corrente na partida, necessária para vencer a inércia do rotor parado, são empregados fusíveis de ação retardada, evitando que estes interrompam (abram) o circuito a cada acionamento do motor.

A Figura 7 mostra um conjunto de elementos para montagem de fusíveis do tipo diazed, enquanto a Figura 8 identifica os elementos do conjunto separadamente. Em circuitos monofásicos com conexão entre fase e neutro, se utiliza 1 fusível apenas em série com o condutor fase. Já em circuitos bifásicos, isto é, com conexão entre dois condutores fase, se utiliza 1 fusível em cada fase.

Os fusíveis do tipo diazed possuem um indicador colorido para caracterizar a corrente do fusível e também se o mesmo está aberto ou não; neste caso, quando o fusível interrompe, o indicador solta, indicando que o fusível está aberto e precisa ser interrompido.



Figura 7 – Conjunto de fusíveis e elementos acessórios.

Fonte: <http://negrini.com.br>. Acesso em 26/08/2021.



Figura 8 – Elementos que compõem um conjunto fusível.

Fonte: <http://negrini.com.br>. Acesso em 26/08/2021.

Além dos fusíveis e disjuntores, a proteção dos motores pode ser realizada também por relés térmicos. Os relés térmicos são utilizados para proteger o circuito contra aumentos de carga no motor, que provocam aumento de corrente e por sua vez mais aquecimento. Em geral os relés térmicos possuem uma lâmina bimetálica, pela qual circula a corrente do motor, que ao atingir valores superiores ao valor ajustado no relé, fará com que a lâmina curve e provoque a abertura dos contatos, que provocarão o desligamento do circuito de comando do motor.

O funcionamento do relé térmico é semelhante ao disjuntor termomagnético, com a diferença de que possui apenas o elemento térmico, com ausência do elemento magnético, além de permitir o ajuste da corrente atuação, conforme mostrado na Figura 9.

Estes dispositivos de proteção são montados diretamente nos terminais de conexão dos contatores, como se observa nos fios de conexão do relé térmico mostrado na Figura 9.

Os relés possuem em geral 3 fases, isto é, são trifásicos; utilizados em conjunto com contatores trifásicos também; por isso não é tão comum seu uso em circuitos de acionamento de motores monofásicos.



Figura 9 – Exemplo de relé térmico.

Fonte: www.weg.net. Acesso em 26/08/2021.

3.3 Dispositivos eletromecânicos e eletromagnéticos

As botoeiras são interruptores apropriados para circuitos de acionamento de motores. São dispositivos acionados por pressão, fazendo com que fiquem abertas ou fechadas conforme o usuário intervir sobre as mesmas.

O contato que está normalmente aberto é chamado de NA, sendo identificado pela cor verde, pois é utilizado para ligar o circuito. Já o contato normalmente fechado é identificado por NF, tendo cor vermelha. Na Figura 10 mostram-se alguns modelos de botoeiras, onde é possível notar que existem modelos que possuem no mesmo invólucro (corpo) dois contatos, sendo um NA para ligar o circuito e um NF para desligar o circuito.



Figura 10 – Exemplos de botoeiras.

Fonte: <https://www.metaltex.com.br>. Acesso em 26/08/2021.

Ao se fazer o comando de cargas elétricas à distância, ou através de corrente muito menor que a corrente solicitada pela carga, manual ou automaticamente, utilizam-se os elementos de circuitos de acionamentos denominados de contatores, que são semelhantes aos relés estudados e utilizados nos circuitos de acionamento de motores de corrente contínua.

Os contatores tem, em geral, contatos auxiliares (NA e NF) e normalmente é fabricado com três contatos principais, sendo um dispositivo de manobra não manual e com desligamento remoto e automático, seja perante sobrecarga (através do relé de sobrecarga), seja perante curto-circuito (através de fusíveis).

Os contatores são acionados pela alimentação da bobina presente no mesmo, conforme mostrado na Figura 11 onde se mostram os contatos fechando quando ocorre a circulação de corrente e a produção de uma força (Força de Lorentz) que fará o núcleo móvel ser atraído pelo núcleo fixo.

Ao cessar a circulação de corrente pela bobina, a força não estará mais presente, liberando o núcleo móvel, que será levado à posição de repouso pela pressão das molas presentes no dispositivo.

A Figura 12 mostra as principais partes de um contator, que são:

- Bobina – Responsável por criar o campo magnético que fará as partes móveis do núcleo eletromagnético serem atraídas pelas partes fixas pelo princípio da Força de Lorentz;
- Núcleo eletromagnético – Formado por partes fixas e partes móveis de material ferromagnético, tem a finalidade de deslocar os contatos móveis para promover o fechamento ou abertura do circuito, conforme os contatos forem NA ou NF;
- Contatos – Formados por partes fixas e móveis, de material condutor, estarão montados juntos as partes móveis e fixas do núcleo;
- Molas – Tem por finalidade promover o retorno das partes móveis à posição original quando a bobina deixar de ser alimentada;
- Câmara de extinção de arco elétrico – Elemento responsável por extinguir o arco elétrico que surge quando os contatos interrompem cargas indutivas, como é o caso de motores elétricos, evitando desgaste no material dos contatos;
- Terminais de ligação – Conectores para permitirem a conexão dos condutores ou outros elementos do circuito elétrico;
- Placa de identificação – Placa com as principais características elétricos do contator, como tensão de operação, frequência de operação, dentre outras.

O número de contatos de um contator é variável, conforme os modelos escolhidos, tendo geralmente desde 3 contatos principais e alguns contatos auxiliares, com número variável conforme as aplicações desejadas ou correntes e circuitos a que se destinam, conforme mostrado nos exemplos da Figura 13.

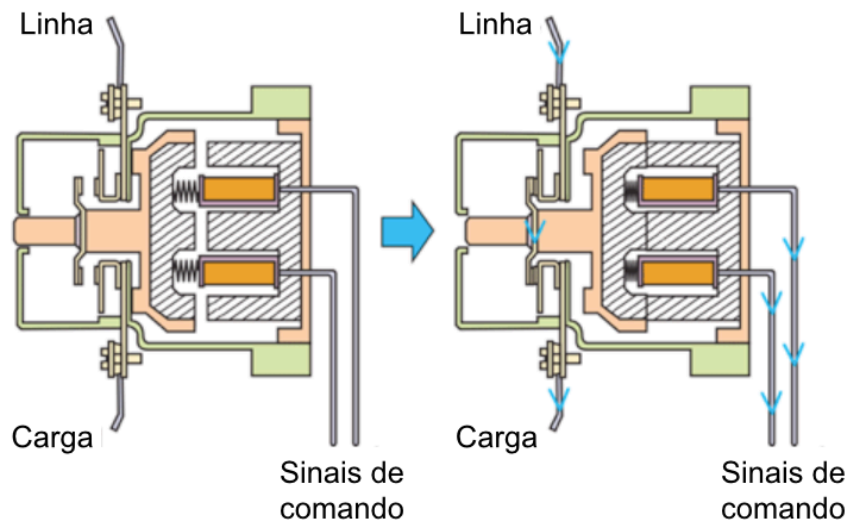


Figura 11 – Princípio de funcionamento de um contator.

Fonte: Adaptado de <https://evbitz.uk>. Acesso em 26/08/2021.

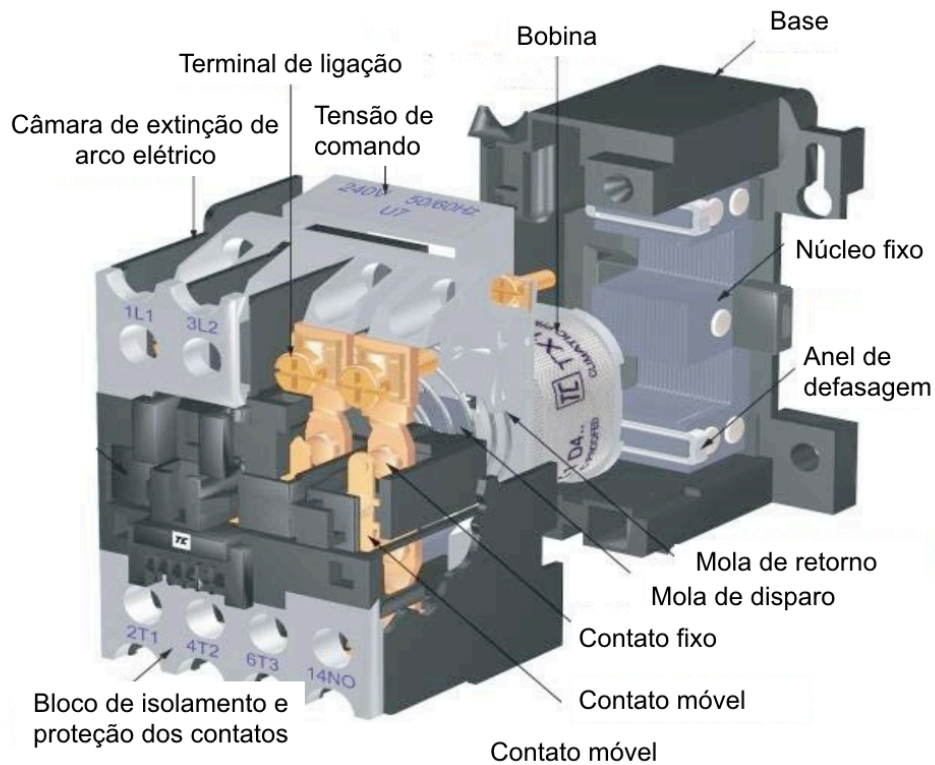


Figura 12 – Principais partes de um contator.

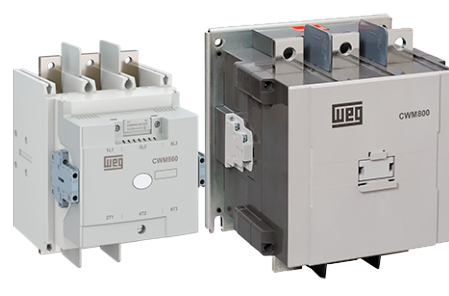
Fonte: Adaptado de <https://evbitz.uk>. Acesso em 26/08/2021.



Minicontator até 22 A



Contator para 9 a 105 A



Contatores para 112 a 800 A

Figura 13 – Exemplos de contatores.

Fonte: www.weg.net. Acesso em 26/08/2021.

4 Circuitos de Acionamento de Motores Monofásicos

4.1 Introdução

A seguir serão apresentados alguns circuitos de acionamento de motores monofásicos de indução, buscando-se mostrar o funcionamento básico dos mesmos e permitir que a partir destes diferentes soluções e circuitos sejam propostos e implementados.

4.2 Acionamento de motores com contatores

O acionamento de motores elétricos de indução, monofásicos e trifásicos, em geral, é realizado com circuitos usando contatores, boteiras e relés térmicos, como mostrado na Figura 14.

Os circuitos de acionamento de motores são comumente denominados de partida de motor, seguindo-se com a designação da técnica de acionamento, que pode ser, por exemplo:

- Partida direta – Circuito de acionamento do motor que realiza a conexão direta do mesmo à rede de energia elétrica, por meio dos contatos principais do contator, por exemplo;
- Partida direta com reversão – Circuito de acionamento que realiza a conexão direta do motor à rede de energia elétrica, utilizando-se de elementos seccionadores (chaves ou contatores) e permite a inversão do sentido de rotação do eixo da máquina;
- Partida suave – Circuito que utiliza chaves de partida específicas para permitir a redução da corrente de partida, utilizando inversores de frequência ou outras técnicas apropriadas.

Em termos de circuitos elétricos, os circuitos de acionamento com contatores tem duas partes principais, que são:

- Circuito de força – Circuito principal, onde se tem a conexão da carga (motor) com a rede de energia elétrica, por meio dos contatos principais do contator, tendo em série com estes os elementos de proteção (fusíveis e/ou relé térmico);
- Circuito de comando – Circuito auxiliar, que tem a finalidade de alimentar a bobina do contator, fazendo seu acionamento e conseqüentemente ligando e desligando o motor, por meio de chaves auxiliares, como botoeiras, contatos auxiliares do contator, sensores, etc.

Assim, no circuito de comando se tem a interação com o usuário ou a automação do sistema, que atuará sobre o circuito de potência, fazendo o acionamento final do motor.

Os circuitos de comando e de força podem ser mais simples ou complexos, dependendo da técnica de partida utilizada (direta, com reversão, etc.) e do nível de automação empregado, por exemplo, com acionamento e desligamento automático conforme o nível de algum líquido, em caso de bombas, abertura e fechamento de portões, dentre outras aplicações.

A Figura 14 apresenta também a numeração dos terminais dos contatos e dos elementos do circuito, o que é importante durante a montagem do sistema. Além disso, é possível fazer adaptações no circuito, retirando parte do mesmo e adicionando chaves opcionais, por exemplo.

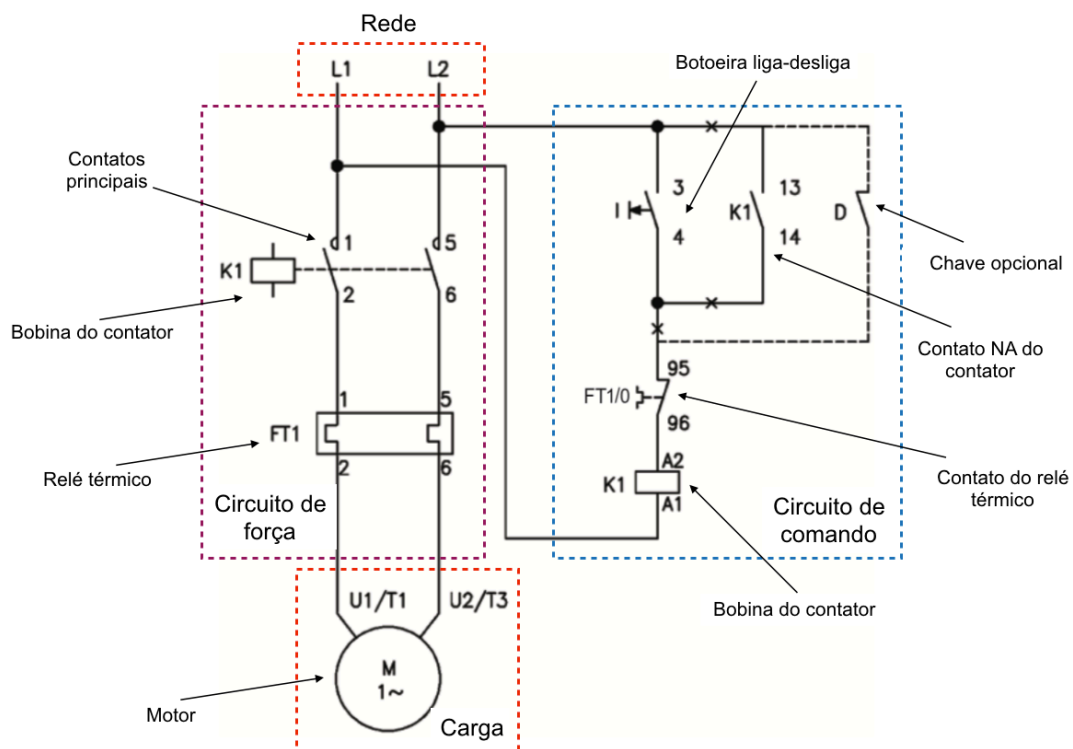


Figura 14 – Circuito clássico de acionamento de motor com contadores.

Fonte: Adaptado de www.weg.net. Acesso em 26/08/2021.

4.3 Partida direta de motor monofásico

O circuito de acionamento de um motor monofásico (ou bifásico) de indução, de maneira direta, é mostrada na Figura 15. O aspecto contrutivo desta chave de partida é mostrado na Figura 16, onde se tem diferentes tamanhos, conforme se utilizem fusíveis ou não.

Os elementos constituintes do circuito da Figura 15 são:

- Rede de energia elétrica (L_1 e L_2) – Representada pelas conexões L_1 e L_2 , denotando os condutores de linha 1 e 2, respectivamente. Se a carga for bifásica serão dois condutores fase; já se o motor for monofásico, serão os condutores fase e neutro;
- Motor monofásico ($M_{1\sim}$) – Motor monofásico de indução, conectado por 2 fios no circuito de potência (de força ou principal);
- Contatos principais do contator (K_1) – Contatos que ficam em série, entre a rede de energia elétrica e a carga, neste exemplo com a numeração 1 – 2 e 5 – 6;
- Contatos principais do relé térmico (FT_1) – Contatos que ficam em série com a carga, logo após os contatos principais do contator e antes do motor, identificador por 1 – 2 e 5 – 6;
- Bobina do contator (K_1) – Identificada por A_1 e A_2 , está conectada no circuito de comando à rede de energia elétrica pelos contatos dos elementos de acionamento do circuito (botões, contatos auxiliares do contator e relé térmico);
- Botoeira liga-desliga (I) – Botoeira do tipo liga-desliga (terminais 3 e 4), que apertada permitirá a alimentação da bobina do contator, se aberta irá interromper a corrente de K_1 , desligando o motor;
- Contato auxiliar do contator (K_1) – Contato identificado como K_1 , tendo terminais de conexão identificados por 13 e 14, sendo do tipo NA. Este contato mantém o contator acionado caso a botoeira seja aberta, sendo chamado de contato de retenção, por reter a bobina do contator alimentada, mesmo após se cessar a pressão sobre a botoeira de pressão, por exemplo. No entanto, se este contato for utilizado, então o circuito precisará de uma botoeira com contato do tipo NF em série com o circuito, para permitir a interrupção da corrente na bobina e o desligamento do motor;
- Chave auxiliar (D) – Contato normalmente fechado (NF) de uma chave auxiliar, por exemplo uma boia de nível, utilizada em reservatórios de água. Neste caso não se utilizam a botoeira e o contato de retenção de K_1 , ficando o acionamento da bobina do contator por conta do sensor de nível (boia).

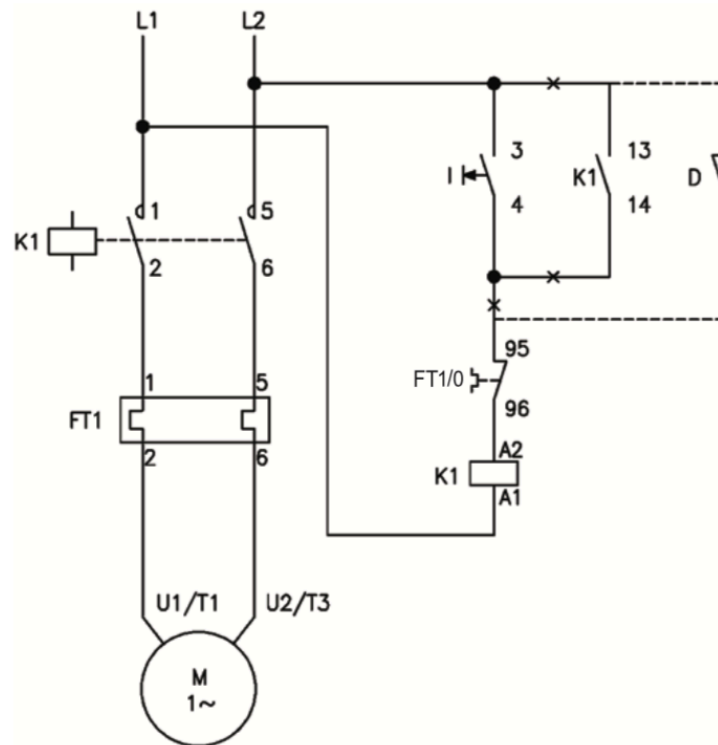


Figura 15 – Partida direta de motor monofásico.

Fonte: www.weg.net. Acesso em 26/08/2021.



Figura 16 – Exemplo de chave de partida de motor monofásico.

Fonte: www.weg.net. Acesso em 26/08/2021.

O circuito mostrado na Figura 17 é uma configuração adequada para redes de energia elétrica monofásicas, onde a proteção está sendo realizada por dois fusíveis, sendo o primeiro no circuito de força e o segundo no circuito de comando.

O acionamento da bobina do contator está sendo feito por uma botoeira com contato NA (S_1), enquanto o desligamento é realizado por uma botoeira com contato NF (S_0). O contato auxiliar do contator K_1 faz a retenção no circuito, ou seja, mantém a bobina do contator energizada mesmo após se abrir a botoeira de contato normalmente aberto.

Este circuito não utiliza relé térmico de proteção do motor, apenas fusíveis; o que

costumeiramente é utilizado para redução de custo, por exemplo. Importante observar a numeração dos contatos dos elementos, onde no circuito de força a numeração é simples, enquanto no circuito de comando é dupla, ou seja, do tipo 11, 12, 13, etc.

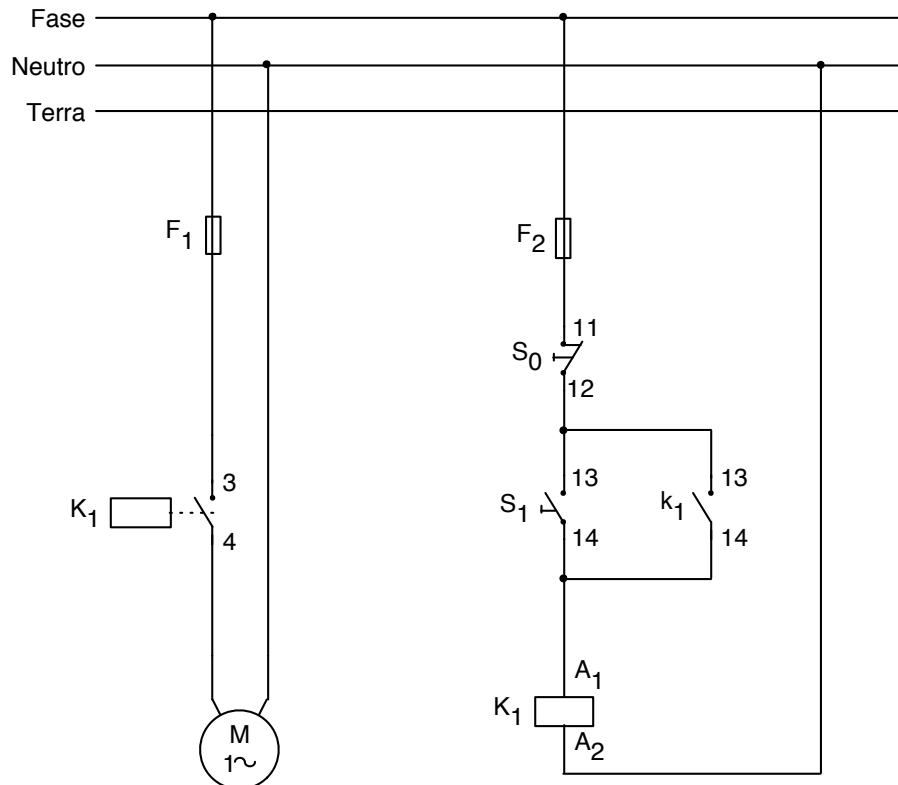


Figura 17 – Partida direta de motor monofásico com botoeiras de pressão.

4.4 Partida direta de motobomba monofásica

A Figura 18 mostra um exemplo de chave de partida de motobomba monofásica e na Figura 19 seus circuitos de força e de comando. Esta chave permite a operação no modo manual ou com a conexão de sensores de nível de água, como uma boia de nível, permitindo o controle automático da motobomba.



Figura 18 – Exemplo de chave de partida de motobomba monofásica.

Fonte: www.weg.net. Acesso em 26/08/2021.

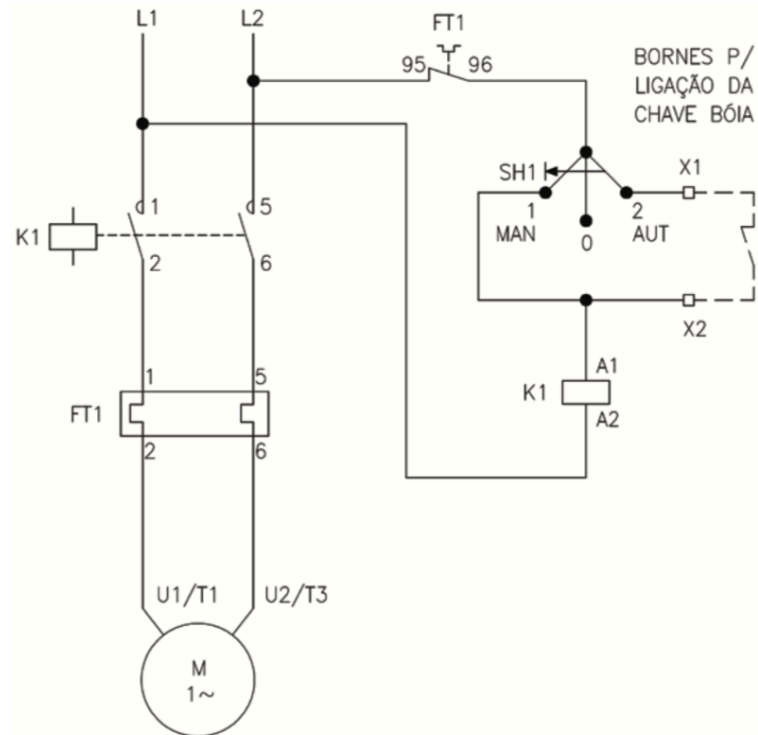


Figura 19 – Partida direta de motobomba monofásica.

Fonte: www.weg.net. Acesso em 26/08/2021.

5 Exercícios

Exercícios Resolvidos

ER 01. Quais elementos de proteção são comumente utilizados para o acionamento de motores de indução?

Podem ser utilizados disjuntores termomagnéticos, fusíveis ou relés térmicos.

ER 02. Qual a finalidade de se utilizar relés térmicos em circuitos de acionamento de motores?

O relé térmico tem a finalidade de detectar sobrecargas no motor, fazendo com que o mesmo seja desligado e por conseguinte protegido.

ER 03. O que é partida direta de um motor de indução.

Partida direta significa conectar o motor diretamente na rede de alimentação por meio de chaves, contatores ou outros elementos que permitam interromper a corrente elétrica, sem o auxílio de técnicas diferenciadas para a partida da máquina de corrente alternada.

ER 04. Em geral, um motor monofásico com capacitor de partida tem quantos fios?

Um motor monofásico com capacitor de partida costuma ter 6 fios de conexão.

ER 05. O que se deve fazer para inverter o sentido de rotação de um motor monofásico de indução?

Deve-se inverter a conexão do enrolamento auxiliar, ou seja, os terminais 5 e 6 do motor.

Exercícios Propostos

EP 01. O que são contatores?

EP 02. Explique a diferença entre circuito de comando e circuito de força.

EP 03. Os motores monofásicos de indução costumam ser dimensionados para quais valores de tensão.

EP 04. O que é um motor monofásico de indução?

EP 05. Comente sobre algumas aplicações comuns para os motores monofásicos de indução.

6 Atividade Avaliativa

6.1 Introdução – O que preciso saber

Ao final deste objetivo de aprendizagem são apresentadas cinco questões, que devem ser respondidas sem consultar o material. Se você conseguir responder as questões e conferir as respostas com o gabarito abaixo, parabéns, você concluiu com êxito este tópico. Caso tenha errado alguma questão, revise o conteúdo relacionado com a mesma e refaça a questão, procurando se concentrar mais desta vez, para acertar o exercício e fixar bem o conteúdo.

AA 01. O que são contatores?

AA 02. A automação de um circuito de acionamento de motores elétricos monofásicos é realizada no circuito de comando ou de força? Comente a respeito.

AA 03. A corrente de partida de um motor de indução é igual a corrente nominal?

AA 04. Cite elementos de proteção utilizados nos circuitos de acionamento de motores elétricos de indução?

AA 05. Como pode ser alterada a velocidade de rotação de um motor monofásico de indução?

AA 01. Contatores são dispositivos eletromagnéticos, que tem a finalidade de ligar e desligar cargas, como motores elétricos, a partir da aplicação de uma tensão em sua bobina, permitindo que o comando seja realizado à distância, o uso de sensores, a automação e a implementação de outras funcionalidades desejadas no acionamento da máquina.

AA 02. A automação deve ser realizada no circuito de comando, onde se podem conectar sensores e outros dispositivos que tornem o acionamento do motor automático, por exemplo.

AA 03. A corrente de partida dos motores de indução é superior a corrente nominal, na proporção de 6 a 10 vezes para motores monofásicos e de 5 a 7 vezes nos motores trifásicos.

AA 04. São exemplos de elementos de proteção utilizados nos circuitos de acionamento de motores elétricos: fusíveis, disjuntores e relés térmicos.

AA 05. A velocidade de rotação de um motor de indução pode ser alterada modificando-se a frequência da tensão de alimentação, utilizando inversores de frequência, por exemplo.



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA

DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA

CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM ELETRÔNICA INDUSTRIAL

Acionamentos Eletrônicos



GUIA DE ESTUDO

- OBJETIVO DE APRENDIZAGEM -

ACIONAMENTO DE MOTORES DE INDUÇÃO

TRIFÁSICOS

Prof. Clóvis Antônio Petry.

Florianópolis, setembro de 2021.

ACIONAMENTO DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS

Objetivo de Aprendizagem

Acionamento de motores de motores de indução trifásicos.

Objetivos parciais

- Estudar os aspectos relacionados com o acionamento de motores de indução trifásicos;
- Conhecer os principais elementos para acionamento de motores de indução;
- Conhecer circuitos para acionamento de motores de indução trifásicos.

Aulas relacionadas

Este objetivo de aprendizagem está relacionado com a aula 13 da disciplina.

Pré-requisitos

Ter estudado o objetivo de aprendizagem 12 relacionado ao acionamento de motores de indução monofásicos.

Continuidade dos Estudos

O próximo objetivo de aprendizagem será o estudo do acionamento dos motores de indução com controladores lógicos programáveis e inversores de frequência.

Roteiro para estudos

Os estudos referentes a este objetivo de aprendizagem consistem em:

1. Estudar este documento resumo, realizando as atividades propostas no mesmo;
2. Responder o quiz relacionado a este objetivo de aprendizagem;
3. Caso perceba necessidade, estudar a apresentação deste assunto ou consultar os livros texto indicados para esta disciplina;
4. Realizar os exercícios deste tópico da matéria;
5. Realizar a avaliação final para progredir ao próximo conteúdo.

Referências

- Material disponibilizado para a disciplina de Acionamentos Eletrônicos – 2021/1.
Departamento Acadêmico de Eletrônica, Instituto Federal de Santa Catarina, Campus Florianópolis.
- STEPHAN, Richard M. Acionamento Comando e Controle de Máquinas Elétricas. Rio de Janeiro: UFRJ, 2009.

Check-list

Caro estudante, verifique se você completou as atividades deste objetivo de aprendizagem e obteve êxito para continuar seus estudos.

Assinale as atividades realizadas:

Estudo do documento resumo:

- Leitura do documento resumo;
- Exercícios do documento resumo;
- Atividade avaliativa do documento resumo.
- Obtive êxito e entendi o conteúdo deste documento;
- Ainda não entendi bem o conteúdo e estudarei o mesmo com mais profundidade.

Estou com dúvidas, irei estudar com mais detalhes este conteúdo:

- Assistir a apresentação relacionada ao conteúdo (apresentação 13);
- Ler este guia de estudo (objetivo de aprendizagem 13).

Ainda estou com dúvidas:

- Entrarei em contato com o professor.

Obtive êxito, então seguirei em frente:

- Responder ao quiz deste conteúdo no Moodle;
- Informar ao professor que estou avançando com o conteúdo.

Parabéns, continue estudando com afinco e vamos em frente!!

CONTEÚDO

- OBJETIVO DE APRENDIZAGEM -
ACIONAMENTO DE MOTORES DE INDUÇÃO
TRIFÁSICOS

1 Introdução

O capítulo anterior abordou o acionamento do motor monofásico de indução com contadores, apresentando-se também os principais elementos que compõem um circuito de acionamento.

Este capítulo terá como objetivo principal o estudo dos circuitos de acionamento dos motores de indução trifásicos.

1.1 Conteúdo – O que irei estudar

Estudaremos neste tópico:

- Conexões dos motores de indução trifásicos;
- Principais elementos para acionamento de motores de indução;
- Circuitos para acionamento de motores de indução trifásicos.

1.2 Metodologia – O que devo fazer e como fazer

Leia com atenção o conteúdo a seguir. Ao final deste tópico são apresentados exercícios resolvidos. Após são apresentados alguns exercícios propostos.

Ao realizar estas atividades e se sentir confiante para progredir, siga os passos indicados na primeira página deste documento.

Espera-se que após estudar este assunto, você consiga:

- Descrever as conexões de um motor de indução trifásico;
- Citar os principais elementos para acionamento dos motores de indução;
- Explicar o funcionamento dos circuitos de acionamento de motores de indução trifásicos.

A atividade avaliativa deste objetivo de aprendizagem consistirá em perguntar ao estudante para descrever o funcionamento de um circuito de acionamento de um motor de indução trifásico, por exemplo.

Exemplo de atividade avaliativa:

1. Explicar com suas palavras as conexões de um motor trifásico de indução.
2. Citar elementos utilizados para acionamento de motores de indução.
3. Explicar o funcionamento de algum circuito de acionamento de motor de indução trifásico.

2 Motores de Indução Trifásicos

2.1 Introdução

Os motores elétricos, conforme estudado anteriormente, tem aspectos semelhantes e também diferentes entre si, conforme sua potência, aplicação e características construtivas. Por exemplo, dentre os motores que operam em corrente alternada (CA), se tem os motores trifásicos, dentre estes se tem os motores assíncronos, a seguir os motores gaiola de esquilo e de rotores bobinados; conforme mostrado na Tabela 1.

Este capítulo terá como foco o estudo do acionamento do motor de indução trifásico com rotor do tipo gaiola de esquilo.

Tabela 1 – Classificação dos motores elétricos.

Níveis de classificação					
1	2	3	4	5	
Motor CA	Monofásico	Assíncrono	Gaiola de esquilo	Fase dividida	
				Capacitor de partida	
				Capacitor permanente	
				Pólos sombreados	
				Capacitor dois valores	
			Rotor bobinado	Repulsão	
			Rotor maciço	Histerese	
			Síncrono		Relutância
					Imãs permanentes
		Linear			Indução
					Imãs permanentes
		Trifásico	Assíncrono		De gaiola
			Rotor bobinado		
				Imãs permanentes	
			Síncrono		Relutância
				Pólos lisos	
				Pólos salientes	
Universal					
Motor CC	Excitação série				
	Excitação independente				
	Excitação composta				
	Imãs permanentes				
	Excitação paralela				

Fonte: Adaptado de (WEG, 2006)¹.

¹ WEG. Motores Elétricos. Disponível em <https://www.weg.net>. Acessado em 27/06/2006.

2.1 Motor de indução trifásico

Os motores de indução, como estudado nos capítulos anteriores deste curso, são do tipo assíncrono, isto é, são motores que tem velocidade no rotor (eixo) diferente da velocidade do campo girante, sendo de construção mais simples e por isso de custo menor, tem alto torque de partida e podem operar com redes de energia monofásicas, bifásicas ou trifásicas.

Os motores de indução, tanto monofásicos como trifásicos, segundo catálogo do fabricante WEG, “funcionam normalmente com uma velocidade constante, que varia ligeiramente com a carga mecânica aplicada ao eixo. Devido a sua grande simplicidade, robustez e baixo custo, é o motor mais utilizado de todos, sendo adequado para quase todos os tipos de máquinas acionadas, encontradas na prática. Atualmente é possível controlarmos a velocidade dos motores de indução com o auxílio de inversores de frequência”.

A Figura 1 mostra os principais elementos de um motor de indução trifásico, com destaque para o rotor do tipo gaiola de esquilo e os enrolamentos do estator. É interessante ressaltar a ausência de circuito auxiliar de partida, que é necessário no motor de indução monofásico, formado pelo enrolamento auxiliar, capacitores de partida e chave centrífuga.

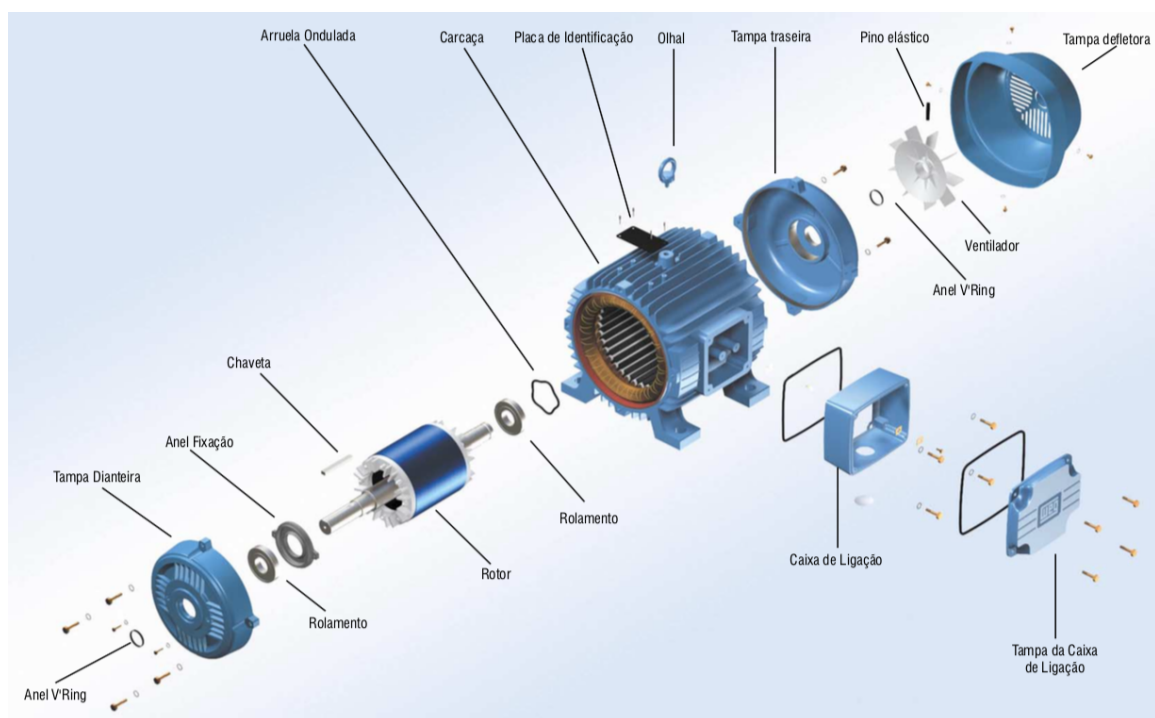


Figura 1 – Vista explodida de motor de indução trifásico.

Fonte: Adaptado de (WEG, 2019)².

² WEG. Motores elétricos, 2005. Disponível em: www.weg.net.

Os motores trifásicos são utilizados em aplicações de baixas, médias e altas potências, quando se tiver disponível uma rede de energia trifásica, em substituição aos motores de indução monofásicos, para as mais diversas aplicações, como por exemplo: uso geral, alta eficiência, em atmosferas explosivas, bombas, ventiladores, linhas dedicadas, dentre outras.

Destaca-se também que os motores podem ser aplicados nos mais diversos ambientes, inclusive sujeitos a exposição de líquidos, agentes químicos, altas temperaturas, por exemplo. Nestes casos, a escolha do motor deve levar em conta, rigorosamente, o grau de proteção do mesmo. Como exemplo, mostra-se na Figura 2 um motor blindado, com grau de proteção IP55.



Figura 2 – Exemplo de motor trifásico blindado (IP55).

Fonte: <https://www.herculesmotores.com.br>. Acesso em 02/09/2021.

Além disso, a partida dos motores de indução, em virtude das altas correntes de partida, pode se dar por meio de técnicas para redução desta corrente, como por exemplo: partida estrela-triângulo, uso de chave compensadora, uso de chaves de partida, inversores de frequência, etc. Em virtude dos custos, é comum atualmente o emprego de chaves de partida ou inversores de frequência, pois estes últimos também permitem o controle da velocidade do motor, definição de limites de operação, proteções diversas, ajustes de rampa de aceleração e desaceleração, dentre outros ajustes possíveis com o uso dos acionamentos eletrônicos.

2.2 Circuito elétrico simplificado do motor de indução trifásico

Em geral, os motores de indução trifásicos possuem 6 fios de conexão, sendo 2 para cada fase do motor. Conforme a tensão de alimentação, a conexão será realizada em triângulo ou em estrela. Já para inverter o sentido de rotação basta inverter a conexão de duas fases.

A Figura 3 mostra os terminais de conexão disponíveis para os motores de 6 fios, onde o enrolamento da fase 1 é conectado pelos terminais 1 e 4, a fase 2 pelos terminais 2 e 5, enquanto a fase 3 é conectada pelos terminais 3 e 6. A identificação por letras também é usada, tendo então: fase 1 terminais U_1 e U_2 , fase 2 terminais V_1 e V_2 e fase 3, terminais W_1 e W_2 .

A interconexão entre os enrolamentos do motor em estrela e triângulo (delta) é mostrada na Figura 3, lembrando que a relação entre as tensões de fase (triângulo) e de linha (estrela) é dada por:

$$V_{linha} = \sqrt{3} \cdot V_{fase}$$

$$V_{estrela} = \sqrt{3} \cdot V_{triângulo}$$

Assim, para uma rede trifásica com tensão de fase de 220 V, a tensão de linha será:

$$V_{linha} = \sqrt{3} \cdot V_{fase} = \sqrt{3} \cdot 220 = 381V$$

Os enrolamentos do motor trifásico são dimensionados para a tensão de fase, ou seja, aquela obtida diretamente sobre os enrolamentos, por exemplo entre os terminais 1 e 4, para o caso da fase 1 do motor.

Por sua vez, quando se conectam os enrolamentos utilizando a ligação estrela, a tensão de linha será maior do que a tensão de fase, pois olhando 2 enrolamentos por vez, estes estariam ligados em série. Destaca-se que a tensão de linha não é o dobro da tensão de fase em virtude do ponto comum entre os 3 enrolamentos, quando se realiza a tensão estrela.

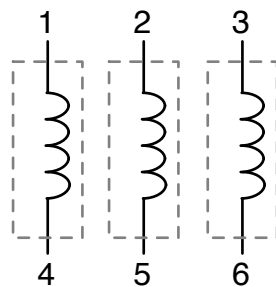
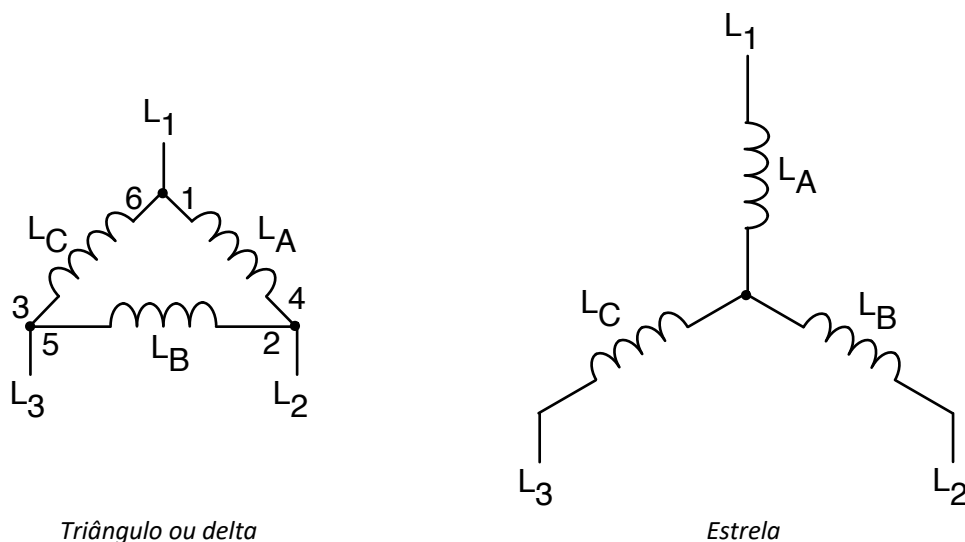


Figura 3 – Circuito elétrico simplificado do motor de indução trifásico.



Triângulo ou delta

Estrela

Figura 4 – Conexões do motor de indução trifásico.

2.3 Conexão do motor de indução trifásico para menor tensão

Os motores de indução, sejam monofásicos ou trifásicos, são dimensionados para operar com duas tensões distintas, isto é, seus enrolamentos suportam um determinado valor de tensão, mas conforme a conexão, nos terminais de ligação com a rede de energia elétrica pode-se ter valores de tensão distintos daqueles dos enrolamentos.

Assim, é comum se terem motores para operarem com tensões de alimentação de 220/380 V, sendo que na placa de identificação do motor será fornecido o esquema de conexão dos fios terminais do motor.

A Figura 5 apresenta as conexões dos terminais de conexão de um motor trifásico de 6 terminais, com os enrolamentos ligados em triângulo (delta), para operação com a tensão de fase para a qual o motor foi dimensionado.

Assim, a tensão de cada enrolamento é igual a tensão entre as fases do sistema trifásico, ou seja, neste caso a tensão nas fases do motor é igual a tensão de linha (fase - fase) do sistema de alimentação.

Ao inverter a conexão de dois enrolamentos ou de duas fases do sistema de alimentação se obtém a inversão do sentido de rotação do motor.

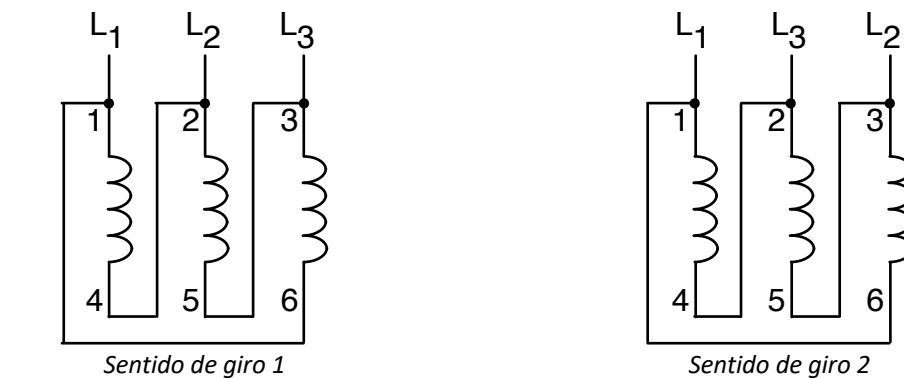


Figura 5 – Conexão dos terminais do motor monofásico para operação na menor tensão.

2.4 Conexão do motor de indução monofásico para maior tensão

Em contrapartida, se o motor for conectado na maior tensão, 380 V, por exemplo, então os enrolamentos devem ser ligados em estrela, conforme mostrado na Figura 6.

Neste caso, a tensão de cada enrolamento não é igual a tensão entre as fases do sistema trifásico, que é a tensão de linha do sistema de alimentação, sendo igual a tensão de fase, para a conexão em estrela, com relação de aproximadamente 1,73 (raiz de 3) entre as mesmas.

A inversão de rotação no sentido de giro do rotor do motor é obtida invertendo a conexão de dois enrolamentos ou de duas fases do sistema de alimentação do circuito elétrico.

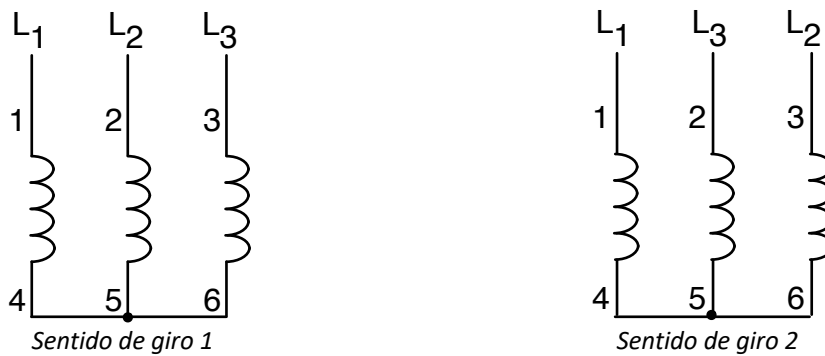


Figura 6 – Conexão dos terminais do motor monofásico para operação na maior tensão.

3 Elementos de Circuitos de Acionamento de Motores

3.1 Introdução

Os elementos de acionamento para os motores trifásicos são semelhantes aqueles utilizados para os motores monofásicos, tendo neste caso a possibilidade de conexão das 3 fases do sistema de energia elétrica.

Apresenta-se a seguir um elemento de proteção e manobra não abordado ainda, que é o disjuntor-motor, muito utilizado na proteção de circuitos de acionamento de motores de indução.

3.2 Elementos de proteção e manobra

Os disjuntores-motores são dispositivos de manobra e proteção, permitindo que o circuito seja ligado e desligado (manobra) e protegido contra sobrecargas, falta de fases e curto-circuito (proteção).

A Figura 7 mostra disjuntores-motores, que podem ter correntes nominais da ordem de 20 A, e permitir ajustes destas correntes entre 10 e 16 A, por exemplo.

Os disjuntores-motores são utilizados, em geral, para correntes até 100 A, podendo ter mecanismo de acionamento rotativo ou através de botões. Estes dispositivos tem alta capacidade de interrupção, tendo um disparador térmico, que é ajustado para proteção contra sobrecargas e com elemento sensível a falta de fases no sistema trifásico; e elemento magnético para proteção contra curto-circuitos.

É importante destacar que os disjuntores-motores reúnem as funções de diferentes dispositivos, substituindo fusíveis, disjuntores termomagnéticos, contatores e relés térmicos, por apenas um elemento, simplificando a instalação e reduzindo espaço de montagem nos painéis de controle de motores. A manobra do circuito é realizada pelo contator, integrante da construção do disjuntor-motor, que permite ligar e desligar o motor, ou seja, conectar e desconectar do circuito de alimentação.



Figura 7 – Exemplos de disjuntores-motores.

Fonte: <https://www.weq.net> e <https://www.soprano.com.br>. Acesso em 02/09/2021.

4 Circuitos de Acionamento de Motores Trifásicos

4.1 Introdução

A seguir serão apresentados alguns circuitos de acionamento de motores de indução trifásicos, buscando-se mostrar o funcionamento básico dos mesmos e permitir que a partir destes diferentes soluções e circuitos sejam propostos e implementados.

4.2 Partida direta de motor trifásico

O circuito de acionamento de um motor de indução trifásico, de maneira direta, é mostrada na Figura 8. O aspecto contrutivo desta chave de partida é mostrado na Figura 9, onde se tem diferentes tamanhos, conforme os elementos de proteção e manobra utilizados.

Os elementos constituintes do circuito da Figura 8 são:

- Rede de energia elétrica (L_1 , L_2 e L_3) – Representada pelas conexões L_1 , L_2 e L_3 , denotando os condutores de linha 1, 2 e 3, respectivamente. São os condutores fases do sistema trifásico de alimentação;
- Motor monofásico (M 3~) – Motor trifásico de indução, conectado por 3 fios no circuito de potência (de força ou principal);
- Contatos principais do contator (K_1) – Contatos que ficam em série, entre a rede de energia elétrica e a carga, neste exemplo com a numeração 1 – 2, 3 – 4 e 5 – 6, respectivamente para as fases 1, 2 e 3;
- Contatos principais do relé térmico (FT_1) – Contatos que ficam em série com a carga, logo após os contatos principais do contator e antes do motor, identificador por 1 – 2, 3 – 4 e 5 – 6;
- Fusíveis de proteção do circuito de força e comando – Elementos de proteção, identificados como F_1 , F_2 e F_3 ;

- Bobina do contator (K_1) – Identificada por A_1 e A_2 , está conectada no circuito de comando à rede de energia elétrica pelos contatos dos elementos de acionamento do circuito (botões, contatos auxiliares do contator e relé térmico);
- Botoeira para ligar o circuito (S_1) – Botoeira de pressão (terminais 3 e 4) com um contator normalmente aberto (NA), que apertada permitirá a alimentação da bobina do contator;
- Botoeira para desligar o circuito (S_0) – Botoeira de pressão (terminais 1 e 2) com um contato normalmente fechado (NF), que apertada irá interromper a corrente na bobina do contator (K_1), desligando o circuito de comando e por conseguinte o circuito de força e o motor;
- Contato auxiliar do contator (K_1) – Contato identificado como K_1 , tendo terminais de conexão identificados por 13 e 14, sendo do tipo NA. Este contato mantém o contator acionado após se retirar a pressão sobre a botoeira de ligar o circuito (S_1), sendo chamado de contato de retenção;
- Contato do relé térmico (FT_1) – Contato normalmente fechado (NF), identificado pela numeração 95 e 96, que fica em série com a bobina do contator (K_1), desligando a mesma caso o relé térmico atue;
- Fusíveis de proteção do circuito de comando – Elementos de proteção, identificados como F_{21} e F_{22} .

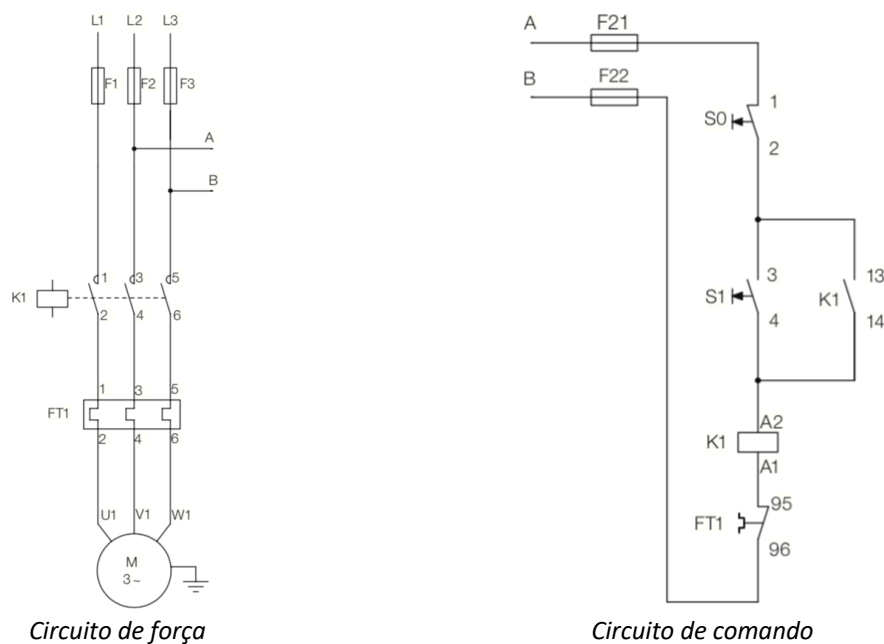


Figura 8 – Partida direta de motor trifásico.

Fonte: www.weq.net. Acesso em 02/09/2021.



Figura 9 – Exemplo de chave de partida de motor trifásico.

Fonte: www.weg.net. Acesso em 02/09/2021.

4.3 Partida direta de motor trifásico com disjuntor-motor

A Figura 10 mostra um exemplo de chave de partida direta de motor trifásico com disjuntor-motor, onde os circuitos de força e comando são mostrados na Figura 11.



Figura 10 – Exemplo de chave de partida direta com disjuntor-motor.

Fonte: www.weg.net. Acesso em 26/08/2021.

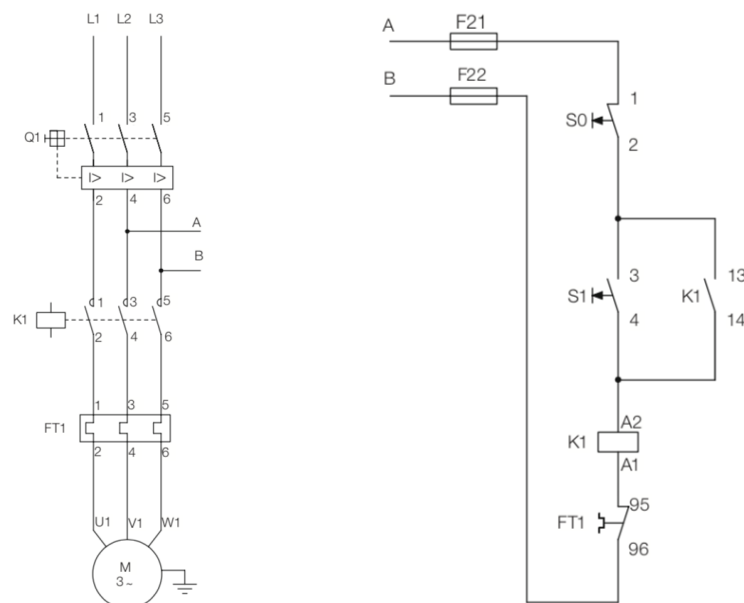


Figura 11 – Partida direta de motor trifásico com disjuntor-motor.

Fonte: www.weg.net. Acesso em 02/09/2021.

O circuito de comando mostrado na Figura 11 é idêntico aquele mostrado na Figura 8. Por sua vez, o circuito de força agora possui, além do contator, relé térmico e motor, também o disjuntor-motor, que está substituindo os fusíveis do circuito mostrado na Figura 8.

4.4 Partida direta com reversão de motor trifásico

A Figura 10 mostra os circuitos de força e comando para o acionamento de motor de indução trifásico com a possibilidade de inversão no sentido de rotação do eixo do motor.

Assim, ao acionar o contator K_1 , o motor será alimentado, conectando-se a rede de alimentação com os terminais do motor, na seguinte sequência: $L_1 \rightarrow U_1$, $L_2 \rightarrow V_1$ e $L_3 \rightarrow W_1$. Por outro lado, se for acionado o contator K_2 , então as fases 1 e 3 serão trocadas ao serem conectadas ao motor, ficando a seguinte sequência: $L_1 \rightarrow W_1$, $L_2 \rightarrow V_1$ e $L_3 \rightarrow U_1$.

Os dois contatores (K_1 e K_2) não podem ser acionados simultaneamente, pois aí se teria um curto-circuito entre as fases L_1 e L_3 . Assim, para evitar o acionamento acidental dos dois contatores simultaneamente, se faz o intertravamento elétrico e mecânico no circuito de comando, fazendo com que, se o contator K_1 estiver acionado, seu contato fechado (NF) nos terminais 31 e 32 estará aberto, impedindo que a bobina do contator K_2 seja alimentada. Do contrário, se o contator K_2 estiver acionado, seu contato fechado (NF) pelos terminais 21 e 22 estará aberto, impedindo que a bobina do contator K_1 seja alimentada.

Além disso, o intertravamento também pode ser feito de maneira mecânica, fazendo com que apenas uma das bobinas possa ser acionada, para evitar o acionamento simultâneo dos dois contatores.

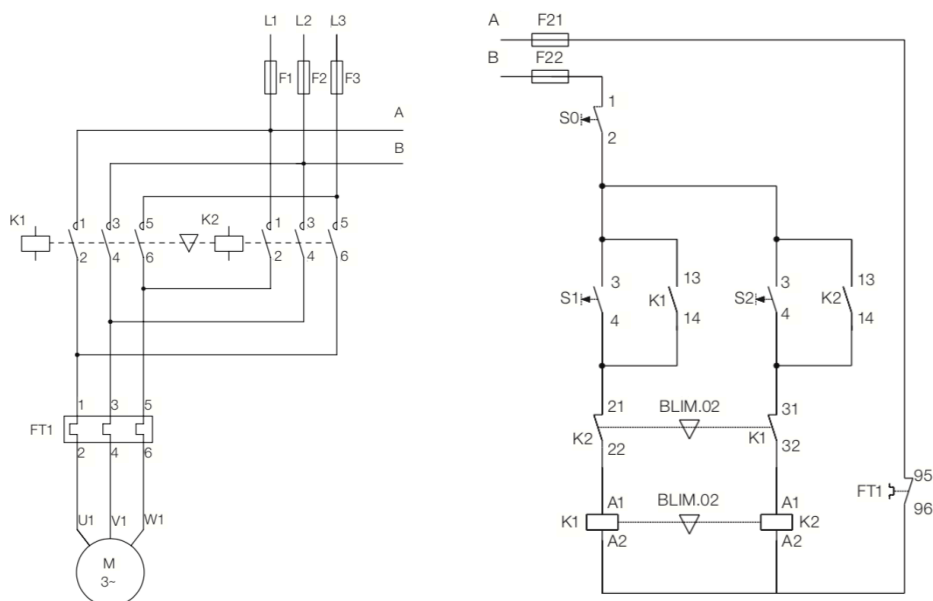


Figura 12 – Partida reversora de motor de indução trifásico.

Fonte: www.weg.net. Acesso em 02/09/2021.

4.5 Partida estrela-triângulo de motor trifásico

Em algumas situações, para redução da corrente de partida dos motores de indução trifásicos, pode-se partir o mesmo fazendo uma conexão do tipo estrela, para na sequência promover a conexão triângulo. Assim, a tensão de operação do motor deve ser, por exemplo, de 380 V/660 V, para permitir as duas conexões sem danos aos enrolamentos.

A Figura 13 mostra o circuito de força para acionamento estrela-triângulo de um motor trifásico, onde os contatores K_1 e K_2 fazem a conexão triângulo, enquanto K_1 e K_3 conectam o motor em estrela.

O circuito de comando é mostrado na Figura 14, onde se nota a presença de um relé temporizador, que é acionado ao se pressionar a botoeira para ligar (S_1), e que fará a conexão dos contatores K_1 , K_2 e K_3 na sequência descrita acima.

Além disso, na Figura 13 tem-se a opção de conectar o contator K_2 diretamente na rede de alimentação com fusíveis independentes (F_4 , F_5 e F_6), quando da operação com motores de altas potências, por exemplo, acima de 100 cv.

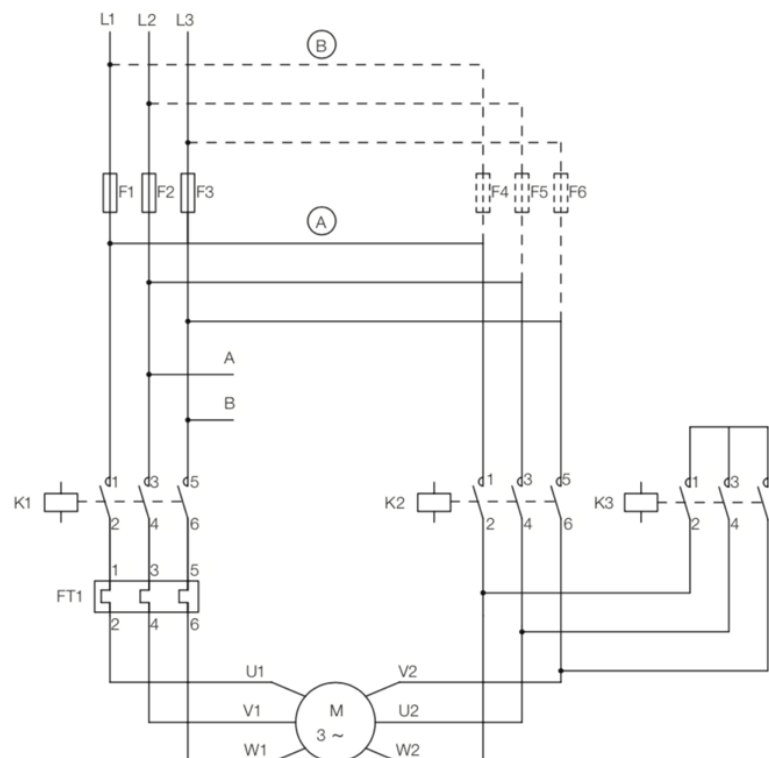


Figura 13 – Partida estrela-triângulo de motor de indução trifásico (circuito de força).

Fonte: www.weg.net. Acesso em 02/09/2021.

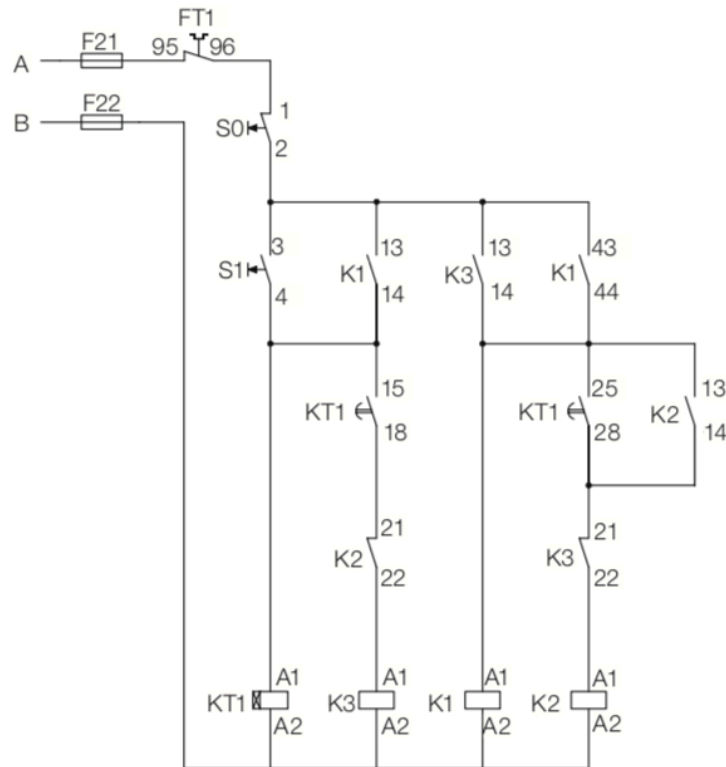


Figura 14 – Partida estrela-triângulo de motor de indução trifásico (circuito de comando).

Fonte: www.weq.net. Acesso em 02/09/2021.

4.6 Partida compensadora de motor trifásico

A conexão estrela-triângulo, apresentada no item anterior, permite reduzir a corrente de partida dos motores, pois em geral, para motores trifásicos, a corrente de partida pode ser de 5 a 7 vezes a corrente nominal do motor. No entanto, a tensão de alimentação do motor, quando a rede de energia elétrica for de 380 V, deverá ser de 380 V/600 V, o que implica em maior custo para a fabricação do motor.

Assim, outro sistema para redução da corrente de partida é alimentar o motor com uma tensão menor, por meio de um autotransformador, como mostrado na Figura 15. Esta técnica de partida é denominada de partida compensadora de motor trifásico.

Neste caso, ao partir do motor trifásico, são acionados os contatores K_2 e K_3 , que alimentam o autotransformador, conectam este elemento em estrela, e pela derivação de 80% de tensão, alimentam o motor trifásico. O contator K_1 permanece desligado durante a partida do motor.

O circuito de comando, mostrado na Figura 16, possui um temporizador, que após o tempo necessário para o motor partir, fará o desligamento dos contatores K_2 e K_3 e o acionamento do contator K_1 . Assim, o autotransformador será desligado, enquanto o motor será alimentado diretamente pela rede de energia elétrica.

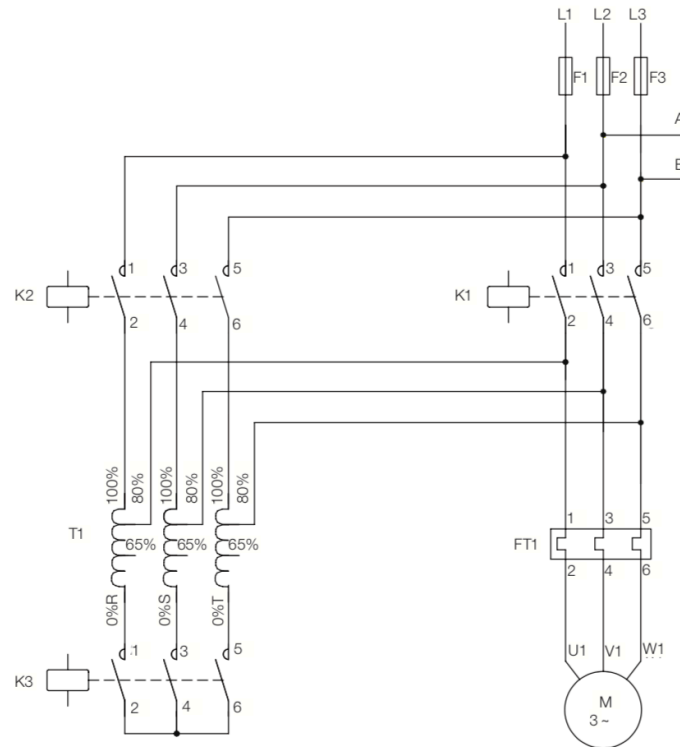


Figura 15 – Partida compensadora de motor de indução trifásico (circuito de força).

Fonte: www.weg.net. Acesso em 02/09/2021.

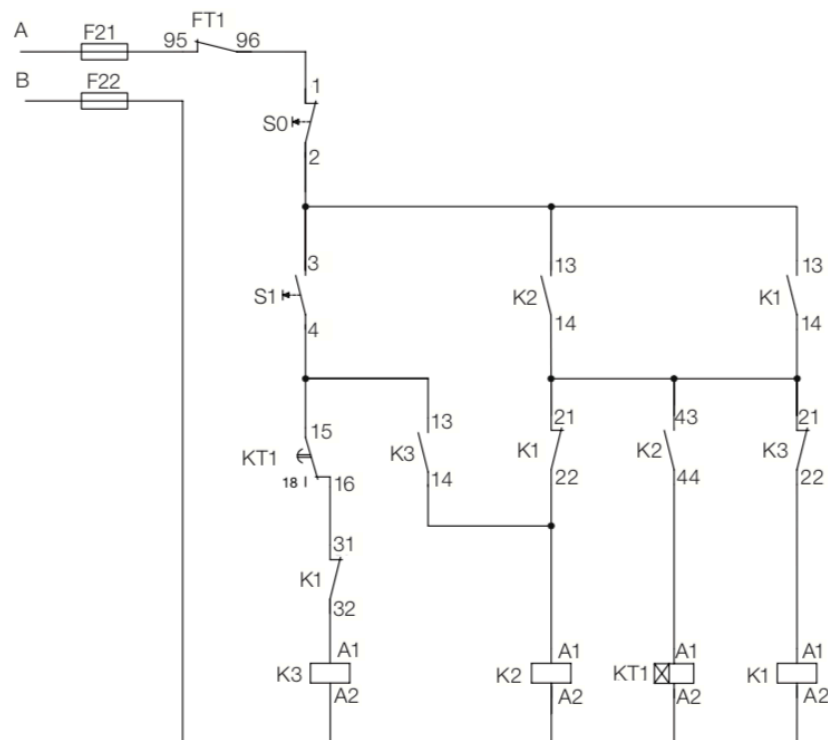


Figura 16 – Partida compensadora de motor de indução trifásico (circuito de comando).

Fonte: www.weg.net. Acesso em 02/09/2021.

A escolha da derivação de saída do autotransformador será feita conforme o nível de redução de tensão e corrente desejado, podendo-se ligar o motor nas saídas de 80% ou 65%. Além disso, é possível implementar circuitos com contatores que partam o motor conectando o mesmo na derivação de 65%, após algum tempo conectam o mesmo em 80%, para finalmente, após novamente algum tempo, conectarem o motor diretamente (100%) na rede de alimentação.

5 Exercícios

Exercícios Resolvidos

ER 01. Quais proteções um disjuntor-motor proporciona ao circuito elétrico onde é utilizado?

O disjuntor-motor protege o motor e circuito contra curto-circuitos, sobrecargas e falta de fases.

ER 02. A partir da placa de identificação de um motor trifásico, mostrada na Figura 17, verifique se é possível conectar o mesmo em triângulo na rede de alimentação trifásica em Santa Catarina.

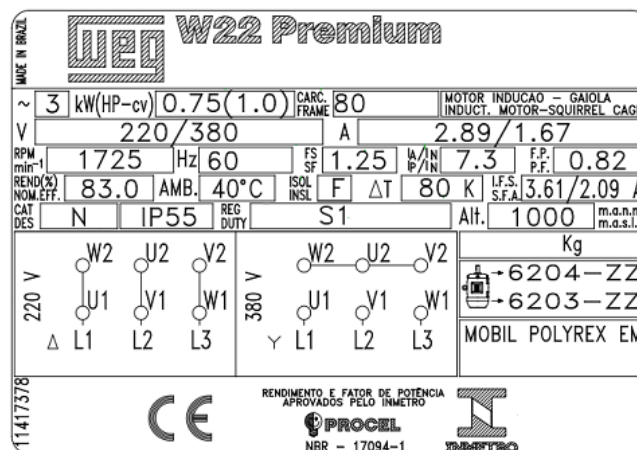


Figura 17 – Placa de identificação de motor trifásico.

Fonte: www.weg.net. Acesso em 02/09/2021.

Em Santa Catarina a tensão de alimentação entre fases, no sistema trifásico, é de 380 V, então motor da Figura 17 não poderia ser ligado em triângulo.

ER 03. Qual a relação entre a corrente de partida e nominal para o motor da Figura 17.

A relação entre a corrente de partida e a corrente nominal é de 7,3.

ER 04. O que é uma partida direta com reversão de um motor trifásico?

É o circuito que permite acionar o motor, pelo método de partida direta, fazendo a inversão do sentido de rotação do eixo do motor, conforme for desejado.

ER 05. O que se deve fazer para inverter o sentido de rotação de um motor de indução trifásico?

Deve-se inverter a conexão de duas fases do motor.

Exercícios Propostos

EP 01. O que são disjuntores-motores?

EP 02. Qual a finalidade de se utilizar partidas estrela-triângulo e partidas compensadas?

EP 03. A partir da Figura 17, qual a corrente de operação deste motor, se conectado em 380 V?

EP 04. Qual a velocidade do motor mostrado na Figura 17?

EP 05. Comente sobre algumas aplicações comuns para os motores de indução trifásicos.

6 Atividade Avaliativa

6.1 Introdução – O que preciso saber

Ao final deste objetivo de aprendizagem são apresentadas cinco questões, que devem ser respondidas sem consultar o material. Se você conseguir responder as questões e conferir as respostas com o gabarito abaixo, parabéns, você concluiu com êxito este tópico. Caso tenha errado alguma questão, revise o conteúdo relacionado com a mesma e refaça a questão, procurando se concentrar mais desta vez, para acertar o exercício e fixar bem o conteúdo.

AA 01. O que são disjuntores-motores?

AA 02. Comente sobre a partida compensada de motores de indução trifásicos.

AA 03. Qual a corrente de partida do motor da Figura 17, se conectado em 380 V?

AA 04. Explique o que é partida direta de um motor de indução trifásico.

AA 05. Como pode ser alterada a velocidade de rotação de um motor trifásico de indução?

AA 01. Disjuntores-motores são dispositivos de manobra e proteção, que permitem ligar e desligar o circuito e proteger o mesmo contra sobrecarga, curto-circuito e falta de fase.

AA 02. A partida compensada de motores trifásicos consiste em ligar o motor durante sua partida em uma tensão menor do que a nominal, o que é possível ao se usar um autotransformador. Após o motor partir, este será conectado na tensão nominal de operação.

AA 03. A corrente nominal do motor da figura, quando conectado em 380 V, é de 1,67 A. Como a corrente de partida é de 7,3 vezes maior, então será de 12,2 A.

AA 04. A partida direta de motores trifásicos consiste em ligar, por meio de dispositivos de manobra, como contadores, por exemplo, o motor diretamente na rede de alimentação, aplicando a tensão disponibilizada ao motor.

AA 05. A velocidade de rotação de um motor trifásico de indução pode ser alterada modificando-se a frequência da tensão de alimentação, utilizando inversores de frequência, por exemplo.



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA

DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA

CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM ELETRÔNICA INDUSTRIAL

Acionamentos Eletrônicos



GUIA DE ESTUDO

- OBJETIVO DE APRENDIZAGEM -

ACIONAMENTO DE MOTORES DE INDUÇÃO

COM CONTROLADORES LÓGICO

PROGRAMÁVEIS E INVERSORES DE

FREQUÊNCIA

Prof. Clóvis Antônio Petry.

Florianópolis, setembro de 2021.

ACIONAMENTO DE MOTORES DE INDUÇÃO COM CONTROLADORES LÓGICO PROGRAMÁVEIS E INVERSORES DE FREQUÊNCIA

Objetivo de Aprendizagem

Acionamento de motores de motores de indução monofásicos e trifásicos.

Objetivos parciais

- Estudar os aspectos relacionados com o acionamento de motores de indução monofásicos e trifásicos;
- Conhecer os principais elementos para acionamento de motores de indução com controladores lógico programáveis e inversores de frequência;
- Conhecer circuitos para acionamento de motores de indução monofásicos e trifásicos.

Aulas relacionadas

Este objetivo de aprendizagem está relacionado com a aula 14 da disciplina.

Pré-requisitos

Ter estudado o objetivo de aprendizagem 13 relacionado ao acionamento de motores de indução trifásicos.

Continuidade dos Estudos

Os objetivos de aprendizagem da disciplina de Acionamentos Eletrônicos findam neste capítulo.

Roteiro para estudos

Os estudos referentes a este objetivo de aprendizagem consistem em:

1. Estudar este documento resumo, realizando as atividades propostas no mesmo;
2. Responder o quiz relacionado a este objetivo de aprendizagem;
3. Caso perceba necessidade, estudar a apresentação deste assunto ou consultar os livros texto indicados para esta disciplina;
4. Realizar os exercícios deste tópico da matéria;
5. Realizar a avaliação final para progredir ao próximo conteúdo.

Referências

- Material disponibilizado para a disciplina de Acionamentos Eletrônicos – 2021/1. Departamento Acadêmico de Eletrônica, Instituto Federal de Santa Catarina, Campus Florianópolis.
- STEPHAN, Richard M. Acionamento Comando e Controle de Máquinas Elétricas. Rio de Janeiro: UFRJ, 2009.

Check-list

Caro estudante, verifique se você completou as atividades deste objetivo de aprendizagem e obteve êxito para continuar seus estudos.

Assinale as atividades realizadas:

Estudo do documento resumo:

- Leitura do documento resumo;
- Exercícios do documento resumo;
- Atividade avaliativa do documento resumo.
- Obtive êxito e entendi o conteúdo deste documento;
- Ainda não entendi bem o conteúdo e estudarei o mesmo com mais profundidade.

Estou com dúvidas, irei estudar com mais detalhes este conteúdo:

- Assistir a apresentação relacionada ao conteúdo (apresentação 14);
- Ler este guia de estudo (objetivo de aprendizagem 14).

Ainda estou com dúvidas:

- Entrarei em contato com o professor.

Obtive êxito, então seguirei em frente:

- Responder ao quiz deste conteúdo no Moodle;
- Informar ao professor que estou avançando com o conteúdo.

Parabéns, continue estudando com afinco e vamos em frente!!

CONTEÚDO

- OBJETIVO DE APRENDIZAGEM -
ACIONAMENTO DE MOTORES DE INDUÇÃO
COM CONTROLADORES LÓGICO
PROGRAMÁVEIS E INVERSORES DE
FREQUÊNCIA

1 Introdução

Os capítulos anteriores abordaram o acionamento dos motores de indução monofásicos e trifásicos com contadores, apresentando-se também os principais elementos que compõem os circuitos de acionamento.

Este capítulo terá como objetivo principal apresentar aspectos relevantes relacionados ao acionamento de motores de indução com controladores lógico programáveis e inversores de frequência.

1.1 Conteúdo – O que irei estudar

Estudaremos neste tópico:

- Principais elementos para acionamento de motores de indução;
- Circuitos para acionamento de motores de indução monofásicos e trifásicos.

1.2 Metodologia – O que devo fazer e como fazer

Leia com atenção o conteúdo a seguir. Ao final deste tópico são apresentados exercícios resolvidos. Após são apresentados alguns exercícios propostos.

Ao realizar estas atividades e se sentir confiante para progredir, siga os passos indicados na primeira página deste documento.

Espera-se que após estudar este assunto, você consiga:

- Descrever o que são controladores lógico programáveis;
- Descrever o que são inversores de frequência;
- Citar os principais elementos para acionamento dos motores de indução;
- Explicar o funcionamento dos circuitos de acionamento de motores de indução.

A atividade avaliativa deste objetivo de aprendizagem consistirá em perguntar ao estudante para descrever o funcionamento de um circuito de acionamento de um motor de indução trifásico, por exemplo.

Exemplo de atividade avaliativa:

1. Explicar com suas palavras o que são controladores lógico programáveis.
2. Explicar com suas palavras o que são inversores de frequência.
3. Citar elementos utilizados para acionamento de motores de indução.
4. Explicar o funcionamento de algum circuito de acionamento de motor de indução monofásico ou trifásico.

2 Controladores Lógico Programáveis

2.1 Introdução

Os principais elementos de circuitos de acionamento de motores monofásicos e trifásicos foram apresentados e estudados nos capítulos anteriores.

Apresenta-se a seguir os controladores lógico programáveis, dispositivos especializados muito utilizados para automação industrial, dentre outras aplicações.

2.2 Controlador lógico programável

O controlador lógico programável (CLP) é um dispositivo (equipamento) eletrônico de controle e monitoramento para diversas aplicações, principalmente industriais. Em termos de ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), o controlador lógico programável é um equipamento eletrônico digital com hardware e software compatíveis com aplicações industriais¹.

A Figura 1 mostra exemplos de controladores lógico programáveis comerciais, que podem ter diferentes interfaces com o usuário (IHM) e número variável de entradas e saídas.



Figura 1 – Exemplos de controladores lógico programáveis.

Fonte: <https://www.weg.net>, <https://siemens.com> e <https://www.altus.com.br>. Acesso em 10/09/2021.

Os controladores lógico programáveis são equipamentos especializados, que possuem entradas para receberem os sinais de diferentes sensores (botões, chaves fim de curso, sensores capacitivos, sensores de temperatura, etc.), realizam o processamento interno de sinais por intermédio de uma unidade central de processamento (CPU), permitindo a interação com o usuário usando interfaces homem-máquina (IHM) com teclados e displays e/ou conexão com computadores, e acionam, monitoram e controlam diferentes atuadores e cargas, tais como motores, servomotores, aquecedores, etc; conforme pode se observar na Figura 2.

¹ Controlador lógico programável. Acessado em 11/09/2021. Disponível em https://pt.wikipedia.org/wiki/Controlador_l%C3%B3gico_program%C3%A1vel.

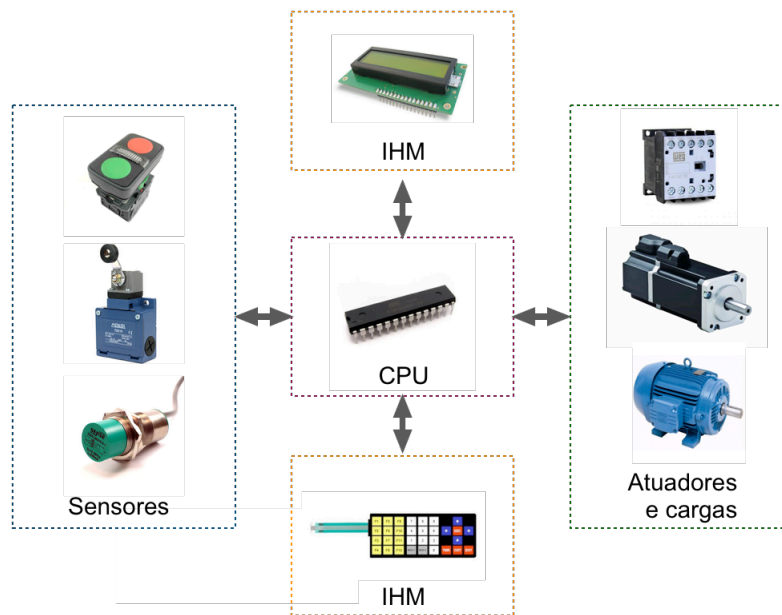


Figura 2 – Estrutura funcional de controladores lógico programáveis.

Assim, em síntese, pode-se entender um controlador lógico programável como a composição de diferentes elementos discretos, como mostrado na Figura 3, onde a partir de um Arduino, placa com botões e *display* e placa de relés, pode-se implementar as principais funcionalidades de um CLP.

A versão comercial da estrutura mostrada na Figura 3 é mostrada na Figura 4, possuindo 8 relés para saídas com 10 A de corrente elétrica, 8 entradas por meio de optoacopladores, microcontrolador ATMEGA328, módulo de conexão com internet, módulo de relógio, dentre outras características comuns para aplicações envolvendo a plataforma Arduino.

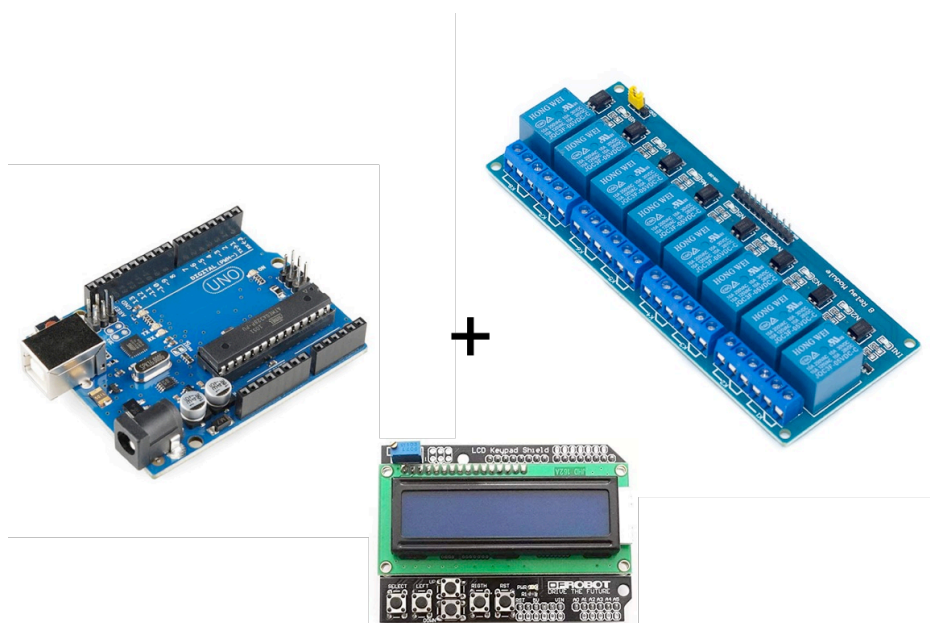


Figura 3 – Elementos discretos para implementação de um controlador lógico programável.

Fonte: Adaptado de <https://www.filipeflop.com>. Acesso em 10/09/2021.



Figura 4 – Controlador lógico programável com Arduino.

Fonte: <https://clp.ind.br>. Acesso em 10/09/2021.

2.1 Linguagem ladder

Os controladores lógico programáveis, em geral, são conectados em computadores ou dispositivos próprios, para a programação dos mesmos, implementando as funcionalidades desejadas em soluções para automação industrial, por exemplo.

Assim, visando simplificar e facilitar o processo de programação do controlador lógico programável, pode-se utilizar diferentes linguagens de programação. Ao utilizar estruturas com Arduino, como mostrado na Figura 3, seria utilizada a linguagem de programação C ou a própria linguagem de programação do Arduino.

Em aplicações industriais, é comum o uso da linguagem ladder para realizar a programação dos controladores lógico programáveis de diferentes fabricantes, facilitando o uso e instalação pelos profissionais da área, além de simplificar alterações posteriores e manutenções nos circuitos implementados.

A linguagem ladder, também conhecida como diagrama ladder ou diagrama de escada, possui elementos gráficos específicos para representar cada elemento de circuito elétrico, tais como sensores, botões, bobinas, contatos, dentre outros.

A estrutura lógica dos diagramas ladder é mostrada na Figura 5, onde se representam os principais elementos da lógica ladder, que são os barramentos, ligações, contatos e saídas.

Os contatos podem ser elementos externos ao controlador lógico programável, como sensores ou botões conectados em suas entradas, ou internos, como contatos abertos e fechados de relés internos ao dispositivo. Do mesmo modo, as bobinas podem ser saídas para acionamento de elementos ou internas, representando elementos que são acionados logicamente pela abertura e fechamento dos contatos.

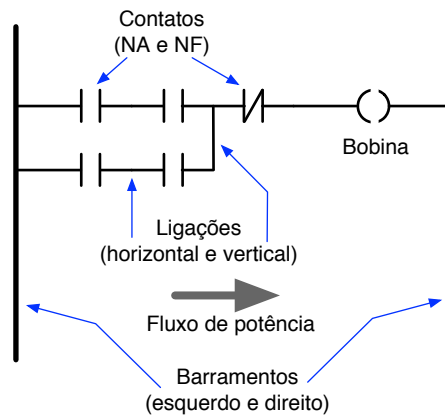


Figura 5 – Exemplo de diagrama ladder.

Fonte: Adaptado de <https://www.weg.net>. Acesso em 10/09/2021.

3 Inversores de Frequência

3.1 Introdução

Os inversores de frequência são equipamentos desenvolvidos utilizando circuitos de eletrônica de potência e semicondutores operando em altas frequências (dezenas de kHz), muito utilizados para acionamento de motores de indução com velocidade variável.

A seguir serão apresentados os inversores de frequência, nos seus aspectos mais básicos e exemplos de modelos disponíveis comercialmente.

3.1 Princípio de funcionamento dos inversores de frequência

A velocidade de um motor de indução pode ser alterada modificando-se o número de polos ou a frequência de alimentação da máquina, o que irá alterar a velocidade do campo girante, conforme estudado anteriormente neste curso.

A velocidade girante ou síncrona é calculada por:

$$N_s = \frac{120 \cdot F}{P} [rpm]$$

Onde:

- N_s – Velocidade do campo girante, denominada de velocidade girante ou síncrona em rotações por minuto (rpm);
- F – Frequência da rede de alimentação em Hertz;
- P – Número de polos formados no estator.

Neste sentido, os inversores de frequência tem por objetivo principal permitir o acionamento de motores de indução com velocidade variável, alterando-se a frequência de alimentação da máquina, desde zero até centenas de Hertz.

Os inversores de frequência são implementados a partir de conversores de corrente contínua para corrente alternada, em geral, inversores de tensão, como mostrado na Figura 6, também conhecido como conversor ponte completa PWM senoidal.

O acionamento dos interruptores T_1 até T_4 , comumente semicondutores do tipo IGBT (*insulated-gate bipolar transistor* - transistores de porta isolada), é realizado em alta frequência empregando modulação por largura de pulsos (PWM), neste caso seguindo um padrão senoidal, por isso denominada de PWM senoidal.

A partir do acionamento dos interruptores T_1 até T_4 , tem as diversas etapas de operação do conversor, que podem ser duas, desconsiderando-se as etapas de tempo morto, se a modulação for de dois níveis. Já para modulação três níveis o conversor terá quatro etapas de operação no semiciclo positivo (tensão de saída positiva) e outras quatro etapas no semiciclo negativo (tensão de saída negativa), desconsiderando-se o tempo morto.

O funcionamento detalhado e projeto destes conversores é estudado em cursos de eletrônica de potência, que fazem parte, comumente, dos cursos na área tecnológica de eletricidade e eletrônica.

As principais formas de onda para o conversor ponte completa PWM senoidal são mostradas na Figura 7, denotando a modulação três níveis e a tensão na carga após a filtragem, quando a mesma apresenta formato senoidal puro, desconsiderando-se a ondulação de alta frequência (ripple) presente na tensão sobre o capacitor de saída C_o .

No circuito da Figura 6, o indutor (L_o) e o capacitor (C_o) formam um filtro de segunda ordem, para filtrar o conteúdo de alta frequência (frequência de comutação) da tensão de saída do conversor (V_{ab}), disponibilizando na carga (R_o) uma tensão senoidal, como mostrado na Figura 7.

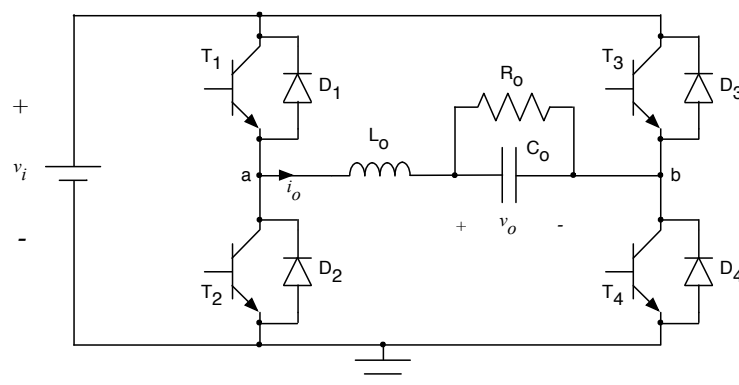


Figura 6 – Circuito do conversor cc-ca ponte completa PWM senoidal.

Ao utilizar um conversor ponte completa senoidal para acionamento de motores de indução, visando redução de custos e de volume do dispositivo, não se utilizou o filtro de saída (L_o e C_o), aplicando-se diretamente ao motor a tensão pulsada mostrada na Figura 7.

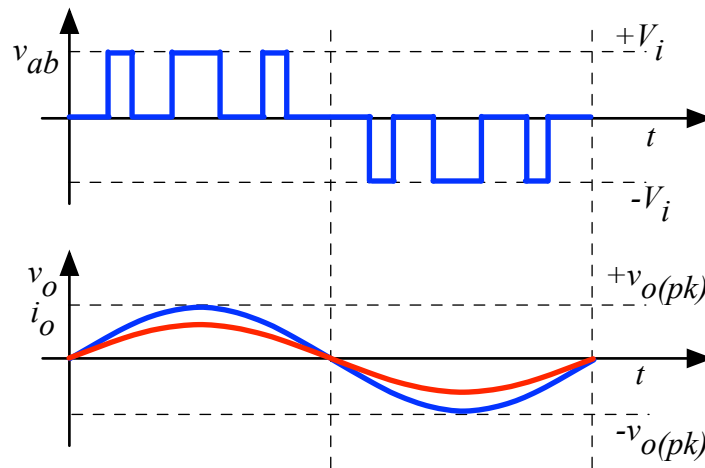


Figura 7 – Principais formas de onda para o conversor ponte completa PWM senoidal.

3.2 Inversores de frequência

Os inversores de frequência podem ter diferentes aspectos, tamanhos e capacidades elétricas, conforme as aplicações a que se destinam. A Figura 8 mostra exemplos de inversores de frequência disponíveis comercialmente.

O diagrama de blocos e principais elementos que compõem um inversor de frequência típico são mostrados na Figura 9 onde se pode destacar dois grandes blocos, sendo eles: estágio de potência e elementos de controle.

O circuito de potência utiliza conversores ca-cc e cc-ca, fazendo a conversão da tensão de alimentação em corrente alternada para corrente contínua, para posterior inversão por conversores ponte completa monofásicos ou trifásicos. Por sua vez, os principais elementos do circuito de controle são a interface homem-máquina (IHM), entradas digitais, e conexões com outros dispositivos, para operação em rede ou com integração para fins de automação industrial, por exemplo.

O diagrama de blocos da Figura 9 é de um inversor de frequência comercial, mostrado na Figura 12 e que permite o acionamento de motores trifásicos a partir de entradas monofásicas ou bifásicas, identificadas por L_1 e L_2 ou L e N .

O acionamento de motores monofásicos também pode ser realizado com inversores de frequência, mas não é uma aplicação tão comum, levando em conta o custo de aquisição e vantagens do motor trifásico, principalmente se for conectado em uma rede de alimentação monofásica com um inversor como o que está mostrado na Figura 9.



Figura 8 – Exemplos de inversores de frequência.

Fonte: <https://www.weq.net>, <https://siemens.com> e <https://new.abb.com>. Acesso em 10/09/2021.

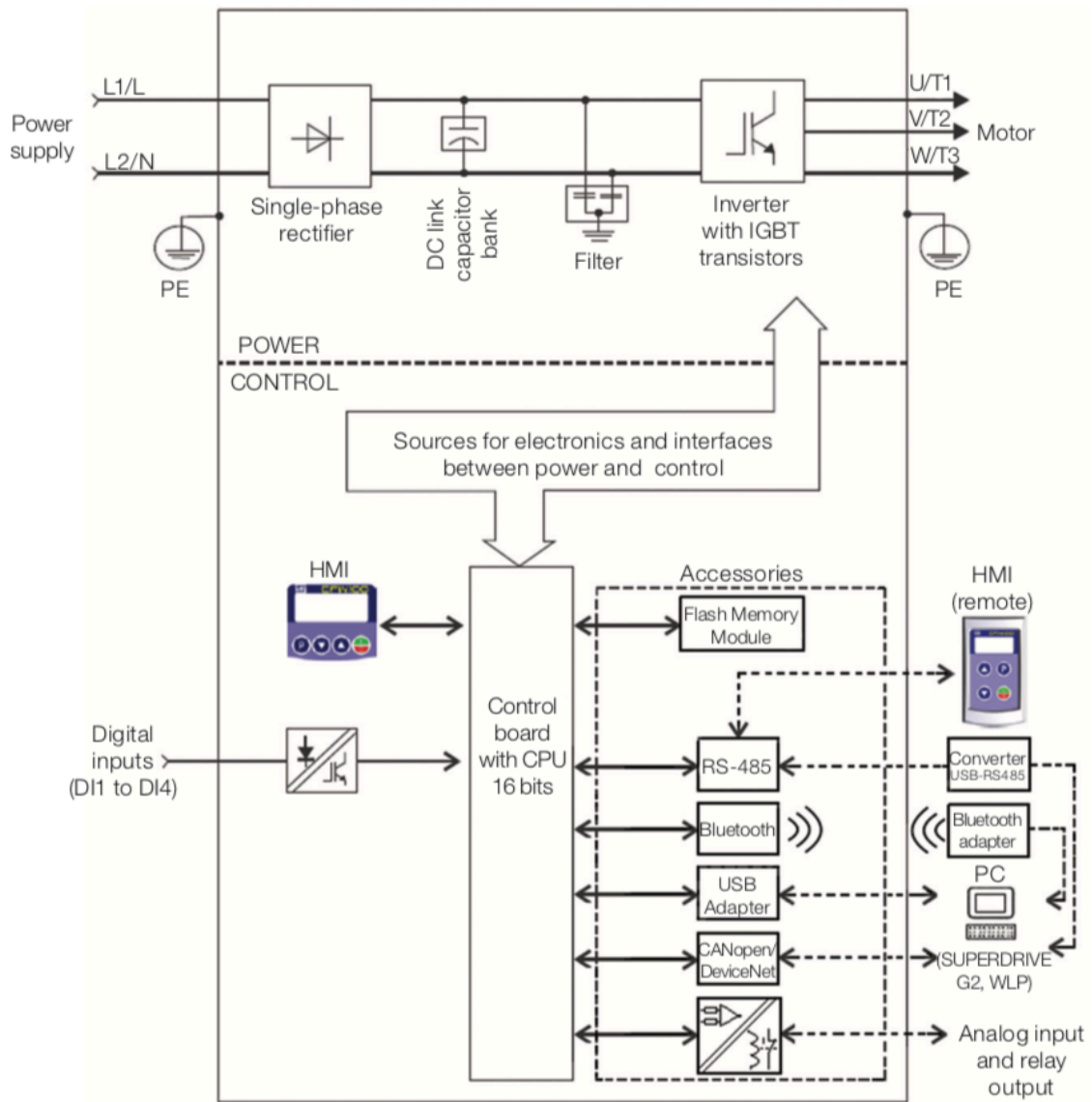


Figura 9 – Estrutura de blocos de um inversor de frequência.

Fonte: <https://www.weq.net>. Acesso em 10/09/2021.

4 Circuitos de Acionamento de Motores de Indução

4.1 Introdução

A seguir serão apresentados alguns circuitos de acionamento de motores de indução trifásicos, buscando-se mostrar o funcionamento básico dos mesmos e permitir que a partir destes diferentes soluções e circuitos sejam propostos e implementados.

4.2 Acionamento de motor de indução com controlador lógico programável

O controlador lógico programável, denominado pelo fabricante como micro controlador programável, mostrado na Figura 10, possui 8 entradas digitais e duas entradas analógicas, todas na parte superior, onde também se tem a conexão para a fonte de alimentação em corrente contínua. Na parte inferior se tem 4 saídas, formadas por contatos de relés com capacidade de 8 A em cada um dos contatos normalmente abertos (NA).

O circuito de acionamento de um motor de indução monofásico com o controlador lógico programável da Figura 10 é mostrado na Figura 11, onde se nota a utilização de uma fonte de alimentação de 220 V em corrente alternada para 24 V em tensão contínua para alimentação do dispositivo, enquanto duas botoeiras são conectadas às entradas digitais para ligar e desligar o motor, que é acionado pelo relé do CLP.



Figura 10 – Exemplo de controlador lógico programável para acionamento de motor de indução.

Fonte: www.weg.net. Acesso em 11/09/2021.

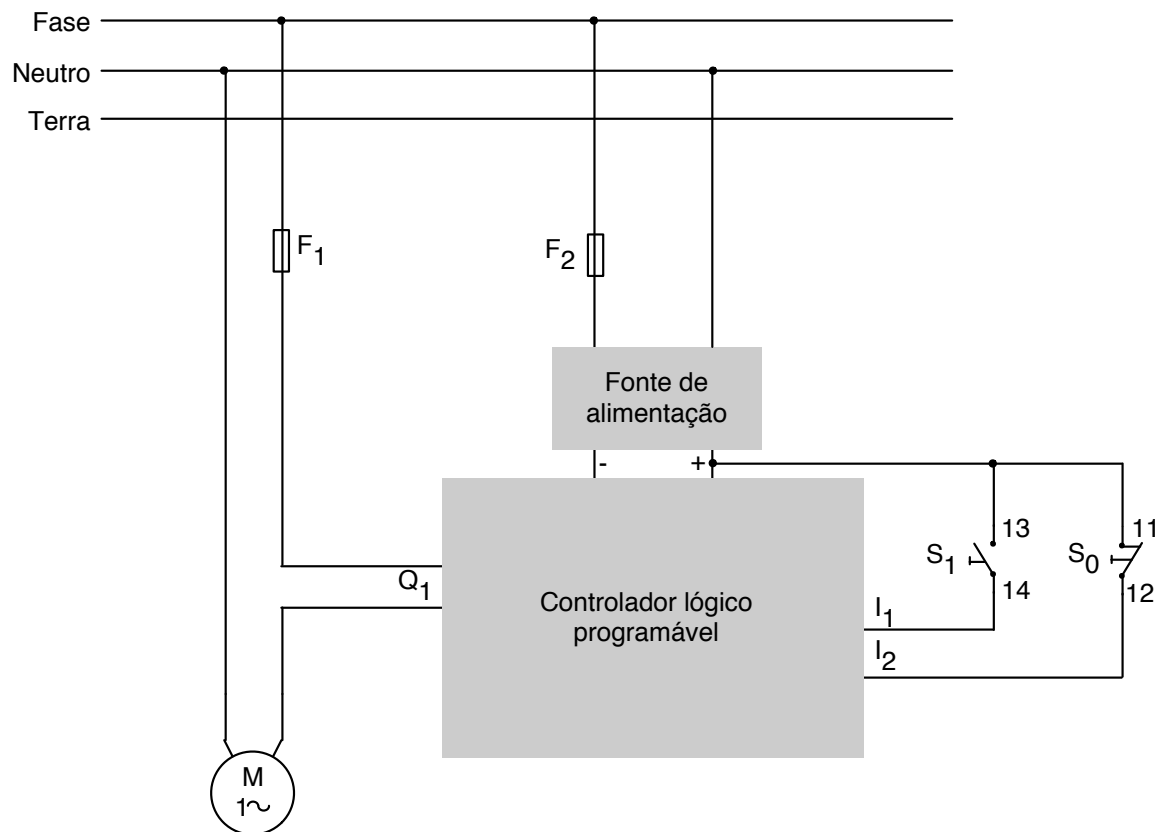


Figura 11 – Acionamento de motor monofásico com controlador lógico programável.

4.3 Acionamento de motor de indução com inversor de frequência

Um exemplo de inversor de frequência é mostrado na Figura 12, que pode operar com tensão de alimentação com dois fios, isto é, em uma rede monofásica, com amplitude entre 220 e 240 V, disponibilizando na saída conexão à três fios, ou seja, trifásica.

O circuito de acionamento de um motor de indução trifásico com o inversor de frequência da Figura 12 é mostrado na Figura 13, onde se nota a simplicidade do circuito e a conexão de um motor trifásico em uma rede de alimentação monofásica, caracterizando uma solução interessante para aplicações residenciais, comerciais e industriais de baixas e médias potências, por exemplo.



Figura 12 – Exemplo de inversor de frequência para acionamento de motor de indução.

Fonte: www.weg.net. Acesso em 11/09/2021.

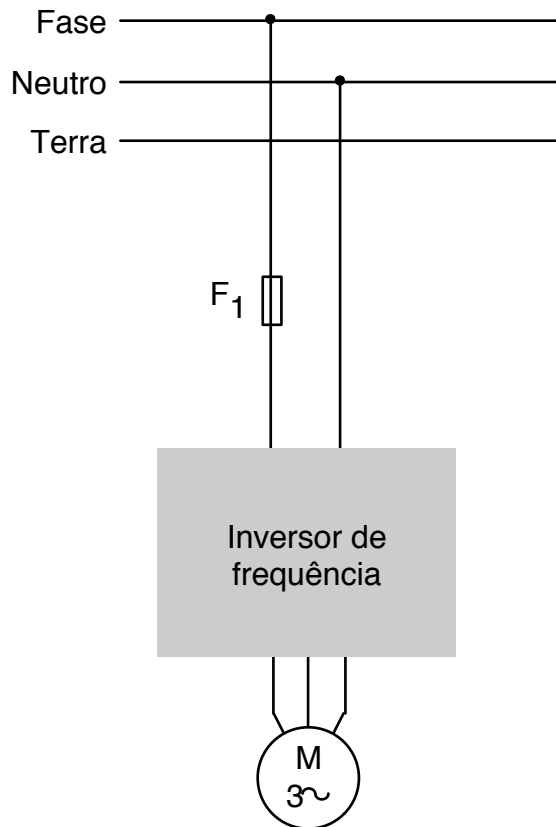


Figura 13 – Acionamento de motor trifásico com inversor de frequência.

5 Exercícios

Exercícios Resolvidos

ER 01. O que são CLPs?

CLPs são controladores lógico programáveis, dispositivos especializados utilizados para controle e monitoramento de diferentes cargas.

ER 02. Como pode ser alterada a velocidade de rotação de um motor de indução.

A velocidade de rotação de um motor de indução pode ser alterada modificando-se o número de polos ou a frequência da tensão de alimentação.

ER 03. Os inversores de frequência são construídos a partir de que conversores?

Os inversores de frequência são construídos a partir de conversores cc-ca, conhecidos como inversores de tensão.

ER 04. Cite uma vantagem na utilização de controladores lógico programáveis.

Uma vantagem ao utilizar controladores lógico programáveis é a possibilidade de integração de

diferentes elementos de acionamento, controle e monitoramento, permitindo a implementação da automação industrial.

ER 05. Os inversores de frequência utilizam que tipo de semicondutores?

Os inversores de frequência operam com altas frequências de comutação, da ordem de dezenas de kHz, utilizando interruptores rápidos, que podem ser do tipo MOSFET ou IGBT, por exemplo.

Exercícios Propostos

EP 01. Descreva os principais elementos que compõem um controlador lógico programável.

EP 02. Como funcionam, simplificada, os inversores de frequência?

EP 03. É possível fazer o acionamento de um motor de indução trifásico em uma rede de alimentação monofásica?

EP 04. O que significa acionamento de um motor à velocidade variável?

EP 05. Comente sobre algumas aplicações comuns para controladores lógico programáveis.

6 Atividade Avaliativa

6.1 Introdução – O que preciso saber

Ao final deste objetivo de aprendizagem são apresentadas cinco questões, que devem ser respondidas sem consultar o material. Se você conseguir responder as questões e conferir as respostas com o gabarito abaixo, parabéns, você concluiu com êxito este tópico. Caso tenha errado alguma questão, revise o conteúdo relacionado com a mesma e refaça a questão, procurando se concentrar mais desta vez, para acertar o exercício e fixar bem o conteúdo.

AA 01. O que são controladores lógico programáveis?

AA 02. O que são inversores de frequência?

AA 03. Quais os principais elementos de um conversor lógico programável?

AA 04. Quais os principais elementos de um inversor de frequência?

AA 05. Comente sobre as vantagens de se acionar motores de indução com inversores de frequência.

AA 01. Controladores lógico programáveis são dispositivos especializados que permitem controlar e monitorar diferentes cargas.

AA 02. Inversores de frequência são conversores cc-ca que permitem alterar a frequência e a amplitude da tensão de saída, que tem sua fundamental em formato senoidal.

AA 03. Os principais elementos de um controlador lógico programável são as entradas digitais e analógicas, a unidade central de processamento, a interface com o usuário e as saídas, comumente como contatos abertos de relés.

AA 04. Os principais elementos dos inversores de frequência são o estágio de potência com os conversores ca-cc e cc-ca e o estágio de controle, tendo a interface com o usuário, unidade central de processamento, entradas e saídas, além dos elementos de comunicação, por exemplo.

AA 05. Ao usar inversores de frequência para o acionamento de motores de indução, especialmente os trifásicos, pode alterar sua velocidade, implementar partida suave, acelerando e desacelerando o motor durante a partida e parada do motor, além de alterar as curvas de torque e velocidade da máquina.