

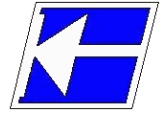


INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA

DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA

CURSO TÉCNICO DE ELETRÔNICA

Máquinas Elétricas



CAPÍTULO 4

MOTORES DE CORRENTE CONTÍNUA E DISPOSITIVOS DE ACIONAMENTO

MÁQUINAS DE CORRENTE CONTÍNUA

Objetivo de Aprendizagem

Estudar os motores de corrente contínua e os principais elementos para acionamento.

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;
- Estudar os quadrantes de operação de uma máquina de corrente contínua;
- Conhecer os principais elementos para acionamento de 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. Realizar os exercícios deste tópico da matéria;
3. Caso perceba necessidade, estudar a apresentação deste assunto ou consultar os livros texto indicados para esta disciplina;
4. Realizar a avaliação final para progredir ao próximo conteúdo.

Referências

- Material disponibilizado para a disciplina de Máquinas Elétricas – 2026/1. 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.

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 e os principais dispositivos para seu acionamento.

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;
- Quadrantes de operação de uma máquina de corrente contínua;
- Elementos 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.

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;
- Descrever os quadrantes de operação das máquinas elétricas de corrente contínua;
- Citar os principais elementos para acionamento dos motores de corrente contínua.

A atividade autoavaliativa 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.
 6. Explicar com suas palavras os quadrantes de operação das máquinas de corrente contínua.
 7. Citar elementos utilizados para acionamento de motores 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).

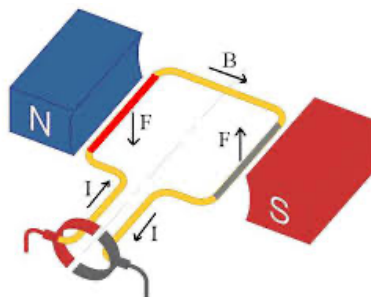


Figura 1 – Espira imersa em um campo magnética.

Fonte: <https://www.dt.fee.unicamp.br>. Acessado em 17/06/2021.

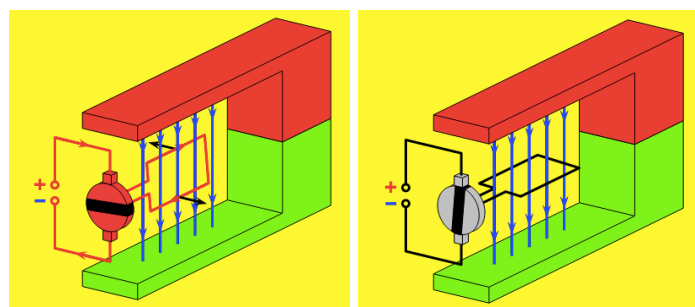


Figura 2 – Funcionamento do motor de corrente contínua.

Fonte: <https://www.walter-fendt.de>. Acessado em 17/06/2021.

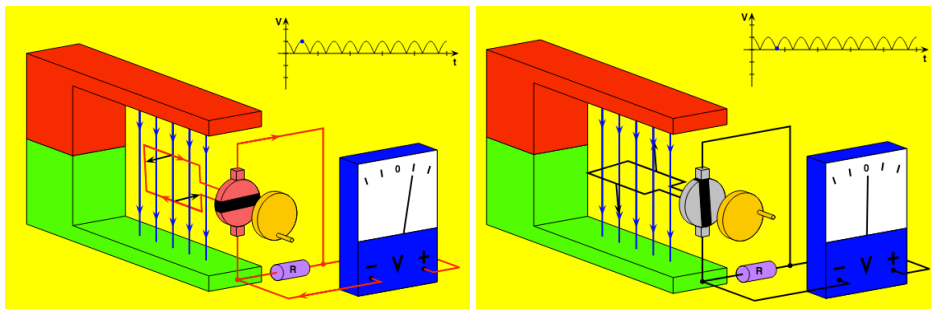
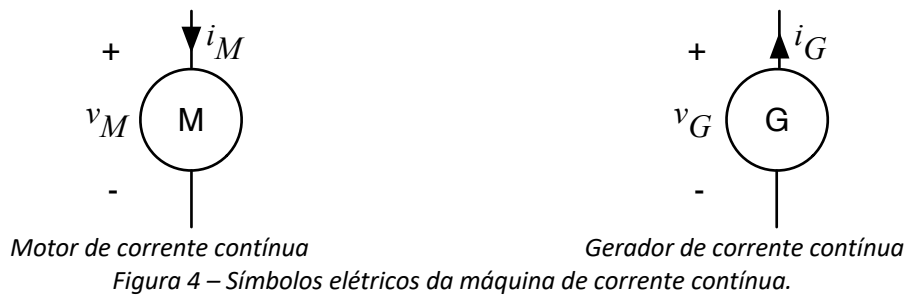


Figura 3 – Funcionamento do gerador de corrente contínua.

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.aurora generators.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.

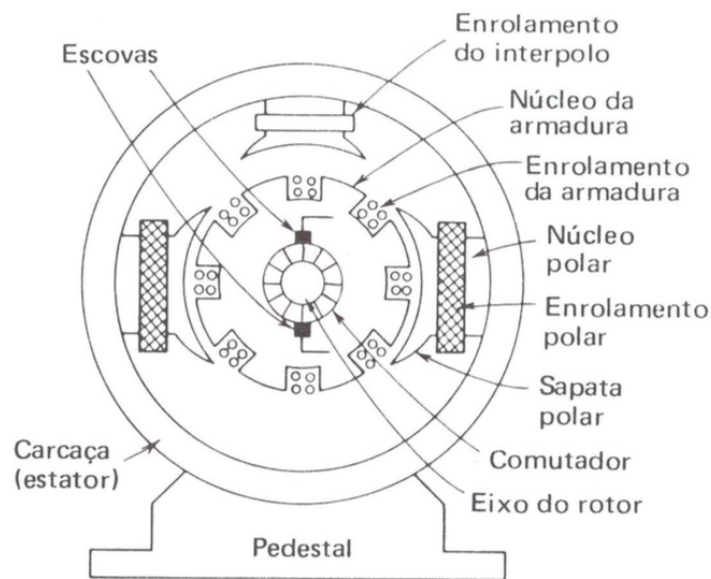


Figura 6 – Principais partes de uma máquina de corrente contínua.

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.



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.

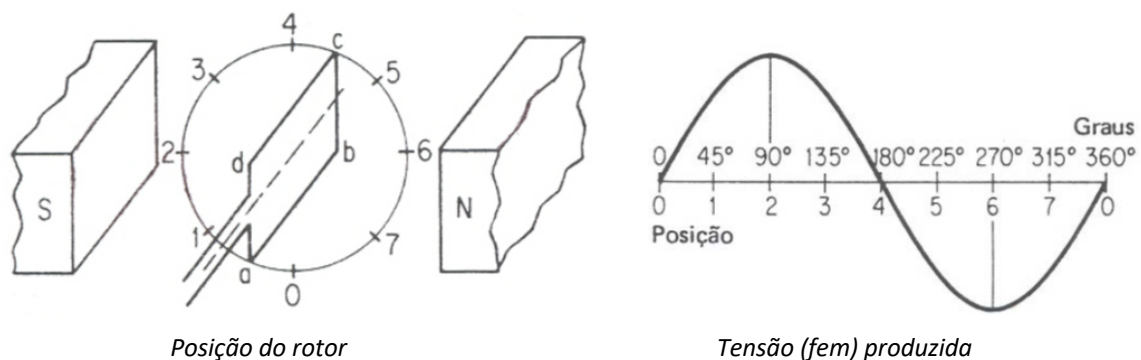
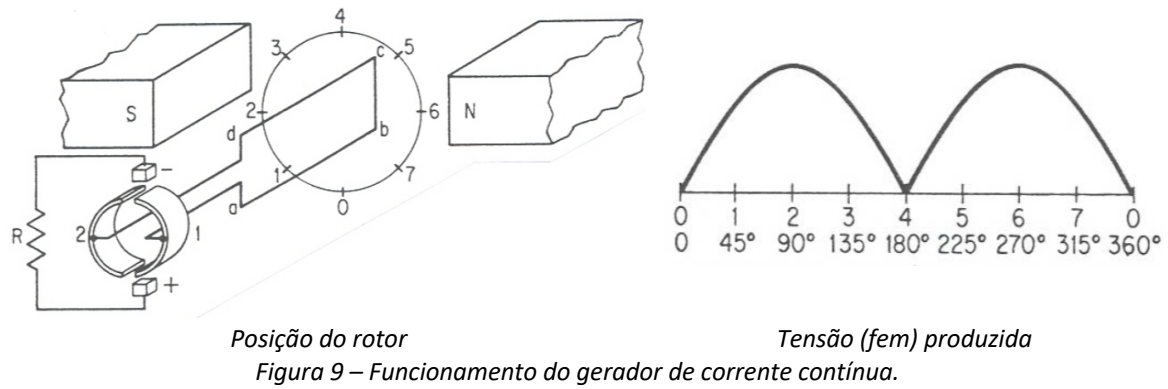
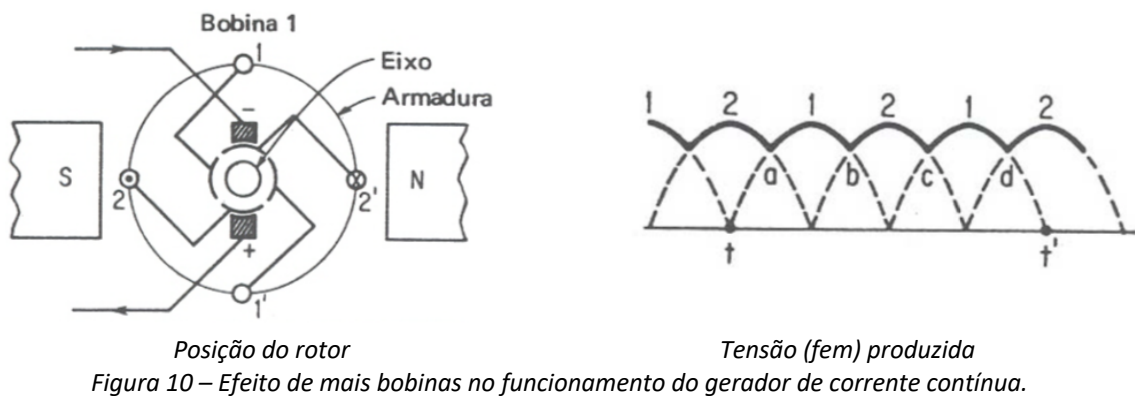


Figura 8 – Funcionamento do gerador de corrente alternada.

Fonte: (Kosow, 2005).



Fonte: (Kosow, 2005).



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

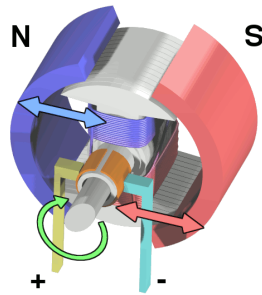
A Figura 12 mostra um exemplo construtivo de motor de corrente contínua com ímãs permanentes. Note que o estator (parte fixa) é representada por um ímã com seus polos norte e sul, enquanto o rotor (parte móvel) tem uma bobina conectada ao circuito externo por meio do coletor do tipo comutador. Ao se 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.

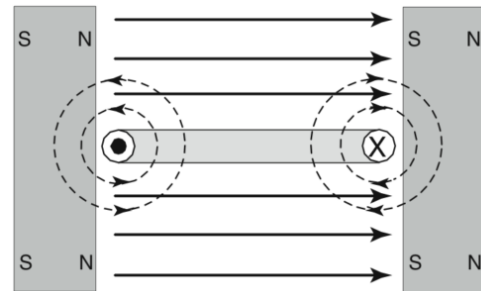
A partir da interação entre o campo magnético gerado pelo estator de ímãs permanentes e o rotor bobinado, se tem o surgimento de forças, conforme mostrado na Figura 13, onde se tem duas posições neutras (0) onde o campo magnético gerado pelo estator e o plano da bobina são perpendiculares, isto é, com 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.

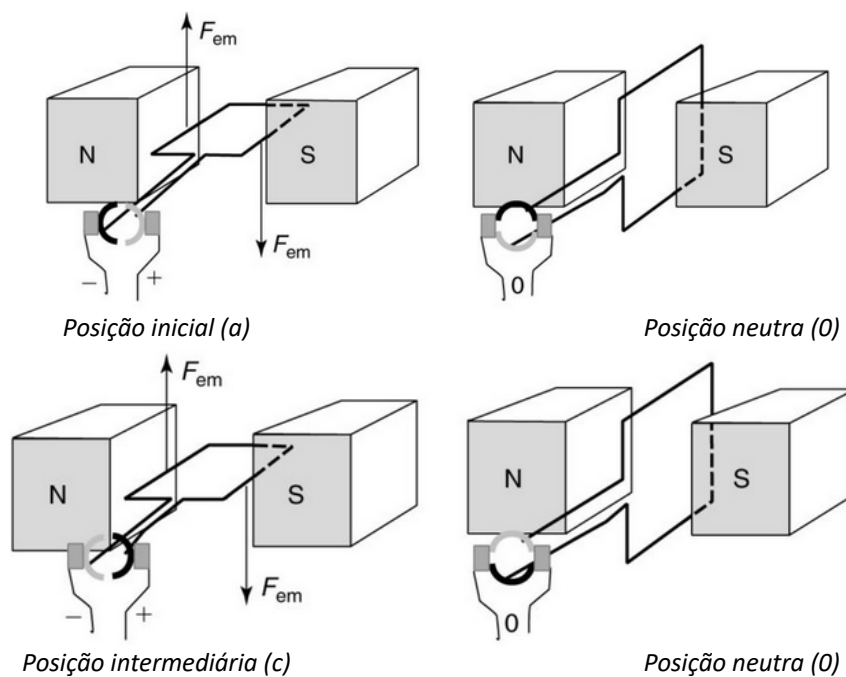
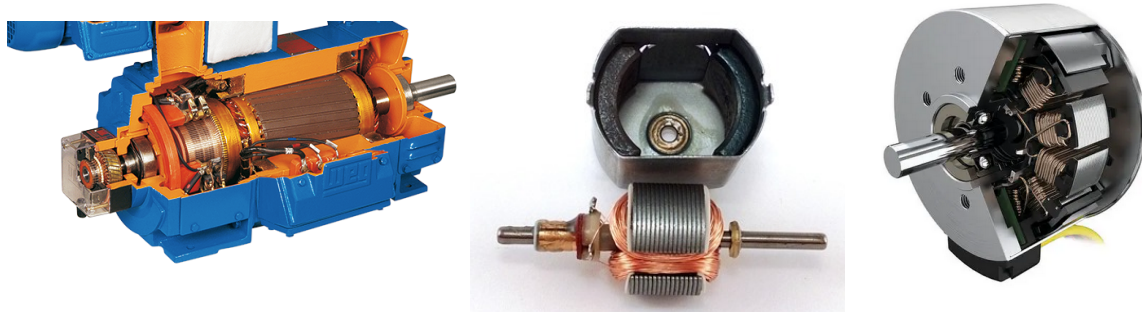


Figura 13 – Funcionamento do motor de corrente contínua.

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.weq.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.

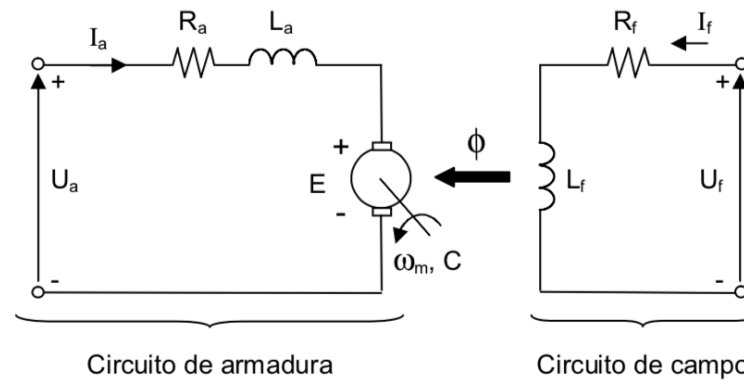


Figura 15 – Circuito elétrico equivalente de uma máquina de um motor de corrente contínua.

Fonte: (Siemens, 2006)¹.

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:

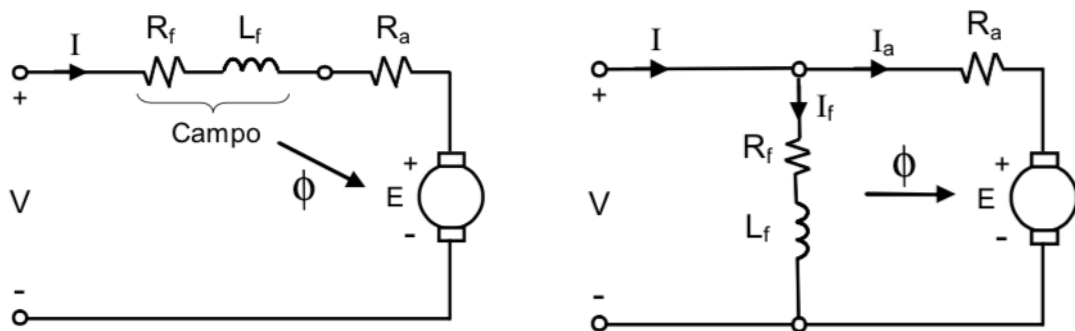
- Série (Figura 16a) – Ligação série entre circuitos de armadura e campo. Tem como características:
 - Bobinas de campo estão em série com o enrolamento da armadura;
 - Só há fluxo no entreferro da máquina quando a corrente da armadura for diferente de zero (máquina carregada);
 - Conjugado é função 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.

¹ SIEMENS. Motores de Corrente Contínua – Guia rápido para uma especificação precisa, edição 01, 2006. Disponível em: <https://new.siemens.com/br/pt.html>.

- 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.

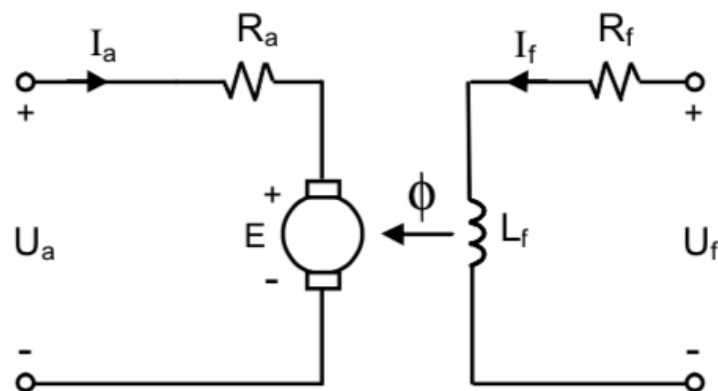


(a) Ligação série.

(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).

4.5 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 Quadrantes de Operação das Máquinas de Corrente Contínua

5.1 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.

5.2 Circuito elétrico e símbolo do motor de corrente contínua

O circuito elétrico equivalente da máquina do motor de corrente contínua é mostrado na Figura 18, 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, simplificado, pelo seu símbolo, mostrado na Figura 18. 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.

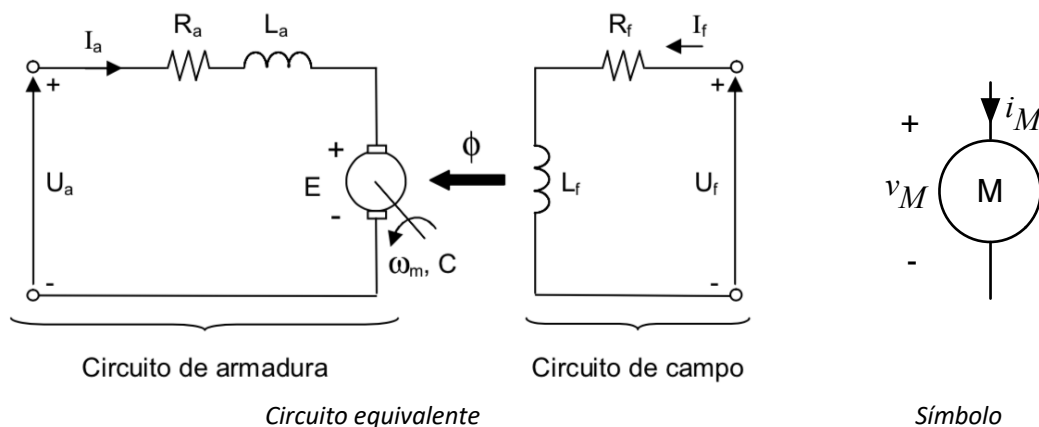


Figura 18 – Circuito elétrico equivalente e símbolo do motor de corrente contínua.

Fonte: (Siemens, 2006)².

5.3 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

² SIEMENS. Motores de Corrente Contínua – Guia rápido para uma especificação precisa, edição 01, 2006. Disponível em: <https://new.siemens.com/br/pt.html>.

na Figura 19;

- $V_m < 0$ 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 19;
- $V_m < 0$ 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 19;
- $V_m > 0$ 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 19.

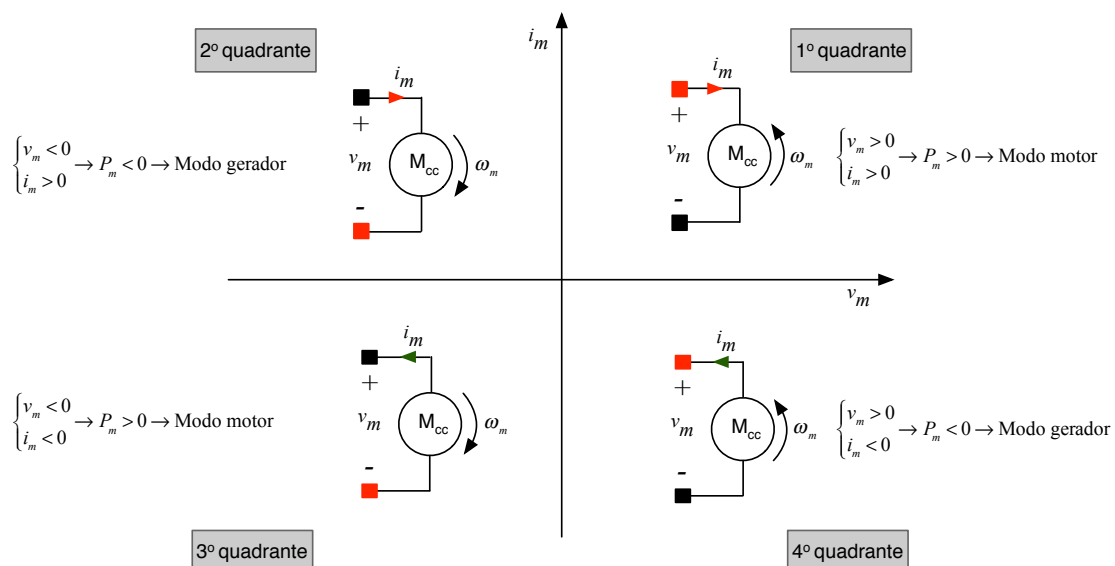


Figura 19 – Quadrantes de operação de uma máquina de corrente contínua.

5.4 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 20 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 20 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 21 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).

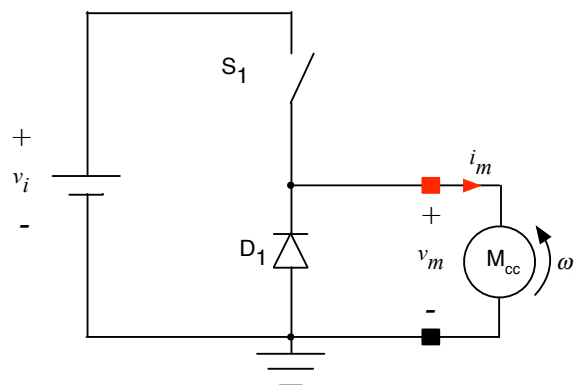


Figura 20 – Circuito simples para acionamento de um motor de corrente contínua.

As etapas de operação do circuito mostrado na Figura 21 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.

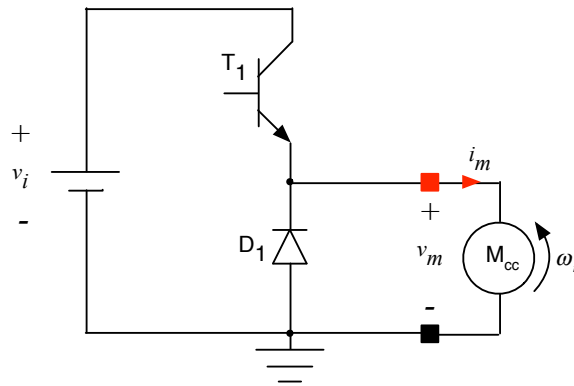


Figura 21 – Circuito com transistor para acionamento de um motor de corrente contínua.

O circuito mostrado na Figura 22 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 22, 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 19, pode regenerar energia do motor para a fonte, durante frenagens, tendo então duas etapas de operação específicas para o modo regeneração. No circuito da Figura 22, o transistor T_1 controla o acionamento no modo motor, enquanto o transistor T_2 controla o acionamento no modo gerador (regeneração de energia).

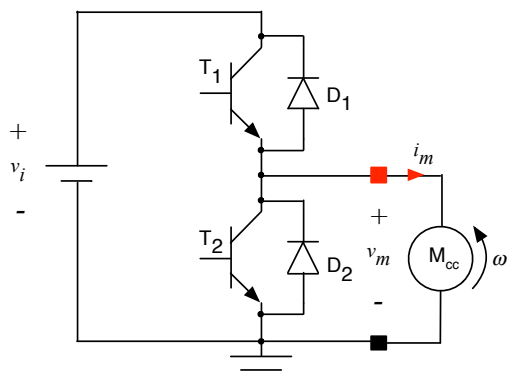


Figura 22 – Circuito para acionamento de um motor de corrente contínua e operação em dois quadrantes.

Por sua vez, o circuito mostrado na Figura 23 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).

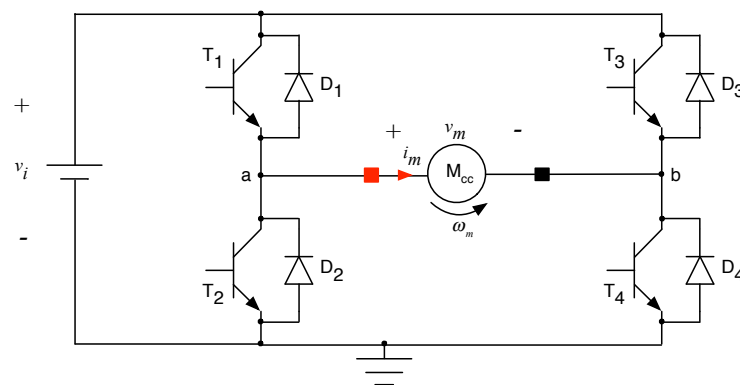


Figura 23 – Circuito para acionamento de um motor de corrente contínua e operação em quatro quadrantes.

O circuito da Figura 23 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 19. 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 19.

6 Elementos de Circuitos de Acionamento de Motores

6.1 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.

6.2 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 24 mostra o exemplo de um disjuntor para 16 A e operação em corrente contínua com tensões até 500 V.

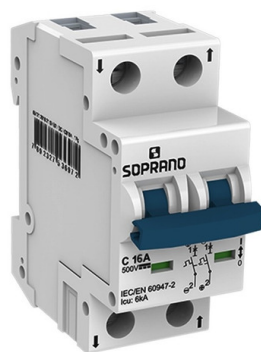


Figura 24 – Exemplo de disjuntor termomagnético para corrente contínua.

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 25 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 26 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 25 – Exemplos de fusíveis com corpo de vidro, areia e cerâmica.

Fonte: <https://www.americanas.com.br>. Acesso em 21/07/2021.

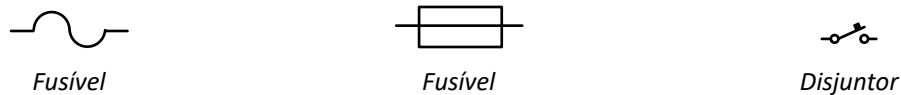


Figura 26 – Símbolos para fusíveis e disjuntores.

6.3 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 20. A Figura 27 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 28. Os relés podem ter contatos simples ou duplos, como mostrado pelos símbolos usuais da Figura 29.

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 29; 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

tenção 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 27 – Exemplos de chaves liga-desliga.

Fonte: <https://www.shoptime.com.br>. Acesso em 21/07/2021.



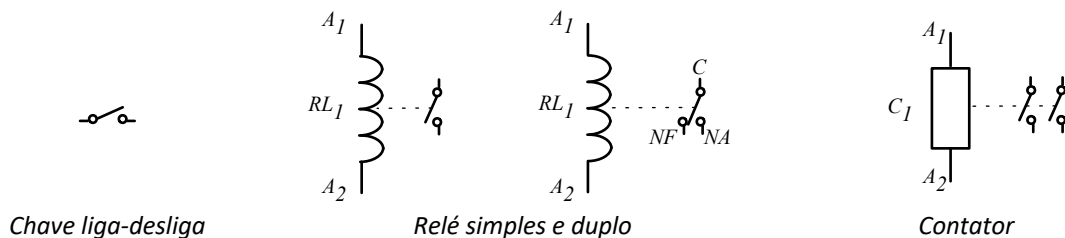
Relé com contatos simples

Relé com contatos duplos

Contator para corrente contínua

Figura 28 – 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 29 – Símbolos para chaves, relés e contadores.

6.4 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 21.

A Figura 30 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 31 apresenta o símbolo, curva característica e aspecto típico para um tiristor SCR para correntes da ordem de 3 A e tensão de 400 V.

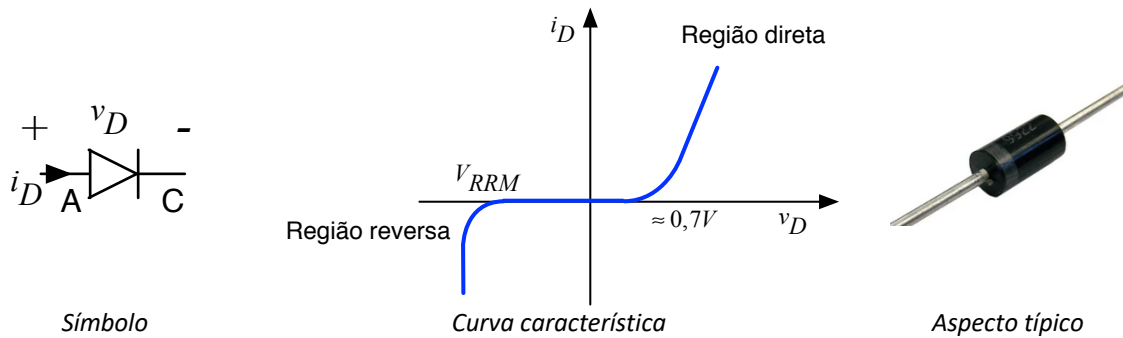


Figura 30 – Símbolo, curva e aspecto de um diodo semicondutor.

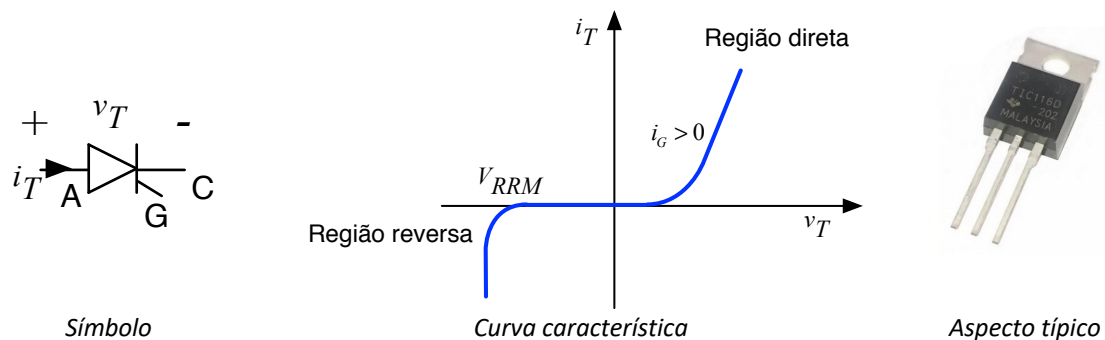


Figura 31 – Símbolo, curva e aspecto de um tiristor do tipo SCR.

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 32 apresenta os símbolos dos transistores do tipo BJT, MOSFET e IGBT, enquanto a Figura 33 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 34 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.

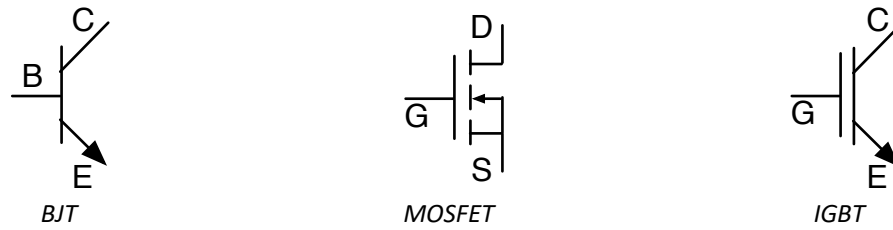


Figura 32 – Símbolos dos transistores.

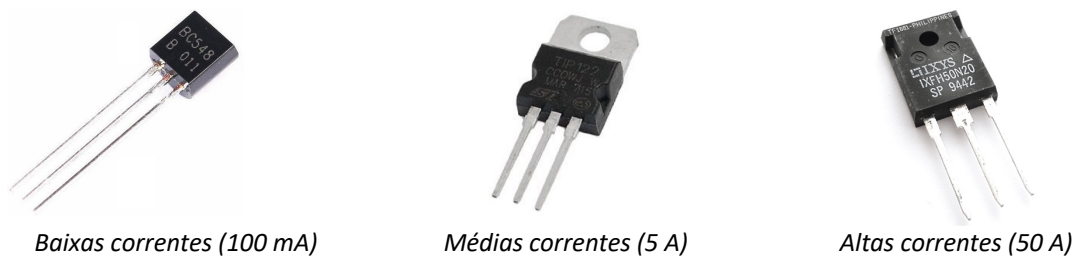
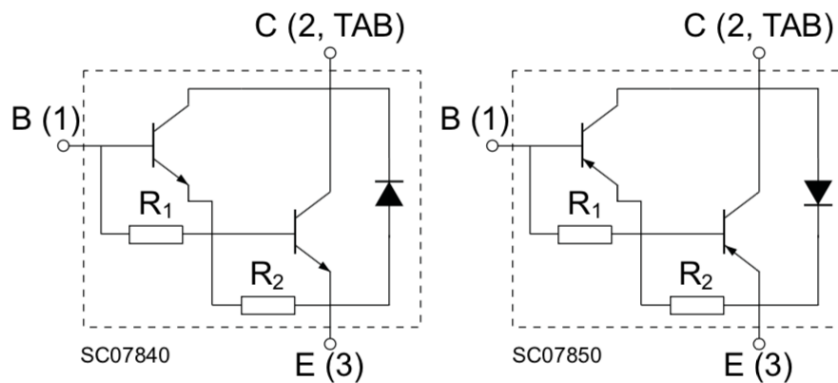


Figura 33 – Transistores comuns disponibilizados comercialmente.



NPN: $R_1 = 7 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 70 \Omega$ PNP: $R_1 = 16 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 60 \Omega$

Figura 34 – Circuito interno de transistores Darlington.

Fonte: <https://www.st.com>. Acesso em 21/07/2021.

6.5 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 35, 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 36. 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 36 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.

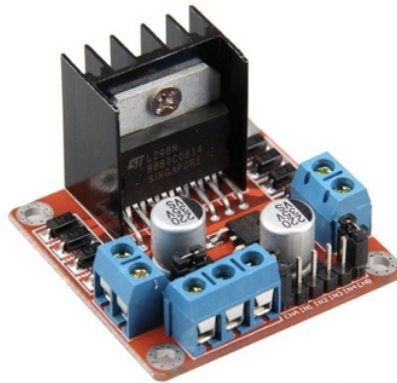


Figura 35 – Exemplo de placa de acionamento de motor que emprega o conversor ponte completa.

Fonte: <https://www.curtocircuito.com.br>. Acesso em 03/06/2020.

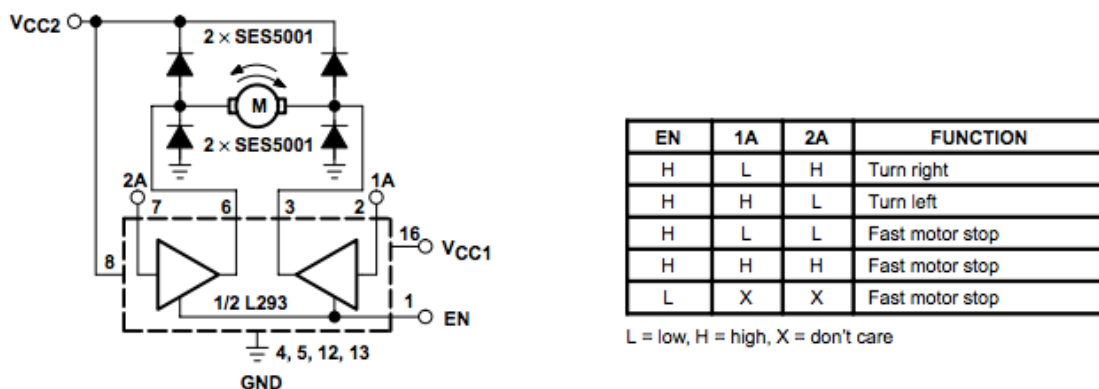


Figura 36 – Exemplo de conexão interna do L293.

Fonte: <http://users.ece.utexas.edu/~valvano/Datasheets/L293d.pdf>. Acesso em 03/06/2020.

6.6 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 37.

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 38 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 37 – Conversor ca-cc de alta potência.

Fonte: <https://www.positronic.com.br>. Acesso em 21/07/2021.



Figura 38 – 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 39, 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.

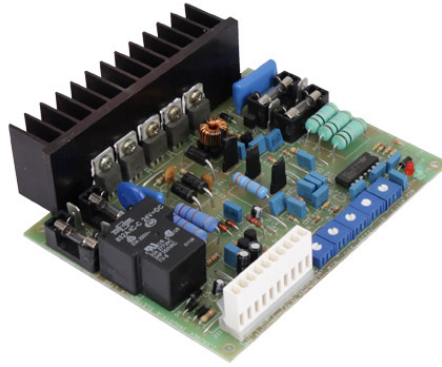


Figura 39 – Drive de acionamento de motor de corrente contínua.

Fonte: <http://jyazbek.com.br>. Acesso em 21/07/2021.

7 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. 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 05. 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.

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 as principais partes de um motor de corrente contínua.

EP 04. Quais tecnologias de semicondutores são utilizadas para acionamento de motores?

EP 05. Que elementos de proteção podem ser utilizados nos circuitos de acionamento?

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 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. Qual a finalidade do diodo de roda-livre nos circuitos de acionamento de motores?

AA 05. Cite um exemplo de circuito integrado utilizado para acionamento de motores.

AA 01. Máquinas de corrente contínua 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 contínua; ou converter energia mecânica em energia elétrica na forma de corrente contínua, no caso dos geradores.

AA 02. As principais partes de uma máquina de corrente contínua são: rotor ou armadura, estator ou campo, coletor e escovas.

AA 03. A velocidade de rotação do motor de corrente contínua pode ser alterada modificando-se a tensão de armadura ou o fluxo magnético, pela alteração da corrente de campo.

AA 04. 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 05. O circuito integrado L293 é muito utilizado para acionamento de motores.