

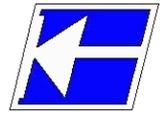
INSTITUTO FEDERAL
SANTA CATARINA

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 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.

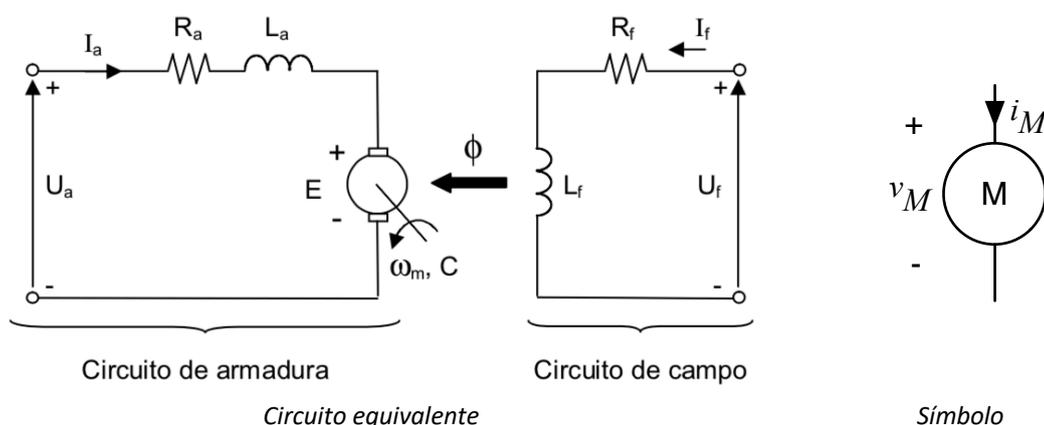


Figura 1 – Circuito elétrico equivalente e símbolo do motor de corrente contínua.

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.

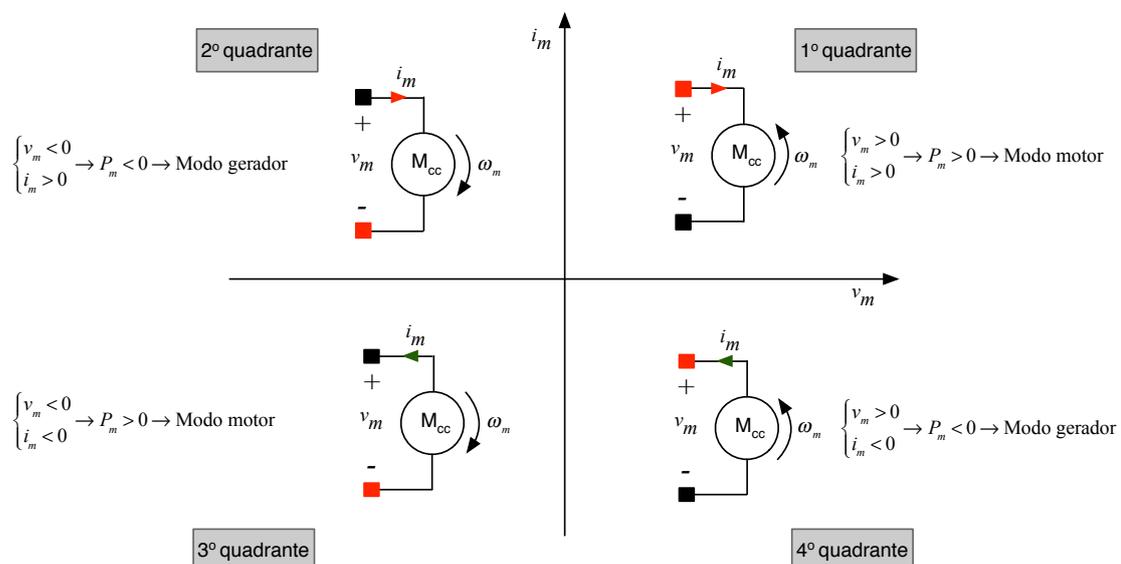


Figura 2 – Quadrantes de operação de uma máquina de corrente contínua.

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.

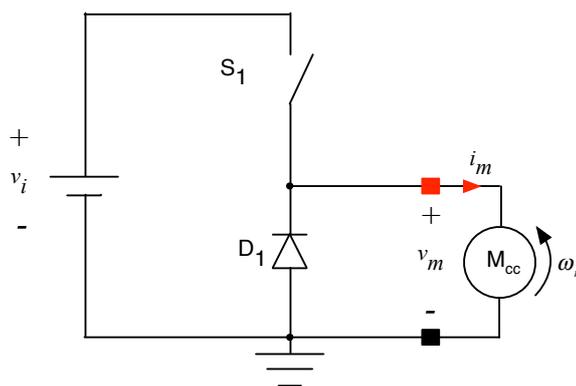


Figura 3 – Circuito simples para acionamento de um motor de corrente contínua.

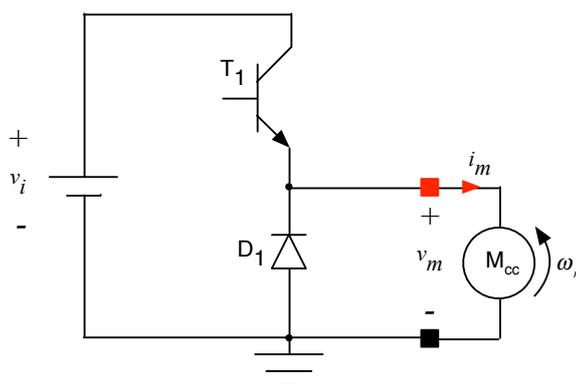


Figura 4 – Circuito com transistor para acionamento de um motor de corrente contínua.

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).

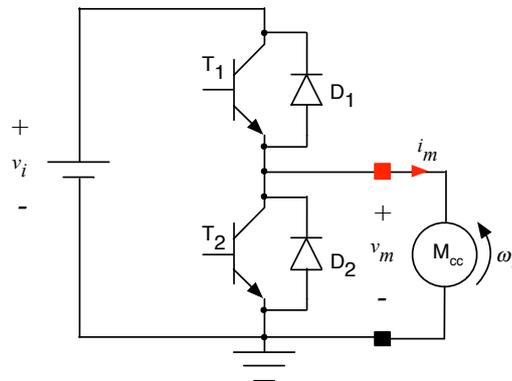


Figura 5 – Circuito para acionamento de um motor de corrente contínua e operação em dois quadrantes.

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).

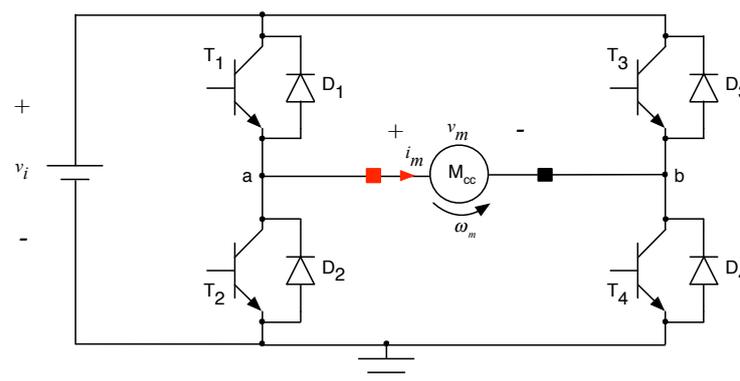


Figura 6 – Circuito para acionamento de um motor de corrente contínua e operação em quatro quadrantes.

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.



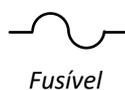
Vidro

Cerâmica

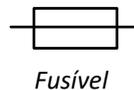
Areia

Figura 8 – Exemplos de fusíveis com corpo de vidro, areia e cerâmica.

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



Fusível



Fusível



Disjuntor

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 contadores 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



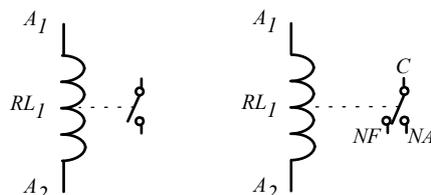
Contator para corrente contínua

Figura 11 – Exemplos de relés e contator para corrente contínua.

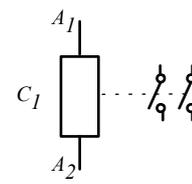
Fonte: <https://www.metaltex.com.br> e <https://www.weg.net>. Acesso em 21/07/2021.



Chave liga-desliga



Relé simples e duplo



Contator

Figura 12 – Símbolos para chaves, relés e contadores.

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.

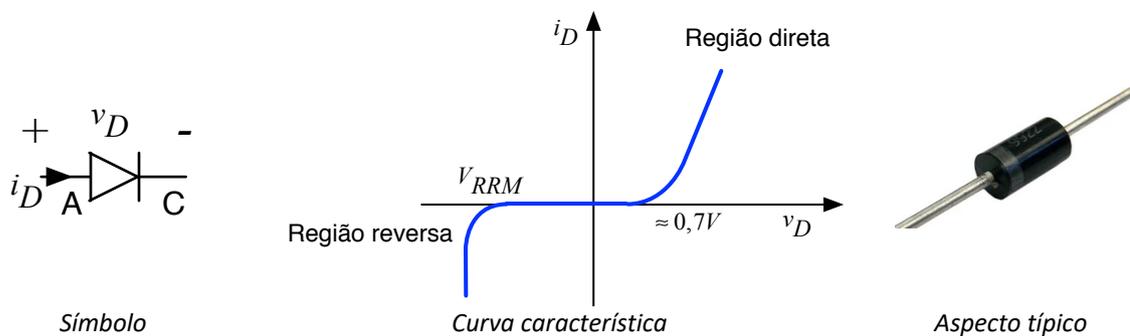


Figura 13 – Símbolo, curva e aspecto de um diodo semicondutor.

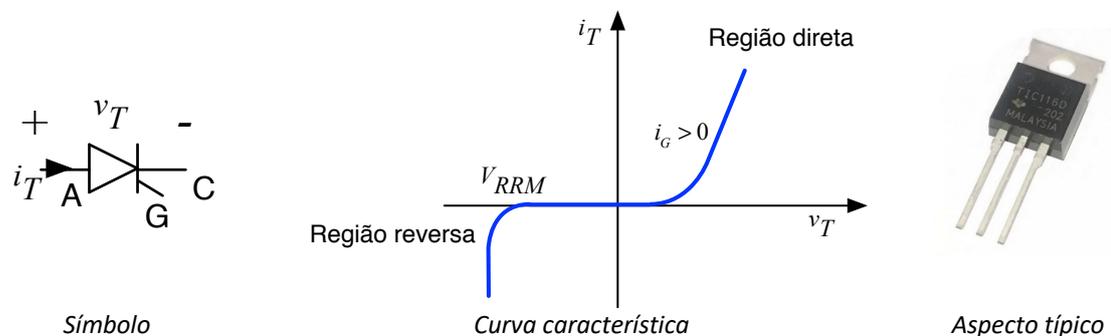


Figura 14 – Símbolo, curva e aspecto de um tiristor do tipo SCR.

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 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.

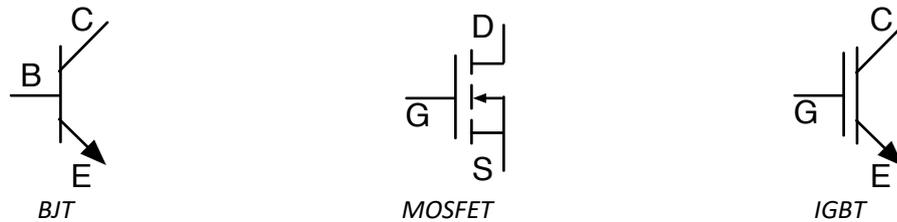


Figura 15 – Símbolos dos transistores.

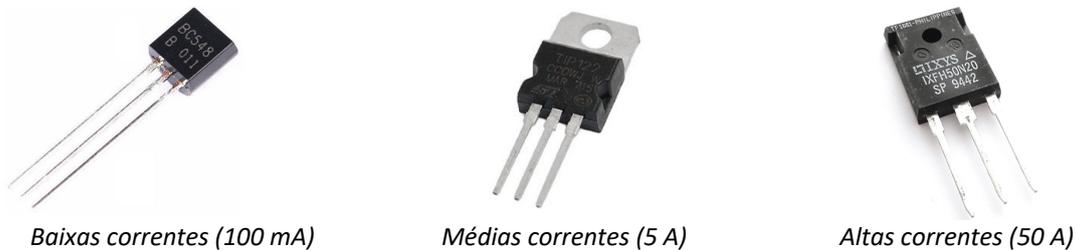
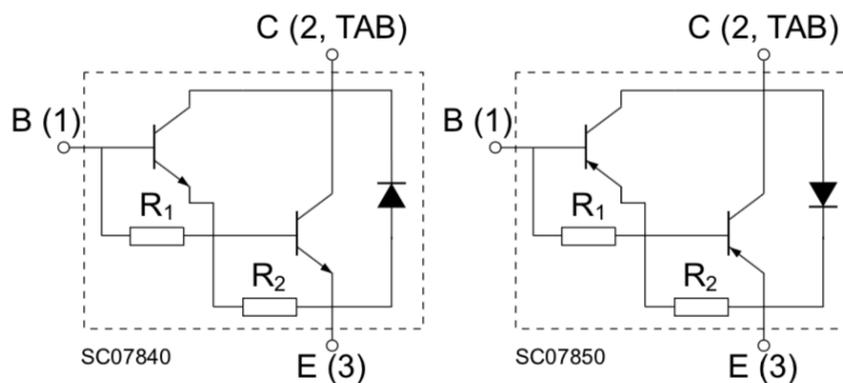


Figura 16 – Transistores comuns disponibilizados comercialmente.



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

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.

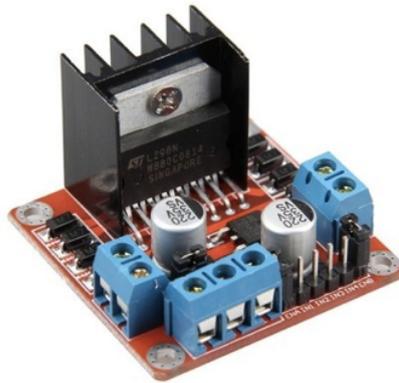
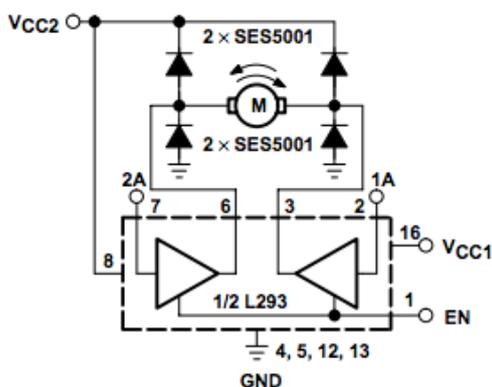


Figura 18 – Exemplo de placa de acionamento de motor que emprega o conversor ponte completa.

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



EN	1A	2A	FUNCTION
H	L	H	Turn right
H	H	L	Turn left
H	L	L	Fast motor stop
H	H	H	Fast motor stop
L	X	X	Fast motor stop

L = low, H = high, X = don't care

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.

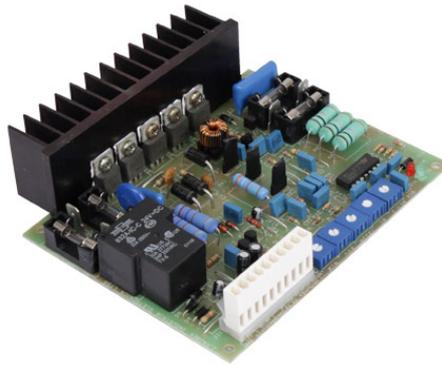


Figura 22 – Drive de acionamento de motor de corrente contínua.

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

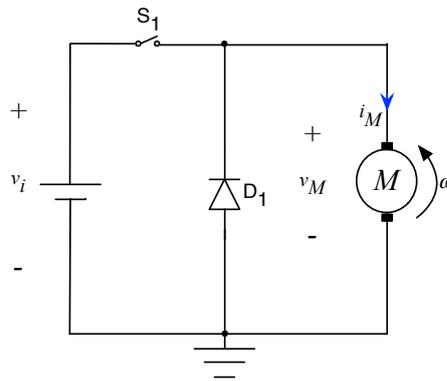
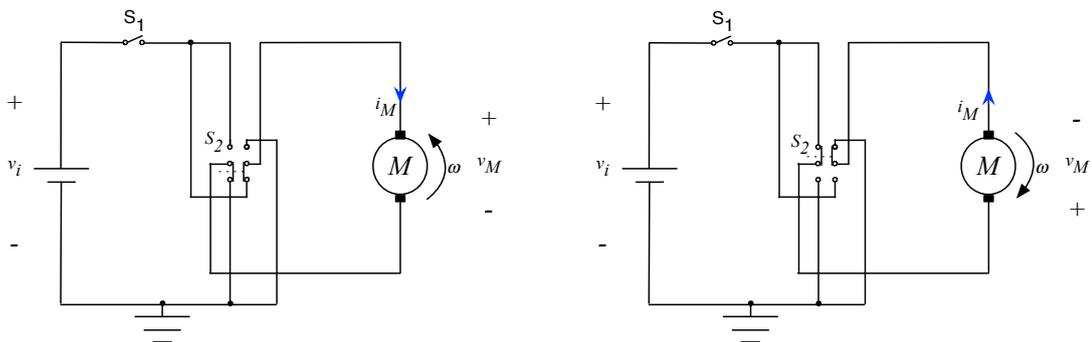


Figura 23 – Circuito simples para acionamento de motor de corrente contínua.



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.

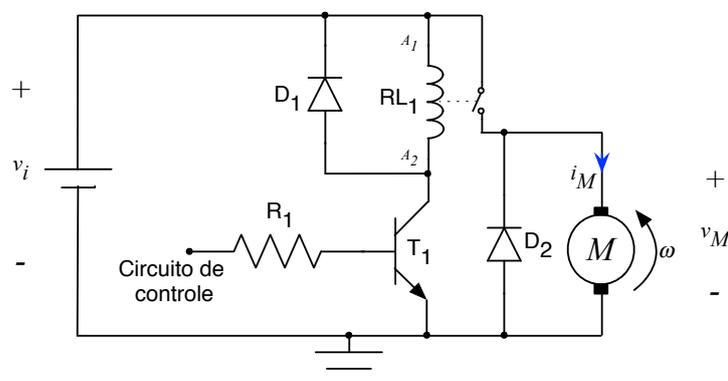


Figura 25 – Circuito de acionamento de motor com relé.

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.

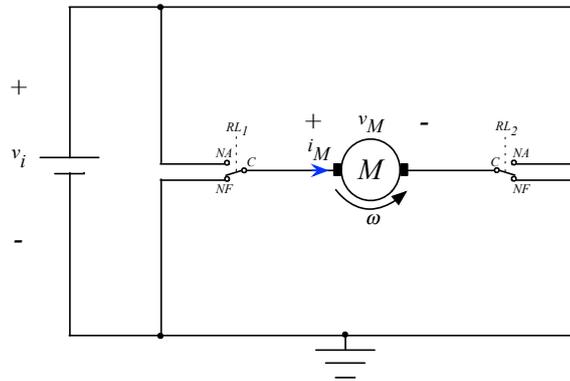


Figura 26 – Circuito com relés para inversão de rotação de motor de corrente contínua.

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%.

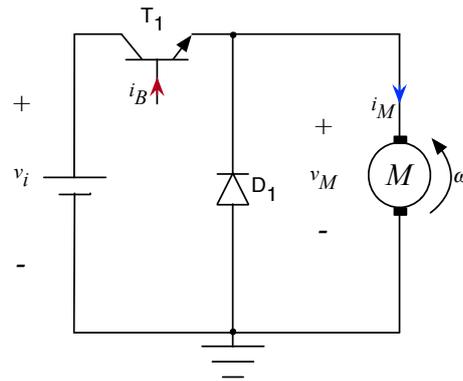


Figura 27 – Circuito para acionamento de motor de corrente contínua com transistor.

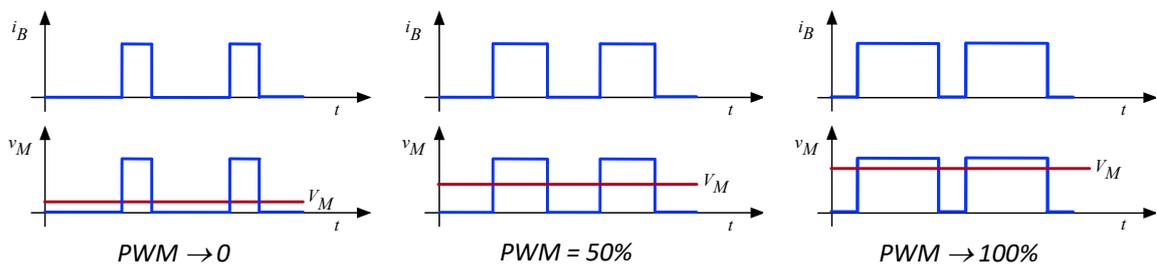
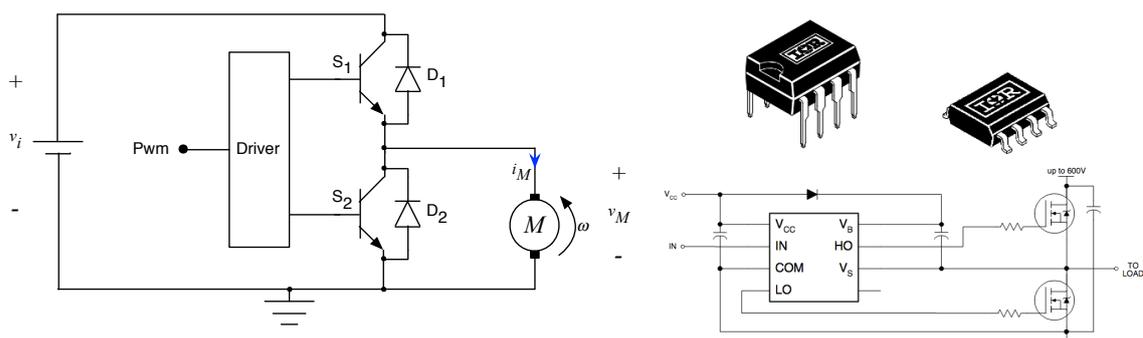


Figura 28 – Controle da tensão no motor pela largura dos pulsos da corrente de base.

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

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.

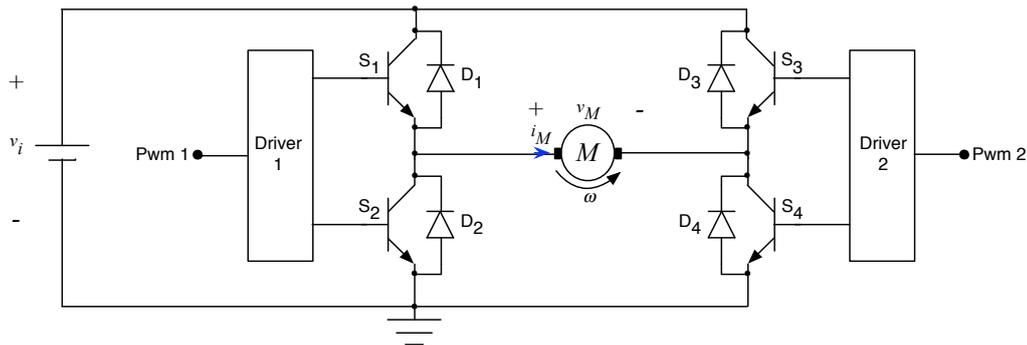


Figura 30 – Acionamento de motor de corrente contínua para operação em quatro quadrantes.

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.

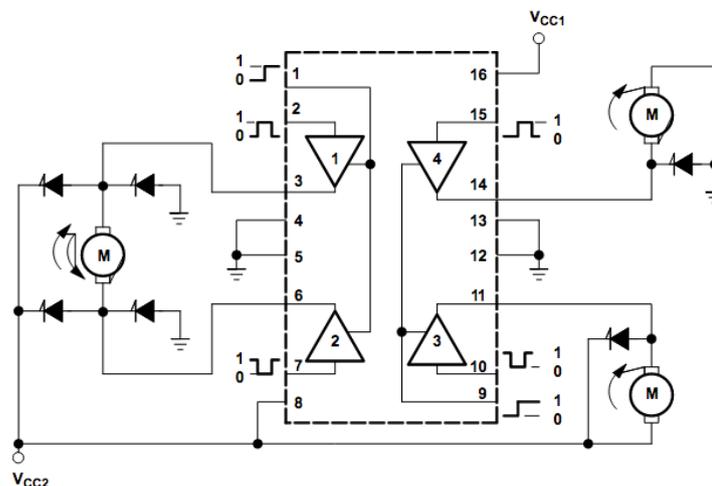


Figura 31 – Acionamento de motor de corrente contínua com circuito integrado L293.

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.

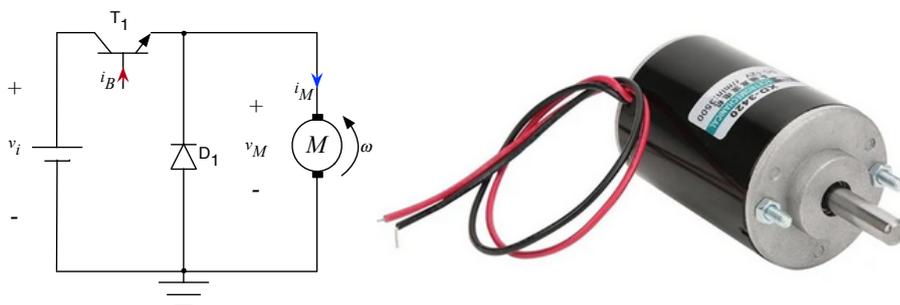


Figura 32 – Circuito para acionamento de motor de corrente contínua com transistor.

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 $17 \times 2,21 = 37,57$ °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.

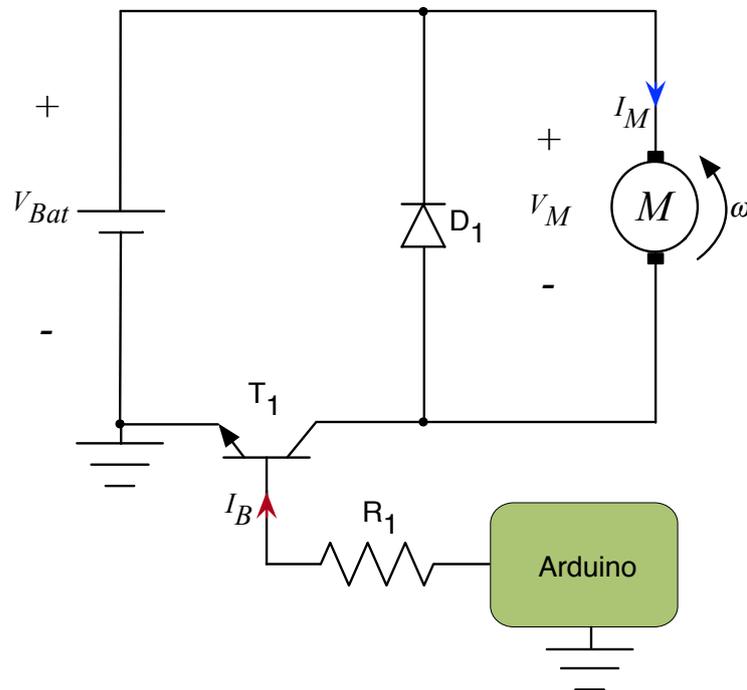


Figura 33 – Circuito proposto para acionamento do motor de corrente contínua.

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.

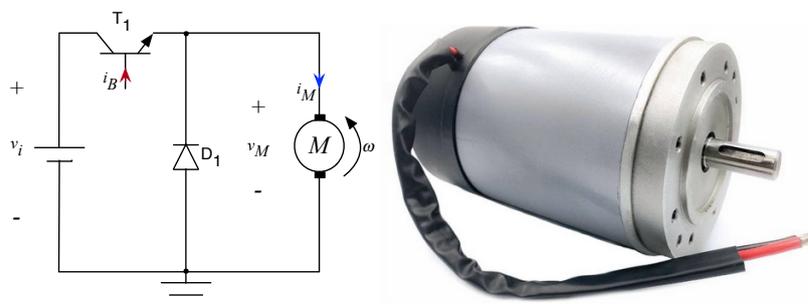


Figura 34 – Circuito para acionamento de motor de corrente contínua com transistor.

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 $10\text{ k}\Omega$, enquanto os resistores de coletor, R_2 e R_4 , podem ser de $1\text{ k}\Omega$. 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 $22\ \Omega$ por $\frac{1}{2}\text{ W}$, neste caso.

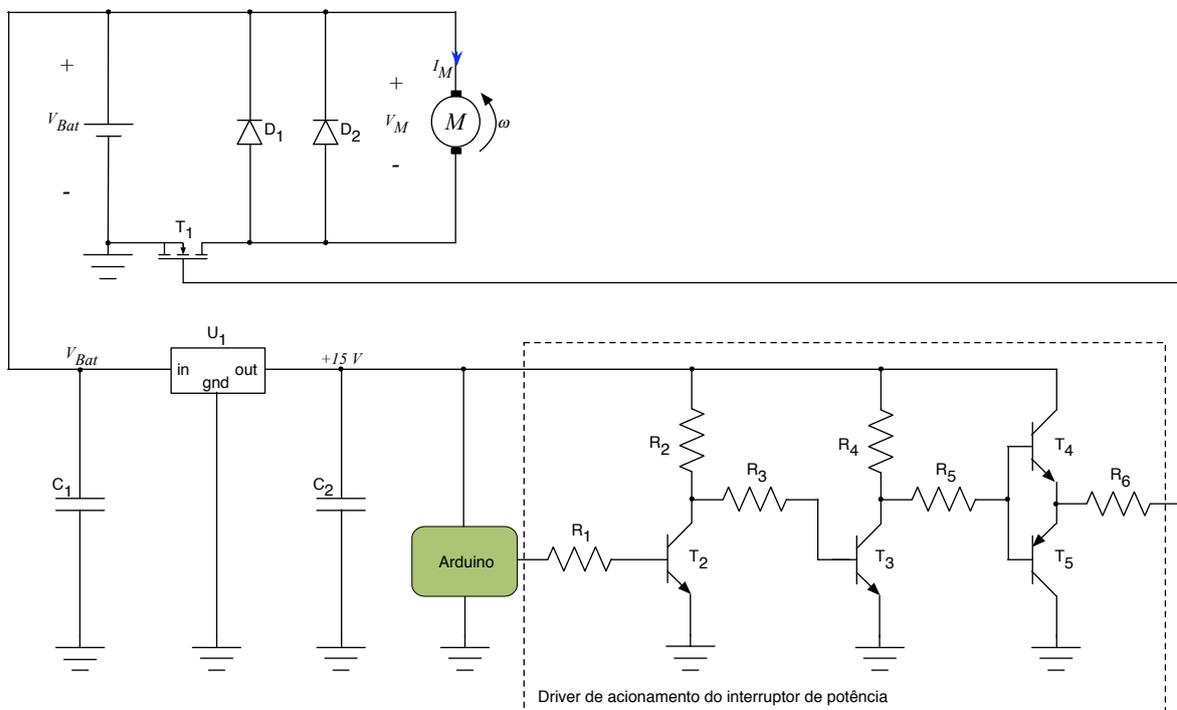


Figura 35 – Circuito proposto para acionamento do motor de corrente contínua.

A potência dissipada no MOSFET, durante sua condução será:

$$P_{T1} = R_{DS(on)} \cdot I_D^2 = 77\text{ m} \cdot 20,8^2 = 33,3\text{ W}$$

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 $35\text{ }^\circ\text{C}$, será:

$$T_{j_T1} = T_a + R_{ja_T1} \cdot P_{T1} = 35 + 62 \cdot 33,3 \approx 2100\text{ }^\circ\text{C}$$

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:

$$P_{D1} = P_{D2} = V_{D1} \cdot I_{D1} = 1,3 \cdot \frac{20,8}{2} = 13,52W$$

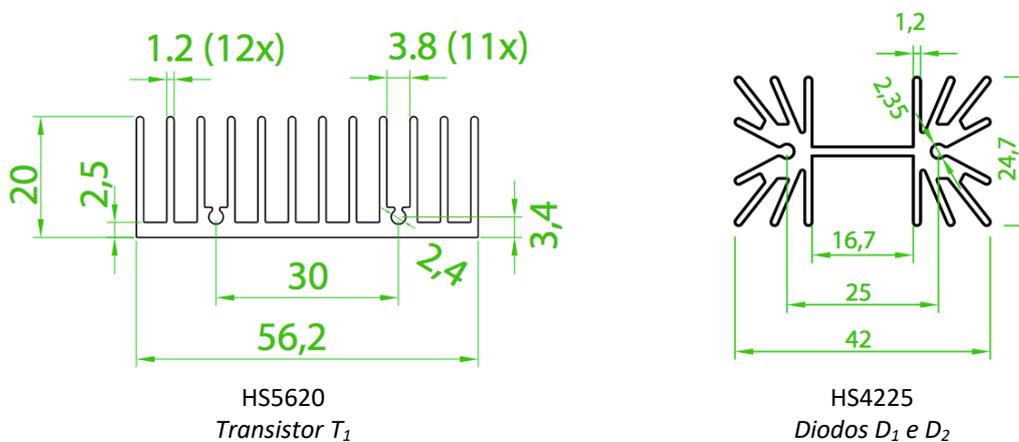
Assim, a temperatura na junção será:

$$T_{j_D1} = T_{j_D2} = T_a + R_{ja_D1} \cdot P_{D1} = 35 + 73 \cdot 13,52 \approx 1022^\circ C$$

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.