

19

Capítulo

Acionamento de Motores de Corrente Contínua

Meta deste capítulo

Estudar os princípios para o acionamento de motores de corrente contínua.

objetivos

- Entender o acionamento de motores de corrente contínua;
- Analisar circuitos de acionamento de motores de corrente contínua;
- Simular circuitos de acionamento de motores de corrente contínua;
- Implementar circuitos de acionamento de motores de corrente contínua.

Pré-requisitos

Ter estudado o capítulo referente ao princípio de funcionamento dos conversores cc-cc Buck, Boost e Buck-Boost.

Continuidade

O curso continuará com o estudo da modulação PWM senoidal.

Prof. Clóvis Antônio Petry.
Florianópolis, junho de 2020.

1 Introdução

Nos capítulos anteriores foram estudados os conversores cc-cc e os diversos conhecimentos associados aos mesmos. Este capítulo propõe ser uma ponte entre os conversores cc-cc e o próximo capítulo, onde se inicia o estudo dos conversores cc-ca, mais conhecidos como inversores de tensão.

O acionamento de motores, sejam de corrente contínua ou de corrente alternada, é conteúdo obrigatório de cursos de eletrônica de potência, pois esta área do conhecimento tem ampla utilização industrial, e possuir conhecimentos mínimos é muito relevante para o estudante.

A Figura 1 mostra o perfil do setor de energia elétrica no Estado de São Paulo, no ano de 2017, onde se nota que 37% do consumo de energia elétrica é realizado na indústria. Por sua vez, o consumo na indústria é distribuído em iluminação, equipamentos eletrônicos e em maior parte no acionamento de motores, visto que os parques fabris empregam processos de produção que utilizam movimento de objetos, matérias primas, produtos, etc. Por isso, o estudo de circuitos de acionamento em corrente contínua ou corrente alternada é justificado, pois em geral os parques industriais utilizam de movimento a partir de motores, dos mais diversos tipos.

Assim, neste capítulo serão apresentados alguns conceitos envolvendo acionamento de motores de corrente contínua, modos de operação de um motor de corrente contínua, resultados de simulação para os circuitos em estudo, além de exercícios resolvidos e propostos.

Consumo por categoria

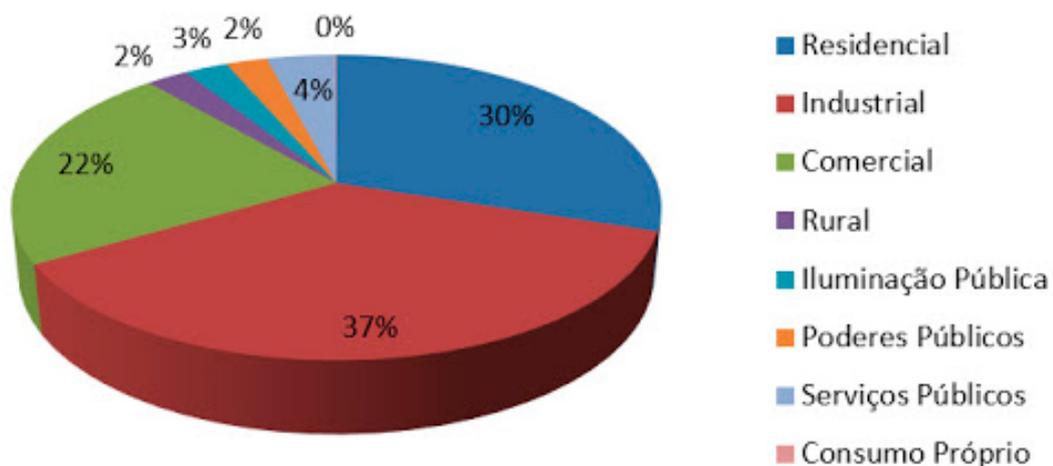


Figura 1 – Perfil do consumo de energia elétrica no estado de São Paulo em 2017.

Fonte: <http://www.arsesp.sp.gov.br/SitePages/energia-eletrica/perfil-setor-energia-eletrica.aspx>.

Acesso em: 02/06/2020.

2 Motores de Corrente Contínua

2.1 Introdução

O estudo de motores de corrente contínua, envolvendo conceitos, modelagem e expressões matemáticas que representam circuitos equivalentes destas máquinas é assunto amplo e que por si só é apresentado em livros totalmente dedicados ao mesmo. O intuito neste curso é prover o leitor de informações básicas, permitindo o entendimento dos principais conceitos envolvidos no estudo e acionamento de motores de corrente contínua. Não serão abordados outros diferentes tipos de motores, como motores de passo, motores sem escovas, etc; mas apenas o motor de corrente contínua clássico, que permite ser acionado simplesmente conectando o mesmo em uma fonte de corrente contínua com amplitude adequada.

Assim, neste capítulo serão apresentados os principais conceitos envolvendo o funcionamento e acionamento de motores de corrente contínua; destacando-se que em virtude dos modos de operação destas máquinas, pode-se elaborar circuitos de acionamento desde mais simples até mais complexos, que permitirão ao motor funcionar em quatro quadrantes de operação, como será visto posteriormente.

2.2 Aplicações dos Motores de Corrente Contínua

As aplicações dos motores de corrente contínua são das mais diversas, entre as quais se tem algumas listadas a seguir no catálogo de motores do fabricante Siemens:

- Máquinas de papel;
- Bobinadeiras e desbobinadeiras;
- Laminadores;
- Máquinas de impressão;
- Extrusoras;
- Prensas;
- Elevadores;
- Movimentação e elevação de cargas;
- Moinhos de rolos;
- Indústria de borracha;
- Mesa de testes de motores.

Devido a sua versatilidade nas aplicações, o motor de corrente contínua possui uma grande parcela do mercado de motores elétricos, destacando-se a seguir algumas aplicações indicadas pelo fabricante WEG:

- Máquinas operatrizes em geral;
- Bombas a pistão;
- Torques de fricção;
- Ferramentas de avanço;
- Tornos;
- Bobinadeiras;
- Mandrilhadoras;
- Máquinas de moagem;
- Máquinas têxteis;
- Guinchos e guindastes;
- Pórticos;
- Veículos de tração;
- Prensas;
- Máquinas de papel;
- Tesouras rotativas;
- Indústria química e petroquímica;
- Indústrias siderúrgicas;
- Fornos, exaustores, separadores e esteiras para indústria cimenteira e outras.

2.3 Princípio de Funcionamento dos Motores de Corrente Contínua

A Figura 2 mostra uma ilustração de um motor de corrente contínua com imã permanente, isto é, o campo elétrico gerado no estator (parte fixa) é oriundo de um imã artificial. Em outros modelos de motores se utilizam eletroímãs, que originam o campo magnético a partir da corrente elétrica fornecida pela fonte.

Os principais elementos do motor mostrado na Figura 2 são:

- Estator – formado pelo imã permanente, que possui polo norte e polo sul;
- Rotor – formado por uma espira conectada ao exterior do motor por meio de escovas e do anel comutador;
- Fonte de energia – bateria responsável por fornecer a corrente elétrica para o funcionamento do motor.

A corrente elétrica da bateria, à circular pela espira do rotor, irá provocar o surgimento de um campo eletromagnético que interagindo com o campo magnético do estator (imã permanente) irá ocasionar o aparecimento de uma força, que fará a espira girar, ou seja, se deslocar ao redor de seu eixo. Após a espira girar meia volta, o comutador irá alterar a sua conexão, fazendo com que a força provoque o movimento no mesmo sentido do que anteriormente foi feito, fazendo com que a espira

gire ao redor de seu eixo. Um motor para uso prático terá diversas espiras compondo enrolamentos, que estarão posicionados em diferentes alinhamentos, fazendo com que o movimento do motor seja suave, evitando pulsações de torque e conseqüente vibração do motor e da carga acionada pelo mesmo.

A posição da espira determinará o campo magnético resultante e sua interação com o campo do estator e conseqüente força de deslocamento (torque rotor), como mostrado nas Figura 2 a e b. Na Figura 2 a se tem a posição que gera a maior força, enquanto na Figura 2 b se tem a posição neutra, onde não é gerada força de deslocamento, ou seja, nesta posição não haveria movimento do rotor. Por esta razão, para que se tenha movimento contínuo, são necessárias pelo menos duas espiras, posicionadas de tal modo que uma delas sempre irá gerar torque, fazendo assim com que o rotor mantenha seu movimento continuamente.

É importante destacar que os motores de corrente contínua que empregam comutador e escovas necessitam de manutenção, visto estas escovas serem construídas com carvão e se desgastarem ao longo do tempo. Além disso, durante a rotação do comutador e a passagem pela escova na posição de curto-circuito da espira, que coincide com a posição de força nula (Figura 2 b) ocorre faiscamento na escova e comutador, o que provoca interferência eletromagnética em outros equipamentos próximos e/ou conectados na mesma fonte de energia elétrica.

A Figura 3 mostra uma imagem de uma animação do princípio de funcionamento do motor de corrente contínua, disponível na internet, conforme indicado na legenda da imagem. Por sua vez, as Figura 4 a e b mostram a animação durante os momentos de maior torque e de torque nulo, conforme comentado anteriormente. Note que na posição de torque nulo, a conexão do comutador e das escovas pode provocar curto-circuito na fonte, o que implicaria em aumento de corrente, mesmo que durante intervalos de tempo pequenos.

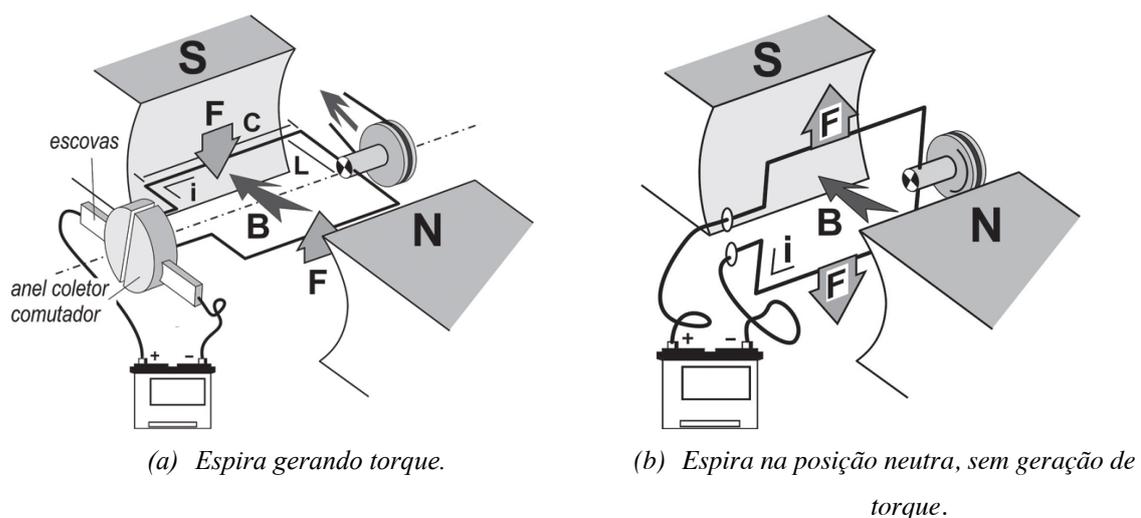


Figura 2 – Elementos de um motor de corrente contínua e seu princípio de funcionamento.

Fonte: <https://www.oficinabrasil.com.br/noticia/tecnicas/motores-eletricos-i-conceitos-basicos-e-configuracoes-mais-utilizadas-em-aplicacoes-automotivas>. Acesso em: 02/06/2020.

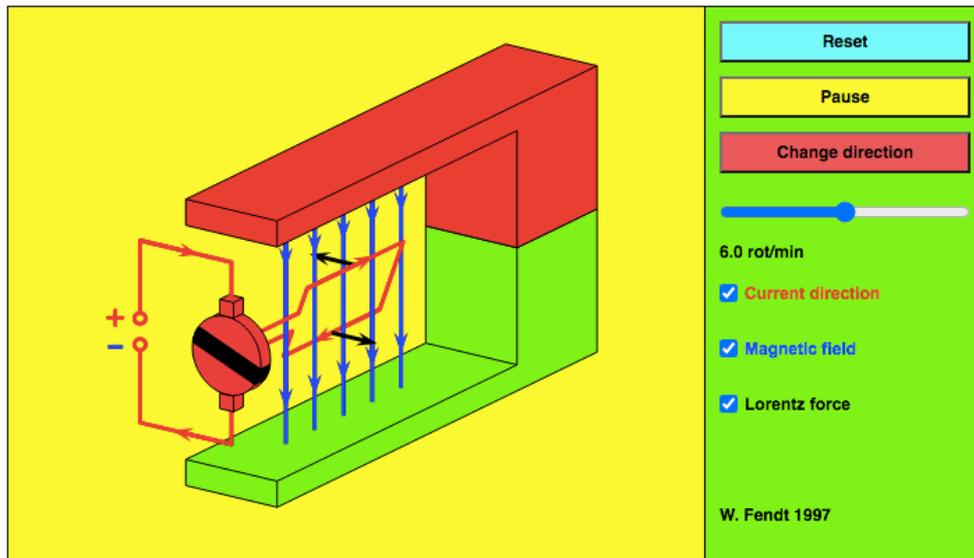
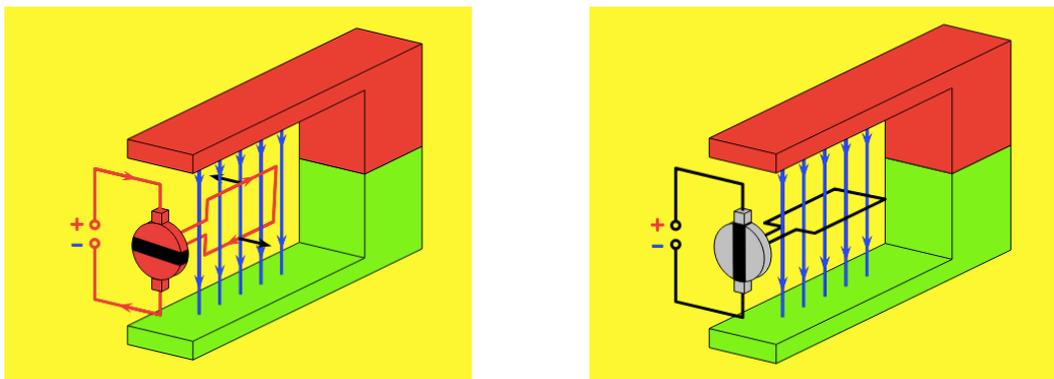


Figura 3 – Animação do princípio de funcionamento do motor de corrente contínua.

Fonte: https://www.walter-fendt.de/html5/phen/electricmotor_en.htm. Acesso em: 02/06/2020.

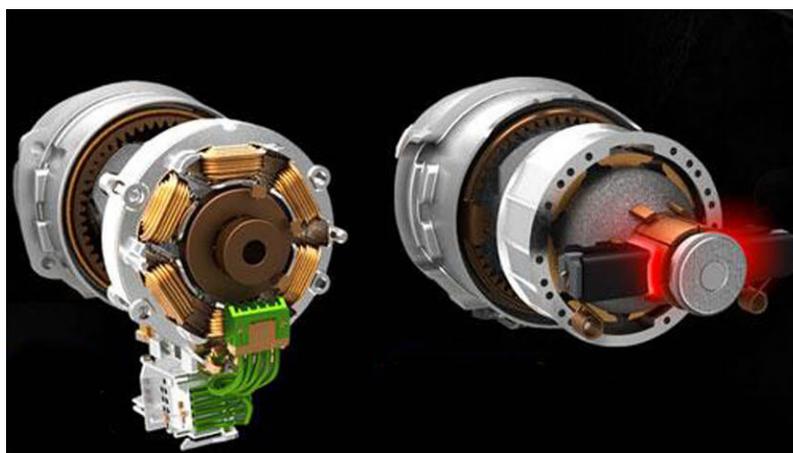


(a) Torque máximo.

(b) Torque nulo.

Figura 4 – Animação do princípio de funcionamento do motor de corrente contínua.

Fonte: https://www.walter-fendt.de/html5/phen/electricmotor_en.htm. Acesso em: 02/06/2020.



(a) Motor sem escovas.

(b) Motor com escovas (brushless).

Figura 5 – Imagens internas de motores de corrente contínua.

Fonte: <https://microlinearactuator.com/brushed-vs-brushless-dc-motors/>. Acesso em: 02/06/2020.

A Figura 5 mostra as imagens de dois motores de corrente contínua, sendo um deles com escovas e outro sem escovas (*brushless*). A imagem do motor com escovas (da direita) destaca o aquecimento gerado no comutador, pelos motivos anteriormente citados e pelo atrito das escovas, o que diminui o rendimento destes motores. Além disso, por não necessitarem de manutenção com tanta frequência, os motores sem escovas são atualmente mais utilizados na indústria e na fabricação de equipamentos eletroeletrônicos, como por exemplo furadeiras elétricas, aparafusadeiras, etc.

2.4 Circuito Equivalente de Motores de Corrente Contínua

O circuito equivalente de um motor de corrente contínua é mostrado na Figura 6, onde se tem o circuito de armadura (rotor) e o circuito de campo (estator), tendo como principais elementos:

- R_a e L_a – resistência e indutância das bobinas do rotor (armadura);
- U_a e I_a – tensão e corrente do circuito do rotor (armadura);
- E – tensão contra eletromotriz (FEM) gerada no rotor (armadura);
- ω_m – velocidade angular do rotor;
- C – conjugado no rotor;
- ϕ - fluxo magnético gerado no estator e induzido no rotor;
- R_f e L_f – resistência e indutância das bobinas do estator (campo);
- U_f e I_f – tensão e corrente do circuito do estator (campo).

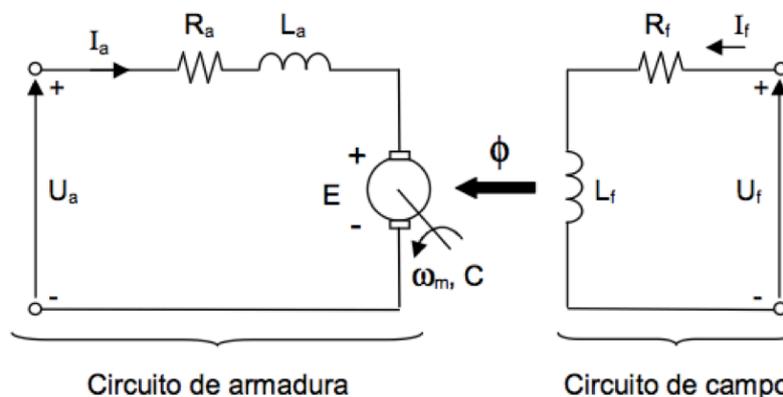


Figura 6 – Circuito equivalente de um motor de corrente contínua.

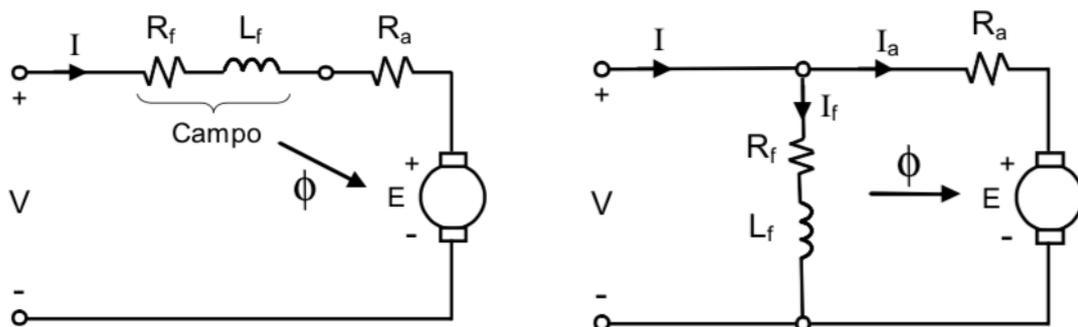
Fonte: (Siemens, 2006).

2.5 Ligações dos Motores de Corrente Contínua

A partir do circuito equivalente do motor de corrente contínua apresentado na Figura 6 é possível se conectar o motor de diferentes maneiras, conforme mostrado nas Figura 7 e Figura 8, 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.

- Série (Figura 7 a) – 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.
- Paralelo (Figura 7 b) – características:
 - Velocidade praticamente constante;
 - Velocidade ajustável por variação da tensão de armadura.
 - Independente (Figura 8) – 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 – características:
 - Enrolamento de campo independente
 - Apresenta um fluxo mínimo mesmo com o motor em vazio.



(a) Ligação série.

(b) Ligação paralela.

Figura 7 – Tipos de conexões de motores de corrente contínua conforme material da Siemens.

Fonte: (Siemens, 2006).

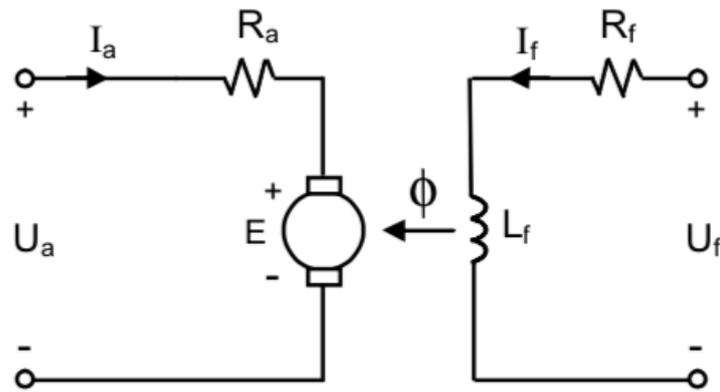


Figura 8 – Ligação independente.

Fonte: (Siemens, 2006).

2.6 Tipos de Motores de Corrente Contínua

Atualmente se tem diversos tipos de motores de corrente contínua, conforme já comentado anteriormente. Os principais são listados a seguir:

- Motor de corrente contínua com escovas tradicional;
- Motor de corrente contínua sem escovas (*brushless*);
- Motores de passo;
- Imãs permanentes;
- Excitação série, paralela, independente ou composta.

3 Acionamento de Motores de Corrente Contínua

3.1 Introdução

Os circuitos de acionamento de motores de corrente contínua dependem da aplicação e do modelo de motor a ser utilizado. Neste capítulo serão apresentados uma sequência de circuitos, que partirão do acionamento mais simples até o mais complexo, que resultará em um conversor ponte completa, que já seria neste caso, de certa forma, um inversor de tensão, isto é, um conversor cc-ca.

Além disso, serão apresentados os conceitos envolvidos na operação de máquinas de corrente contínua como motores ou como geradores e as implicações práticas disso. Ainda, neste curso, será considerado o uso de motores de corrente contínua com dois condutores, ou seja, que internamente estão ligados em série ou paralelo. Assim, não serão consideradas as conexões independente ou composta.

3.2 Modos de Operação de um Motor de Corrente Contínua

Os motores de corrente contínua também podem operar como geradores de corrente contínua, significando que a máquina de corrente contínua pode operar como motor ou como gerador.

A operação como motor significa que a energia estará fluindo da fonte até a máquina, e esta transformará a energia elétrica em energia mecânica no seu eixo, para movimentar cargas. Por outro lado, se o eixo da máquina for girado por uma força externa, uma usina eólica, por exemplo, então a energia poderá fluir da máquina para a fonte de energia, fazendo com que se tenha operação como gerador de corrente contínua.

Assim, neste capítulo será explicado o funcionamento da máquina de corrente contínua nos quatro quadrantes de operação, ou seja, como motor girando para a esquerda e direita e como gerador girando para esquerda ou para direita. Em termos práticos, pode-se imaginar um *skate* elétrico, andando para frente em uma subida (operação como motor) ou andando para frente em uma descida (operação como gerador); do mesmo modo, o *skate* poderia estar andando para trás (marcha a ré) em uma subida (operação como motor) ou andando para trás em uma descida (operação como gerador). Em verdade, um *skate* elétrico será usado, preferencialmente, andando para frente em subidas ou descidas, fazendo com que o circuito de acionamento precise operar em 2 quadrantes apenas, não em 4 quadrantes, como seria o caso de um carro elétrico, por exemplo.

A Figura 9 apresenta os quatro quadrantes de operação de uma máquina de corrente contínua, girando no sentido horário e anti-horário e operando como motor (recebendo energia da fonte) ou como gerador (fornecendo energia para a fonte). A operação como motor ou gerador é identificada pela potência (produto da tensão pela corrente na máquina) da máquina; quando a potência é positiva a máquina está operando como motor (consumindo energia) e quando a potência é negativa estará operando como gerador (fornecendo energia).

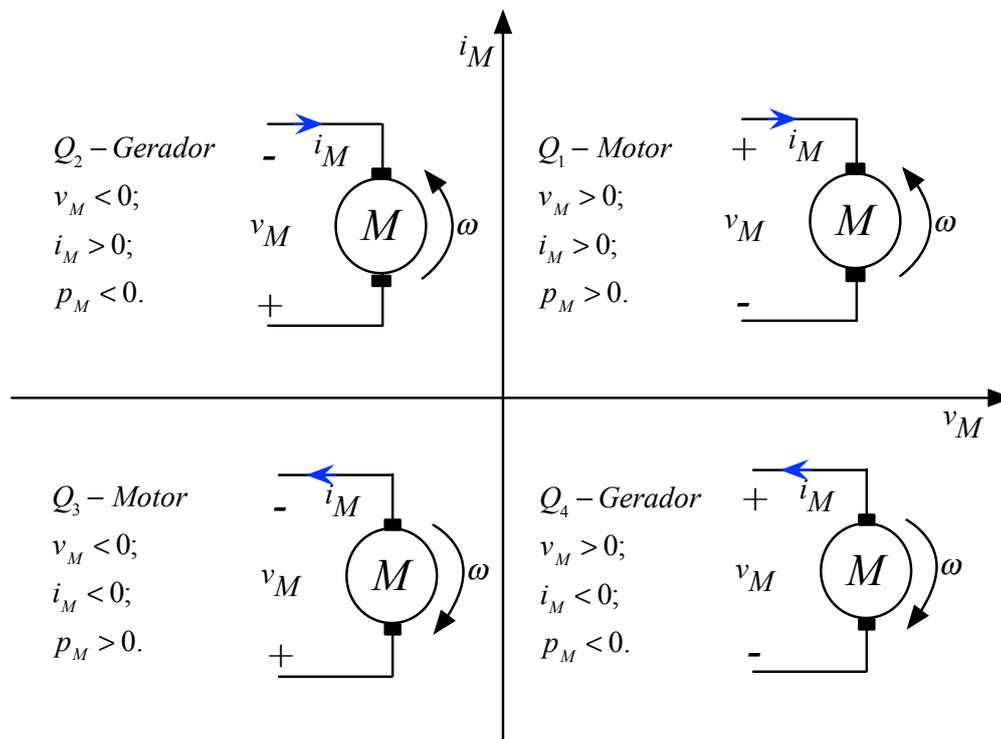


Figura 9 – Quadrantes de operação de uma máquina de corrente contínua.

As Figura 10, Figura 11, Figura 12 e Figura 13 mostram os quatro quadrantes de operação da máquina de corrente contínua, conforme comentado anteriormente, detalhando a polaridade da tensão e sentido da corrente em cada situação.

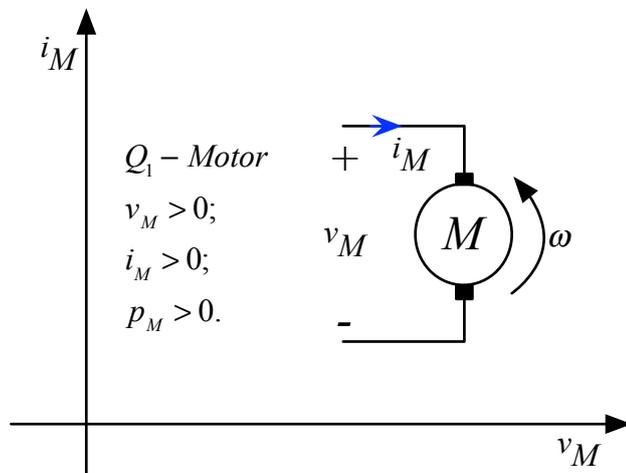


Figura 10 – Quadrante 1 – motor girando no sentido anti-horário.

Tensão e corrente positivas na máquina, girando no sentido anti-horário, operando como motor.

$Q_1 - Motor$
 $v_M > 0;$
 $i_M > 0;$
 $p_M > 0.$

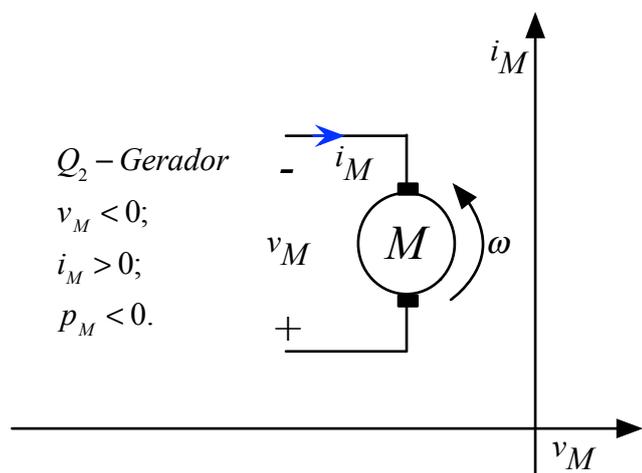


Figura 11 – Quadrante 2 – gerador girando no sentido anti-horário.

Tensão negativa e corrente positiva na máquina, girando no sentido anti-horário, operando como gerador.

$Q_2 - Gerador$
 $v_M < 0;$
 $i_M > 0;$
 $p_M < 0.$

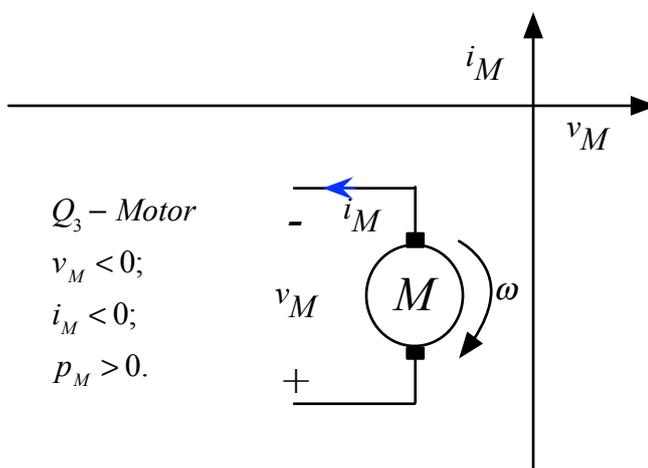


Figura 12 – Quadrante 3 – motor girando no sentido horário.

Tensão e corrente negativas na máquina, girando no sentido horário, operando como motor.

$Q_3 - Motor$
 $v_M < 0;$
 $i_M < 0;$
 $p_M > 0.$

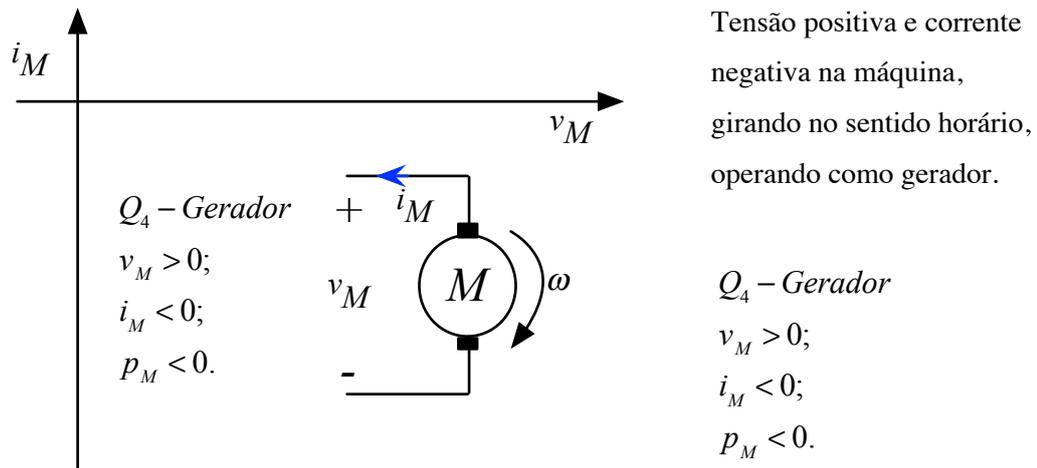


Figura 13 – Quadrante 4 – motor girando no sentido horário.

A operação em um quadrante, dois, três ou quatro dependerá da aplicação da máquina de corrente contínua e de seu projeto, pois em geral os motores são dimensionados para atuarem como motores e não como geradores. Assim, em aplicações onde se deseja regenerar energia, o projeto e construção da máquina deverá levar isso em conta, como seria o caso de um veículo elétrico, por exemplo. Já em outras situações tem-se o projeto específico para atuação como gerador, em uma usina eólica, aplicação comum na geração de energia elétrica nos dias atuais.

3.3 Circuitos de Acionamento de Motores de Corrente Contínua

O circuito de acionamento desempenhará papel fundamental na operação da máquina de corrente contínua para determinar seu funcionamento em um, dois, três ou quatro quadrantes, isto é, em determinar o modo de operação da máquina como motor e/ou gerador.

Assim, o circuito mais simples para acionamento de um motor de corrente contínua, que permite a operação em um quadrante apenas, sem controle de velocidade, é mostrado na Figura 14. Este circuito emprega uma chave liga-desliga, mecânica, sendo utilizado em aplicações simples, que necessitam unicamente que o motor funcione ou não. Neste circuito não é possível alterar o sentido de giro do motor, nem controlar sua velocidade e nem regenerar energia.

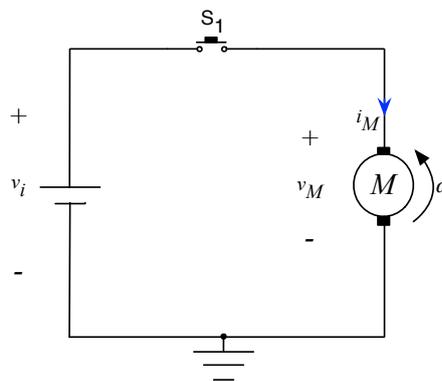


Figura 14 – Circuito de acionamento simples, para operação em 1 quadrante apenas.

A Figura 15 apresenta um circuito com transistor bipolar e diodo de roda-livre. Os transistores dos circuitos a seguir poderiam ser substituídos por outros semicondutores rápidos, como MOSFETs ou IGBTs, por exemplo. No circuito da Figura 15 é possível ligar e desligar o motor e controlar sua velocidade, empregando modulação por largura de pulsos (PWM), como estudado nos conversores cc-cc nos capítulos anteriores.

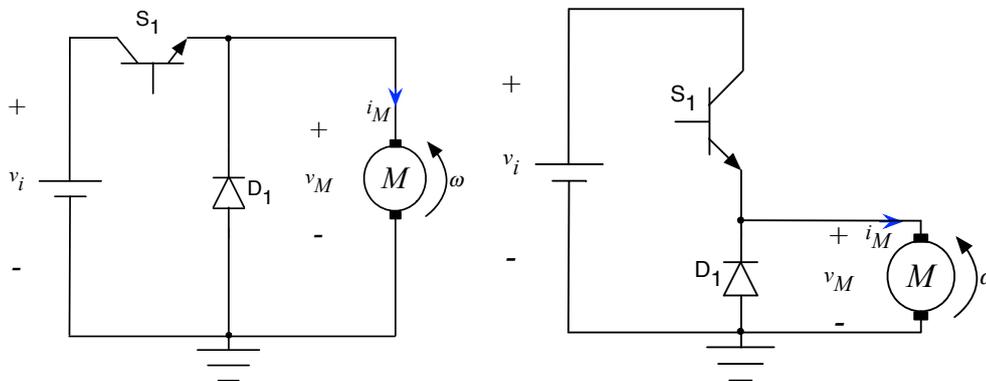


Figura 15 – Circuito de acionamento simples, empregando transistor, para operação em 1 quadrante.

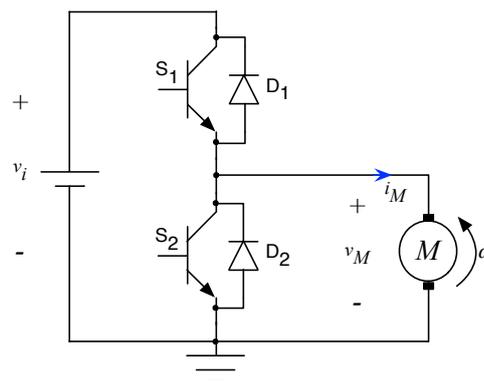


Figura 16 – Circuito de acionamento com conversor meia ponte (1 braço).

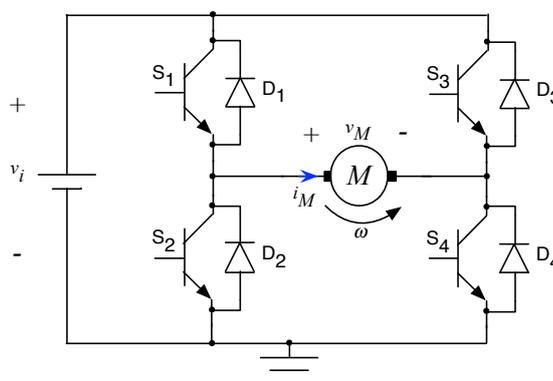


Figura 17 – Circuito de acionamento com conversor em ponte completa.

O conversor apresentado na Figura 15 é um conversor Buck sem filtro de saída, visto que um motor de corrente contínua pode funcionar com tensão pulsada em seus terminais, pois tem um

circuito equivalente representado por um resistor, indutor e força contra eletromotriz. O desenho da direita representa o mesmo circuito modificado para fins didáticos, em virtude dos circuitos que serão apresentados a seguir nas Figura 16 e Figura 17.

A Figura 16 apresenta um circuito com um braço (meia ponte), que utiliza dois transistores e dois diodos e que permite controlar a velocidade do motor e regenerar energia. O transistor S_1 e o diodo D_2 atuam na operação como motor, de maneira idêntica ao circuito da Figura 15. Assim, o transistor S_2 irá permanecer aberto. Note que neste caso a corrente irá circular da fonte para o motor.

Por sua vez, se for mantido o transistor S_1 aberto e se acionar o transistor S_2 , juntamente com o diodo D_1 , então a corrente poderá circular da máquina para a fonte, atuando como gerador e regenerando energia. O controle desta energia regenerada será realizado pela razão cíclica do transistor S_2 , que permitirá controlar a carga de uma bateria, por exemplo, se estiver no circuito como fonte de energia.

É importante destacar que em circuitos que utilizam os interruptores conectados na forma de braço, como mostrado nas Figura 16 e Figura 17, não se pode acionar os dois interruptores simultaneamente (S_1 e S_2 na Figura 16 e S_1 e S_2 ou S_3 e S_4 na Figura 17), pois se estará curto-circuitando a fonte de energia, danificando os interruptores. Esta falha (curto-circuito) é denominada de curto de braço e é um dos motivos mais comuns para danos em inversores de tensão, que utilizam esta configuração de conexão de seus interruptores, como será estudado nos próximos capítulos deste curso.

Por fim, o circuito da Figura 17 é um conversor ponte completa, também conhecido por ponte H, que permite controlar a velocidade do motor, seu sentido de giro e seu modo de operação. Em outras palavras, a máquina pode operar nos quatro quadrantes, atuando como motor ou gerador, com velocidade variável e girando nos dois sentidos; significando que se pode utilizar a máquina plenamente com todas as suas funcionalidades. Assim, este tipo de circuito é muito empregado para acionamento de motores de veículos elétricos, que devem ter velocidade variável, andar para frente e para trás, e regenerar energia durante as descidas ou freadas.

Um exemplo de circuito comercial que utiliza o conversor ponte completa é mostrado na Figura 18, implementado com base no circuito integrado L293, que permite o acionamento de dois motores sem inversão de rotação, ou um motor com controle total, por meio do conversor ponte completa (ponte H), conforme mostrado na Figura 19. Existem outros modelos de circuitos integrados disponíveis comercialmente, tanto para acionamento de motores de corrente contínua convencionais, como motores de passo, etc.

Note no circuito da Figura 19 que foram adicionados os diodos de roda-livre externamente ao circuito integrado. Este cuidado é muito importante, pois do contrário poderão ocorrer danos nos transistores internos do CI, visto se estar comutando uma carga indutiva (motor), que poderá gerar sobretensões caso não se tenha caminho para a corrente elétrica ao abrir algum interruptor do conversor ponte completa.

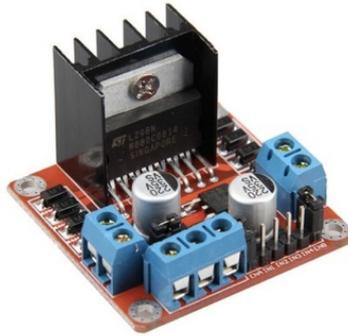


Figura 18 – Exemplo de placa de acionamento de motor que emprega o conversor ponte completa.

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

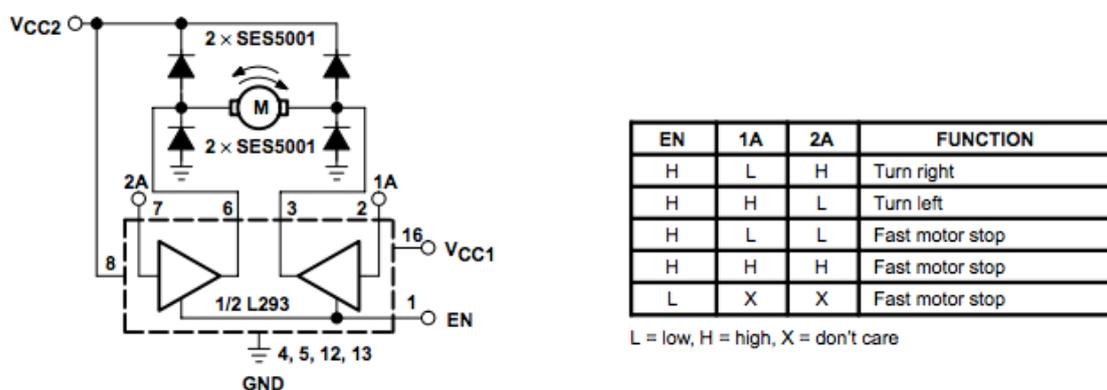


Figura 19 – Exemplo de conexão interna do L293.

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

4 Simulação de Circuito de Acionamento de Motor CC

A simulação do circuito equivalente de um motor de corrente contínua será realizada utilizando o *software* Psim, com conversor Buck, conforme será realizado na atividade de laboratório relacionada com a temática deste capítulo.

4.1 Simulação do Conversor Buck com Controlador Liga-Desliga

O circuito simulado no Psim está mostrado na Figura 20, com características semelhantes aquelas que serão utilizadas na aula de laboratório. Note que os componentes são ideais, ou seja, genéricos, não se utilizando algum modelo específico de chave. A fonte é para 15 V (médios). A carga possui uma resistência de 47 Ω e indutância de 10 mH, que representa o motor de corrente contínua em seu modelo mais simples, que não leva em consideração a força contra eletromotriz. O tempo de simulação pode ser de 20 ms e passo de cálculo de 0,001 ms (1 μ s). Note que a frequência de comutação é de 500 Hz e a razão cíclica ajustável. O elemento ON1 é utilizado pelo Psim para comandar interruptores, equivalente a um *driver* de acionamento do interruptor.

A forma de onda para operação com razão cíclica de 10% é mostrada na Figura 21 onde se nota a tensão de entrada, sobre o motor e a corrente do motor. A corrente da Figura 21 tem formato típico de circuitos RL, como se estuda nas disciplinas de circuitos elétricos, isto é, se tem uma exponencial crescente, quando a chave está fechada e a fonte fornece energia ao circuito; após se tem uma exponencial decrescente, quando a chave está aberta e a energia acumulada na indutância será transferida para a resistência por meio do diodo de roda-livre. Os parâmetros utilizados (R_m e L_m) não são reais, isto é, não foram obtidos de um motor, mas apenas semelhantes ao que se teria na prática.

A seguir, nas Figura 22 e Figura 23, se mostram os resultados de simulação para operação com razão cíclica de 50% e 90%, respectivamente. Note que na Figura 21 o conversor está operando em condução descontinua, já na Figura 22 a condução é crítica e na Figura 23 se tem condução contínua.

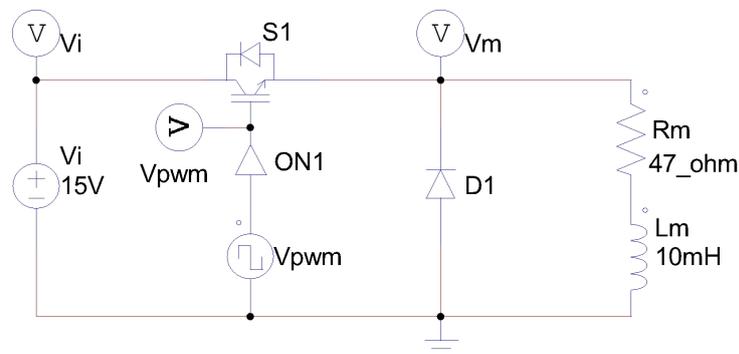


Figura 20 – Circuito simulado no Psim.

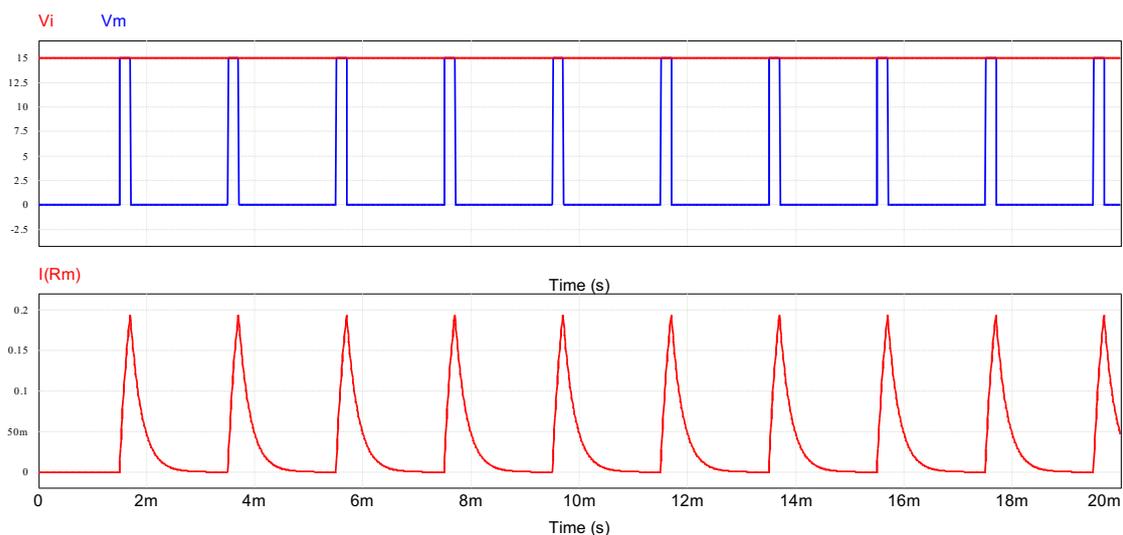


Figura 21 – Principais formas de onda do conversor com razão cíclica de 10%.

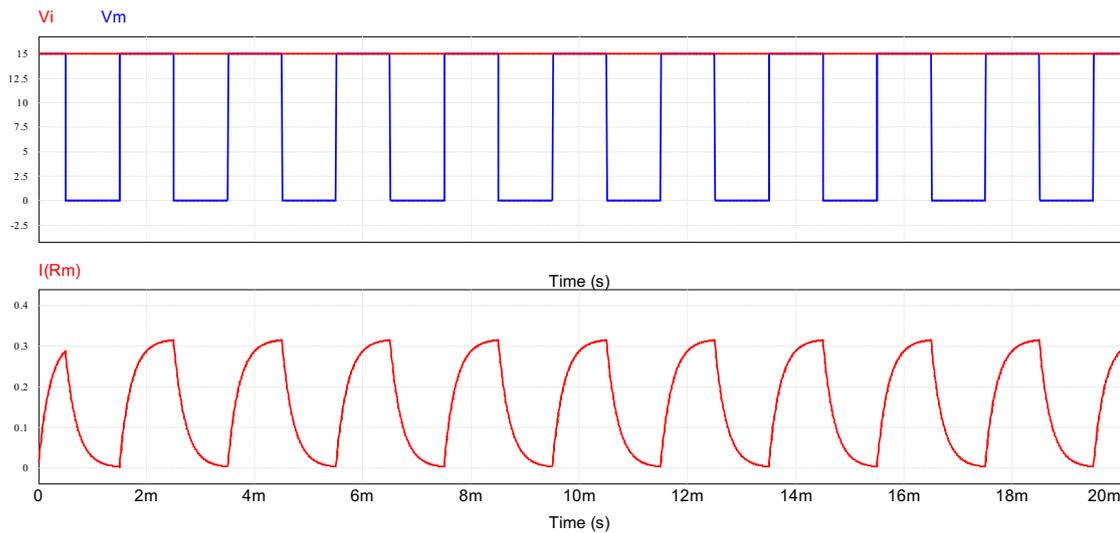


Figura 22 – Principais formas de onda do conversor com razão cíclica de 50%.

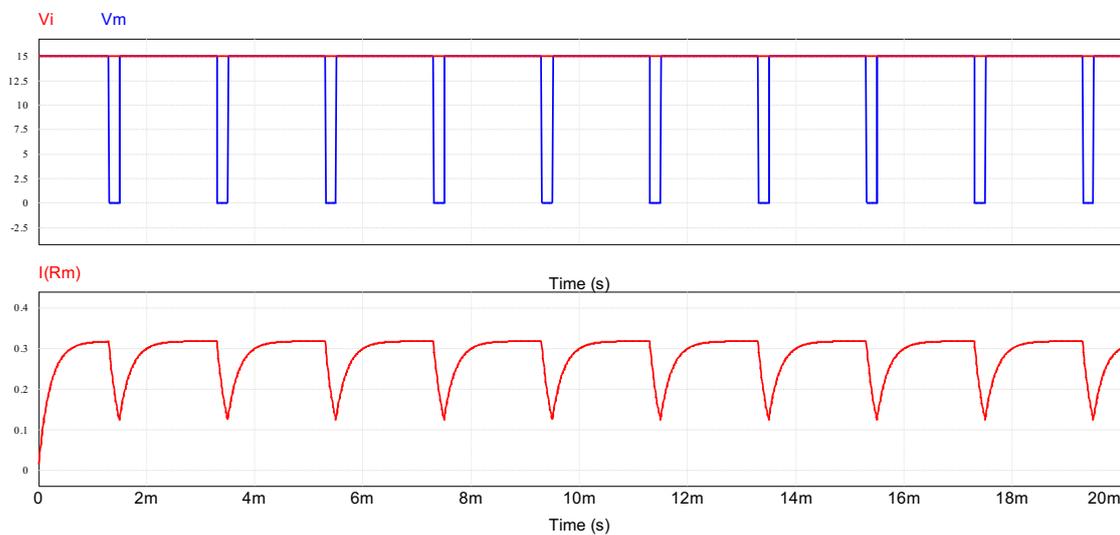


Figura 23 – Principais formas de onda do conversor com razão cíclica de 90%.

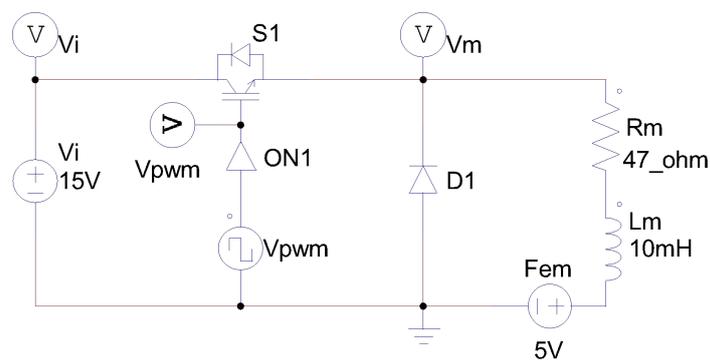


Figura 24 – Circuito simulado com força contra eletromotriz do motor.

A simulação da Figura 24 foi realizada considerando uma força contra eletromotriz (FEM) de 5 V. Esta tensão é auto induzida internamente ao motor, não sendo uma fonte de energia elétrica, como está desenhado no circuito. As formas de onda resultantes são mostradas na Figura 25. Note

que neste caso se tem tensão de três níveis no motor, de maneira idêntica ao que se tinha com o conversor Buck cc-cc operando em condução descontinua e carga resistiva.

Além disso, é possível notar na Figura 25 que o formato da onda de corrente é diferente na subida em comparação com a descida; isso ocorre em virtude da presença da fonte de entrada na primeira etapa (exponencial crescente) e apenas a força contra eletromotriz na segunda etapa (exponencial decrescente).

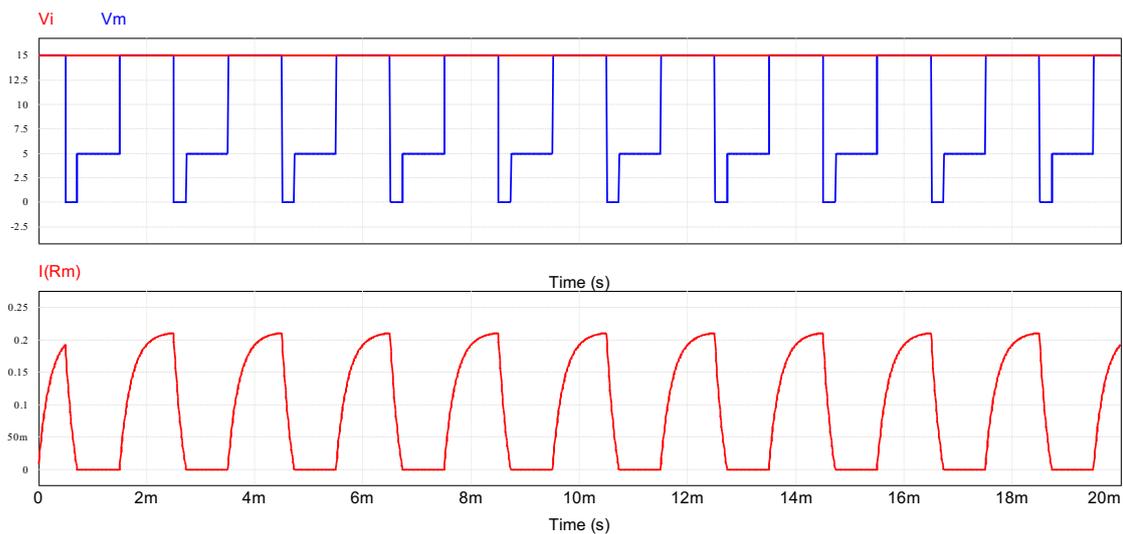


Figura 25 – Formas de onda para razão cíclica de 50% e força contra eletromotriz.

5 Exercícios

Exercícios Resolvidos

ER 01) Considerando as formas de onda da Figura 25, onde o conversor Buck está operando em condução descontinua e se deseja determinar uma expressão para calcular a tensão sobre o motor, obtenha a equação equivalente a partir do ganho estático do conversor Buck.

A expressão do ganho estático do conversor Buck operando em condução descontinua é:

$$V_o = \frac{2 \cdot V_i}{1 + \sqrt{1 + \frac{8 \cdot L_m \cdot F_s}{R_m \cdot D^2}}}$$

A constante de tempo do motor é representada por:

$$\tau_m = \frac{L_m}{R_m}$$

Portanto:

$$V_o = \frac{2 \cdot V_i}{1 + \sqrt{1 + \frac{8 \cdot F_s \cdot L_m}{D^2 \cdot R_m}}} = \frac{2 \cdot V_i}{1 + \sqrt{1 + \frac{8 \cdot F_s \cdot \tau_m}{D^2}}};$$

$$1 + \sqrt{1 + \frac{8 \cdot F_s \cdot \tau_m}{D^2}} = \frac{2 \cdot V_i}{V_o} \rightarrow \sqrt{1 + \frac{8 \cdot F_s \cdot \tau_m}{D^2}} = \frac{2 \cdot V_i}{V_o} - 1;$$

$$1 + \frac{8 \cdot F_s \cdot \tau_m}{D^2} = \left(\frac{2 \cdot V_i}{V_o} - 1 \right)^2 \rightarrow \frac{8 \cdot F_s \cdot \tau_m}{D^2} = \left(\frac{2 \cdot V_i}{V_o} - 1 \right)^2 - 1;$$

$$\tau_m = \frac{D^2}{8 \cdot F_s} \cdot \left[\left(\frac{2 \cdot V_i}{V_o} - 1 \right)^2 - 1 \right].$$

ER 02) Considerando o circuito da Figura 24 e que em laboratório se mediu a tensão de saída para operação com razão cíclica de 50% e se obteve o valor de 13 V, para uma tensão de entrada de 15 V. Determine a constante de tempo do motor de corrente contínua.

A partir da expressão obtida no exercício anterior:

$$\tau_m = \frac{D^2}{8 \cdot F_s} \cdot \left[\left(\frac{2 \cdot V_i}{V_o} - 1 \right)^2 - 1 \right] = \frac{0,5^2}{8 \cdot 500} \cdot \left[\left(\frac{2 \cdot 15}{13} - 1 \right)^2 - 1 \right];$$

$$\tau_m = 44,375 \mu s.$$

ER 03) Considerando o exercício resolvido ER 02, determine a tensão de saída nos seguintes casos:

- Razão cíclica de 0%;
- Razão cíclica de 25%;
- Razão cíclica de 50%;
- Razão cíclica de 75%;
- Razão cíclica de 100%.

Usando-se a constante de tempo determinada no exemplo anterior, se pode escrever que:

$$V_o = \frac{2 \cdot V_i}{1 + \sqrt{1 + \frac{8 \cdot F_s \cdot \tau_m}{D^2}}} = \frac{2 \cdot 15}{1 + \sqrt{1 + \frac{8 \cdot 500}{D^2} \cdot 44,375 \mu}}$$

Portanto:

- Razão cíclica de 0% > $V_o = 0$ V;
- Razão cíclica de 25% > $V_o = 10,14$ V;
- Razão cíclica de 50% > $V_o = 13$ V;

- Razão cíclica de 75% $> V_o = 13,97 \text{ V}$;
- Razão cíclica de 100% $> V_o = 14,39 \text{ V} > 15 \text{ V}$.

ER 04) Explique o procedimento que foi realizado nos exemplos anteriores, que permitiu calcular a tensão de saída do circuito de maneira aproximada. Comente sobre o erro cometido com esta técnica. A metodologia empregada nos exemplos anteriores se baseou em resultados empíricos, isto é, obter uma expressão matemática que represente um sistema físico a partir de medições de laboratório. Assim, para não realizar ensaios completos para determinar o circuito equivalente do motor de corrente contínua, a exemplo do circuito apresentado na Figura 6, se realizou um procedimento mais simples que consistiu em:

1. Medir a tensão de saída (sobre o motor) para uma determinada razão cíclica;
2. Calcular a constante de tempo do motor (L_m/R_m) usando a tensão medida anteriormente;
3. Inserir a constante de tempo obtida para calcular a tensão sobre o motor para as demais razões cíclicas, extrapolando o resultado da etapa 2.

O erro cometido é resultante de dois fatores:

1. A extrapolação utilizada, isto é, considerar que a constante de tempo não mude para as diferentes razões cíclicas de operação do conversor, e conseqüente velocidade do motor, permite obter um resultado aproximado;
2. Considerar que a constante de tempo do motor não mude conforme a carga aplicada em seu eixo.

Assim, os resultados obtidos são aproximados e estão sujeitos aos erros elencados acima, mas que permitem estudar e implementar o circuito de acionamento de um motor de corrente contínua de maneira simples e rápida.

Exercícios Propostos

EP 01) Caso o conversor esteja operando em condução contínua, seria necessário determinar a constante de tempo do motor para se conhecer a tensão de saída do conversor?

EP 02) Considerando o circuito da Figura 24 e que em laboratório se mediu a tensão de saída para operação com razão cíclica de 30% e se obteve o valor de 12 V, para uma tensão de entrada de 15 V. Determine a constante de tempo do motor de corrente contínua.

EP 03) Considerando o circuito da Figura 24 e que em laboratório se mediu a tensão de saída para operação com razão cíclica de 70% e se obteve o valor de 12,5 V, para uma tensão de entrada de 15 V. Determine a constante de tempo do motor de corrente contínua.

EP 04) Considerando o circuito da Figura 24 e que em laboratório se mediu a tensão de saída para operação com razão cíclica de 50% e se obteve o valor de 14 V, para uma tensão de entrada de 15 V. Determine a constante de tempo do motor de corrente contínua.

EP 05) Considerando o exercício proposto EP 02, determine a tensão de saída nos seguintes casos:

- Razão cíclica de 0%;
- Razão cíclica de 25%;
- Razão cíclica de 50%;
- Razão cíclica de 75%;
- Razão cíclica de 100%.

EP 06) Considerando o exercício proposto EP 03, determine a tensão de saída nos seguintes casos:

- Razão cíclica de 0%;
- Razão cíclica de 25%;
- Razão cíclica de 50%;
- Razão cíclica de 75%;
- Razão cíclica de 100%.

EP 07) Considerando o exercício proposto EP 04, determine a tensão de saída nos seguintes casos:

- Razão cíclica de 0%;
- Razão cíclica de 25%;
- Razão cíclica de 50%;
- Razão cíclica de 75%;
- Razão cíclica de 100%.

EP 08) Simule o circuito do exemplo resolvido 02 (ER 01) no *software* Psim e compare os resultados obtidos no simulador com os calculados.

EP 09) Simule o circuito do exemplo resolvido 03 (ER 02) no *software* Psim e compare os resultados obtidos no simulador com os calculados.

EP 10) Simule o circuito do exercício proposto 02 (EP 02) no *software* Psim e compare os resultados obtidos no simulador com os calculados.

EP 11) Simule o circuito do exercício resolvido 03 (EP 03) no *software* Psim e compare os resultados obtidos no simulador com os calculados.

EP 12) Simule o circuito do exercício resolvido 04 (EP 04) no *software* Psim e compare os resultados obtidos no simulador com os calculados.

EP 13) Repita o exercício EP 02, agora considerando uma tensão de entrada de 24 V.

EP 14) Repita o exercício EP 02, agora considerando uma tensão de entrada de 12 V e uma tensão medida de 9 V.

EP 15) Repita o exercício EP 02, agora considerando uma tensão de entrada de 9 V e uma tensão medida de 6 V.

6 Laboratório

6.1 Introdução

Esta atividade de laboratório tem por objetivo exercitar o conteúdo estudado nesta aula (capítulo), especificamente sobre o estudo de conversores acionando motores de corrente contínua.

Em síntese, objetiva-se:

- Aplicar os princípios da modulação PWM;
- Montar um conversor cc-cc para acionamento de motor de corrente contínua;
- Entender os princípios básicos de conversores cc-cc;
- Realizar medições no circuito;
- Observar as formas de onda sobre os elementos do circuito.

6.2 Modulação PWM

Implemente no Arduino o programa que gere modulação por largura de pulsos, como foi realizado em aula anterior.

A seguir, monte o circuito da Figura 26, atentando para as conexões dos componentes. O circuito da Figura 26 permite que se varie a largura dos pulsos de comando do interruptor (PWM) conforme o ajuste do potenciômetro. Em outras palavras, se deseja que a velocidade do motor seja alterada pelo ajuste do potenciômetro do circuito.

Gere os sinais de comando no Arduino e verifique se os mesmos estão corretos, usando para isso um osciloscópio. Comprove que ocorre a modulação PWM e que o circuito esteja operando corretamente.

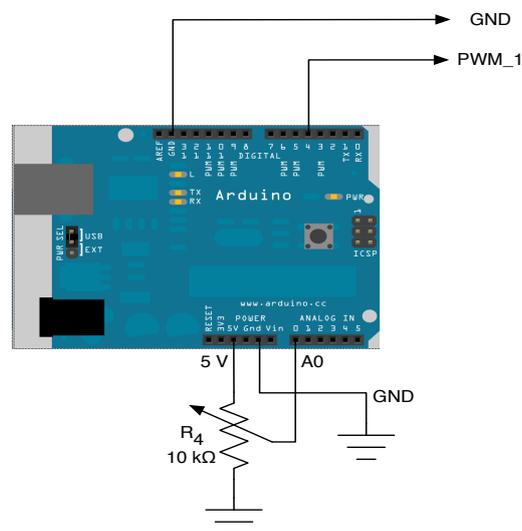


Figura 26 – Circuito para geração da modulação PWM.

6.3 Conversor CC-CC Acionando Motor CC

Monte na matriz de contatos o circuito mostrado na Figura 27. A tensão de entrada (V_i) será de 12 V.

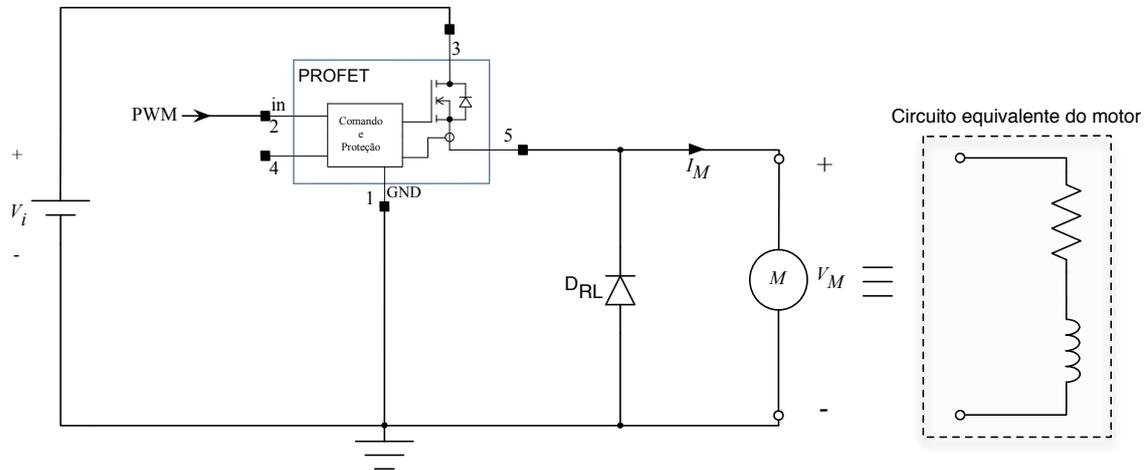


Figura 27 – Circuito do conversor cc-cc para acionamento do motor cc.

6.4 Ensaios com o Circuito Montado

Altere a razão cíclica no Arduino conforme solicitado na Tabela 1, medindo a tensão de saída e anotando os valores, para posteriormente comparar com os cálculos realizados.

Observe que a velocidade do motor depende da tensão média aplicada sobre o mesmo.

A tensão de saída do conversor Buck é calculada por:

- $V_o = D \cdot V_i \rightarrow$ condução contínua;
- $V_o = \frac{2 \cdot V_i}{1 + \sqrt{1 + \frac{8 \cdot L_o \cdot F_s}{R_o \cdot D^2}}} \rightarrow$ condução descontínua.

Tabela 1 – Tensão média de saída no conversor cc-cc acionando motor cc.

Razão cíclica	Tensão de saída	
	Calculado	Medido
0	0	
30%		
50%		
70%		
90%		

6.5 Questões – Comente suas respostas.

- 1) Esboce as formas de onda observadas no osciloscópio na Figura 28.
- 2) O circuito operou em condução contínua ou descontínua. Justifique sua resposta.
- 3) Qual a forma de onda da corrente no motor? Por que a corrente apresenta esta forma, visto que a tensão é pulsada?

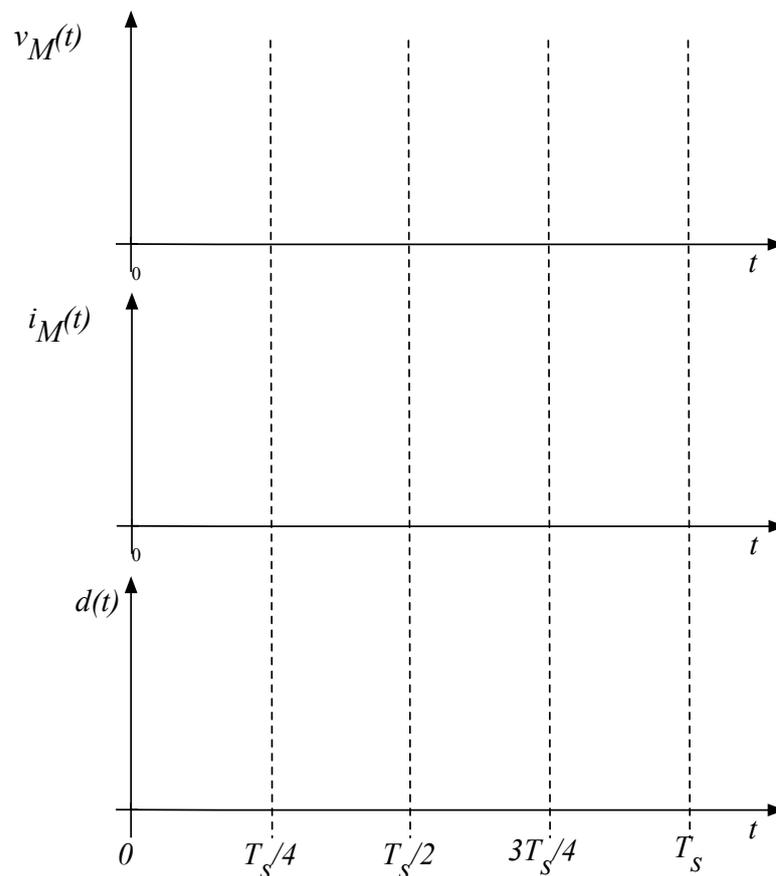


Figura 28 – Principais formas de onda do conversor cc-cc para acionamento do motor cc.

7 Referências

- [1] AHMED, A. Eletrônica de potência. São Paulo: Prentice Hall, 2000.
- [2] ERICKSON, Robert W. Fundamentals of Power Electronics. New York, EUA – Chapman & Hall, 1997.
- [3] MOHAN, N. Power Electronic Converters, Application and Design. New York: IE-Wilwy, 2003.
- [4] WEG. Motores de Corrente Contínua. Disponível em <https://www.weg.net/institutional/BR/en/>.
- [5] SIEMENS. Motores de Corrente Contínua – Guia rápido para uma especificação precisa, edição 01, 2006. Disponível em: <https://new.siemens.com/br/pt.html>.