

# Controlador De Velocidade Micro Controlado Para Veículos Elétricos Com Motor BLDC<sup>(1)</sup>

**Felipe Zavaski<sup>(2)</sup>, Jacson R. Dreher<sup>(3)</sup>**

## Resumo Expandido

<sup>(1)</sup> Trabalho executado com recursos do Edital nº 12/PRPPGI/2012, Programa de Apoio ao Fortalecimento dos Grupos de Pesquisa, da Pró-Reitoria de Pesquisa, Pós-Graduação e Inovação.

<sup>(2)</sup> Estudante do curso de Engenharia de Controle e Automação do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, *Campus* Chapecó; zavaski\_2104@hotmail.com; <sup>(3)</sup> Professor e pesquisador pelo Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, *Campus* Chapecó; jacson@ifsc.edu.br.

**RESUMO:** A utilização de veículos elétricos tem se mostrado cada vez mais apropriada frente às atuais problemáticas que circundam o uso eficiente da energia. Motores CC são largamente empregados em veículos elétricos, dentre eles os motores CC sem escovas ou *Brushless-DC* (BLDC) se destacam devido o elevado rendimento e reduzida manutenção, tornando-se a melhor opção para esta aplicação. A principal característica desses motores é não possuir comutador mecânico. A comutação é feita através de um circuito eletrônico, o qual realiza o controle de velocidade de rotação do motor. Para comprovar o funcionamento, foi implementado o protótipo de um controlador de velocidade micro controlado para um motor BLDC e seus resultados experimentais são apresentados.

**Palavra Chave:** Motor *Brushless*, Controlador de Velocidade, Micro-controlador.

## INTRODUÇÃO

Com a elevada demanda de mercado e a vasta área de utilização de motores, cada vez mais se busca alternativas para os motores convencionais CC (corrente contínua). Motores com ímãs no estator e sem escovas são denominados motores *brushless* CC (BLDC) que por possuírem alto rendimento e manutenção simples são foco de estudos para novas aplicações (KRISHNAN; SHIYOUNG, 1997).

A comutação das bobinas é feita eletronicamente acionando uma sequência de chaves eletrônicas de acordo com sequência dos sensores de posição dentro do motor. Este tipo de motor caracteriza-se também por possuir ímãs permanentes no rotor e sua forma de onda não senoidal. O conjunto composto pelo motor BLDC e seu controlador funcionam como um motor CC convencional, pois o controlador faz a função de escova-comutador da mesma forma que os motores convencionais (CESARE, 2007).

Os motores BLDC podem substituir os motores CC em todas as aplicações com menor preço, maior variedade de configurações de potência e torque. A aplicação é observada em acionamento de sistemas de refrigeração, periféricos de computador, veículos elétricos, máquinas industriais, servo motores, ventiladores, bombas, lavadoras, secadoras, cadeiras de rodas, carrinhos de golfe, ferramentas portáteis, engarrafamento e aplicações em processamento de alimentos (JULIANI, 2007).

Neste artigo será apresentado o projeto de um controlador de velocidade microcontrolado para um motor BLDC aplicado a um veículo elétrico.

## METODOLOGIA

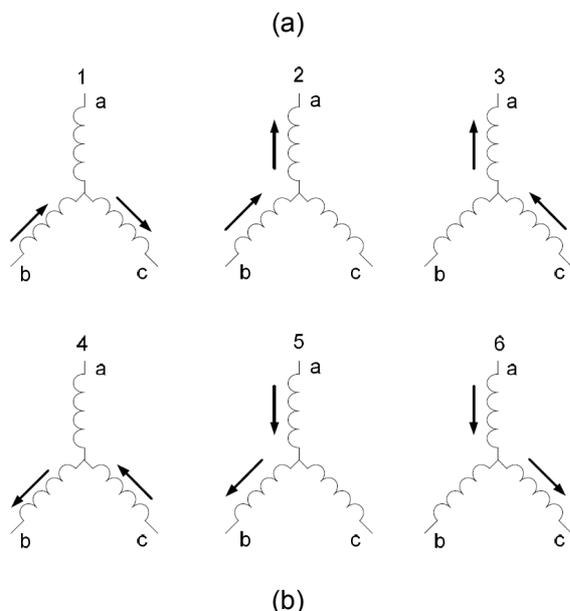
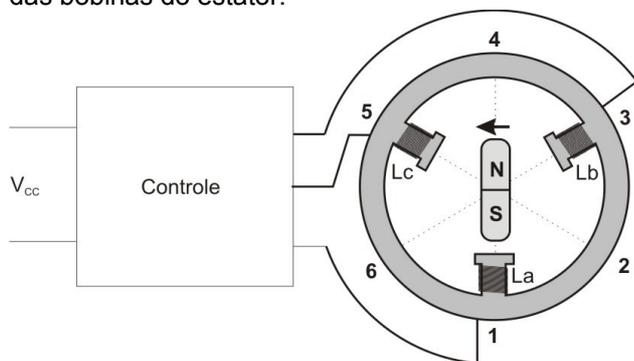
A principal característica dos motores BLDC é não apresentar comutador mecânico, eliminando o uso das escovas. A comutação é feita através de um circuito eletrônico conversor, chamado controlador de velocidade. Neste contexto, a evolução da eletrônica de potência contribuiu para a utilização dos motores BLDC, possibilitando o desenvolvimento de técnicas de controle mais precisas, aumentando a aplicabilidade do motor (TRINDADE, 2009).

O princípio de funcionamento do Motor BLDC pode ser entendido a partir do modelo apresentado na Figura 1(a). Ele possui o estator bobinado e o rotor formado por ímã permanente. O ímã permanente é o responsável pelo estabelecimento de campo magnético principal da máquina. O fluxo magnético gerado pelo ímã permanente reage com o fluxo magnético criado pelas correntes do estator, resultando num conjugado eletromecânico. Esse conjugado age na máquina no sentido de alinhar esses dois campos. No instante do alinhamento há a inversão do sentido da corrente através do circuito controlador, mantendo a rotação. A quantidade de bobinas e ímãs permanentes pode variar dependendo da construção do motor. As maiorias dos Motores BLDC seguem um padrão de três fases, sendo, portanto, o estator formado por três bobinas. O torque de um Motor BLDC pode ser compreendido pela equação (1):

$$T = P \cdot Dr \cdot l \cdot N \cdot B \cdot I \quad (1)$$

onde  $P$  é número de polos,  $D_r$  é o diâmetro do rotor,  $l$  é o comprimento axial do rotor,  $N$  é o número de espiras,  $B$  é a densidade de fluxo magnético no entreferro e  $I$  é a corrente no motor. Assim conclui-se que o conjugado é proporcional á corrente, visto que os demais parâmetros não variam após definido o projeto do motor. O circuito eletrônico de controle, representado por um bloco na Figura 1(a) realiza a operação de chaveamento sequencial das bobinas de acordo com a Figura 1(b). Em cada etapa de chaveamento é aplicado corrente em apenas duas bobinas, uma com corrente positiva e outra com corrente negativa, a terceira bobina permanece inativa. A corrente fornecida pelo controlador às bobinas tem sua polaridade invertida ao longo de sua operação obedecendo a uma ordem sequencial, determinada pelo posicionamento do rotor (SIQUEIRA; ANDRADE, 2008).

Figura 1 – Motor BLDC: (a) aspectos construtivos de um motor BLDC, (b) sequência de chaveamento das bobinas do estator.

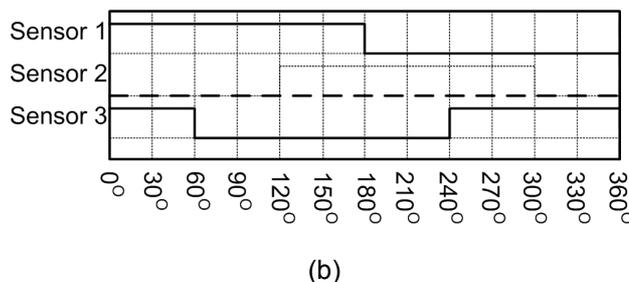
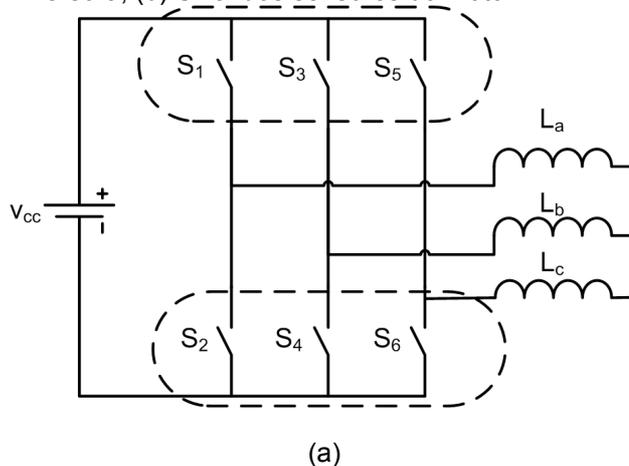


Fonte: Elaboração própria.

Os motores BLDC trifásicos podem ser acionados por uma ponte inversora trifásica mostrada na Figura 2(a). O controle de velocidade pode ser realizado por modulação por largura de pulso (PWM). Através da variação da largura do pulso, pode-se variar a tensão média aplicada às bobinas do motor e assim realizar o controle da corrente. Durante o acionamento do motor, somente duas

chaves da ponte inversora são acionadas durante o mesmo instante: uma chave da semi-ponte positiva e uma chave da semi-ponte negativa. Pode-se aplicar a PWM somente na semi-ponte positiva, facilitando a implementação e possibilitando a utilização de chaves com tempo de comutação maior na semi-ponte negativa. A informação do posicionamento do rotor é obtida através de sensores presentes em cada bobina. A Figura 2(b) mostra o sinal proveniente dos sensores. Cada sensor permanece ativo por  $180^\circ$ , tendo seu acionamento defasado de  $120^\circ$  entre um e outro. A maioria dos motores BLDC utiliza sensor de efeito Hall. Estes sensores possuem tensão de saída com lógica digital de 0 e 5V (TTL), acionados por campo magnético (CESARE, 2007).

Figura 2- Acionamento do motor BLDC: (a) ponte inversora, (b) Sinal dos sensores do motor.

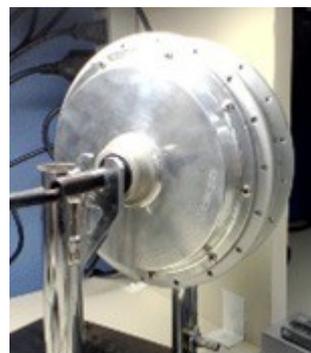


Fonte: Elaboração própria.

### Projeto do sistema proposto

O projeto do controlador de velocidade foi baseado em um motor específico para utilização em bicicletas.

Figura 3 - Motor BLDC para bicicleta.



Fonte: Elaboração própria.

O motor possui as seguintes características:  
Tabela 2 - Características do Motor BLDC

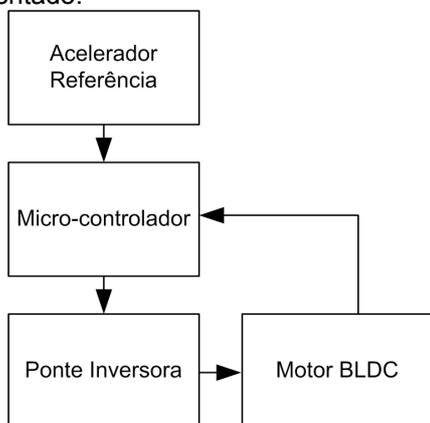
MOTOR BRUSHLESS DC - 600W	
Tensão de alimentação do motor	36V
Tensão de alimentação dos sensores	5 V
Rotação máxima	250 RPM
Passos por volta	48

Fonte: Elaboração própria.

O diagrama em blocos do sistema implementado pode ser visualizado na Figura 4. O bloco de controle do sistema é um micro controlador. Utilizou-se um micro controlador Atmel ATmega 328 com cristal de 16MHz. A programação foi realizado através de compilador da plataforma Arduino®, que utiliza uma linguagem de programação baseada em C.

O micro controlador recebe um sinal analógico de tensão de referência do acelerador entre zero e cinco volts através de uma entrada analógica de 10bits. A referência é utilizada para modular a tensão de saída da ponte inversora através de PWM, proporcional ao sinal de referência, e assim variar a velocidade do motor. Além disso, o micro controlador deve ler os sensores de posição do motor para fazer o acionamento seqüencial das bobinas do motor BLDC.

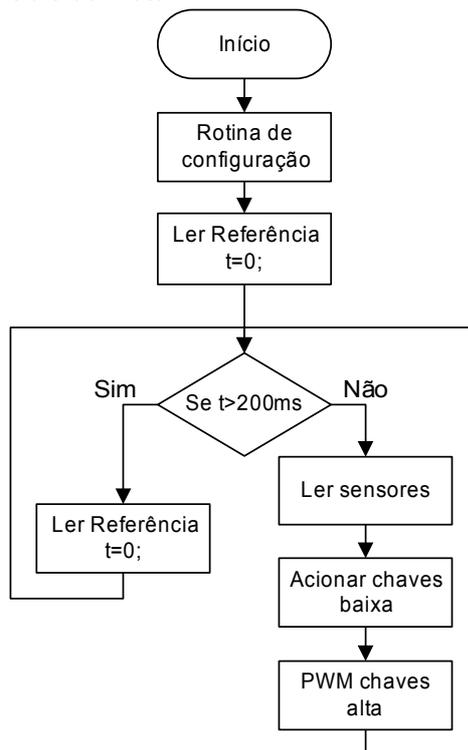
Figura 4 - Diagrama em blocos do sistema implementado.



Fonte: Elaboração própria.

Um fluxograma simplificado, mostrado na Figura 5 descreve o algoritmo desenvolvido para o controle do motor BLDC. Ao ser energizado, o micro controlador realiza uma rotina de configuração das portas. Posteriormente é realizada a leitura do sinal de referência de velocidade e zerado um contador de tempo. São lidos os sensores, acionadas as chaves correspondentes da semi-ponte negativa e através de uma rotina, é gerado o PWM na chave da semi-ponte positiva. Optou-se pela geração do PWM via código pela flexibilidade em relação à frequência de chaveamento, que no caso foi de 12 KHz. A cada 200ms é executada novamente a leitura do sinal de referência de velocidade. Esta leitura é realizada com esta periodicidade, já que a leitura da entrada analógica da referência de velocidade demanda tempo.

Figura 5 - Fluxograma simplificado do algoritmo de controle do motor.



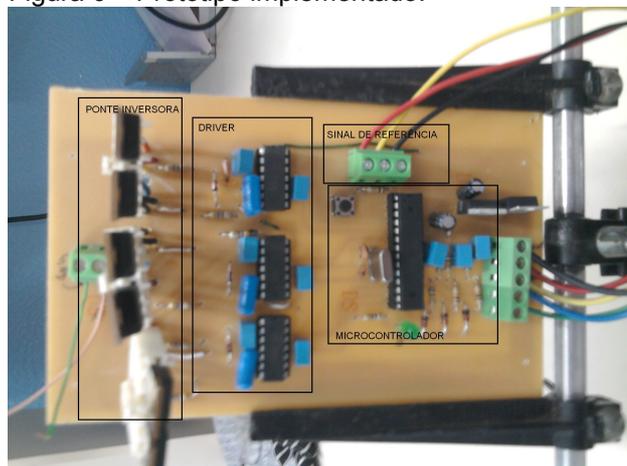
Fonte: Elaboração própria.

A ponte inversora trifásica é constituída de seis MOSFET's modelo IRF540 com as seguintes características:  $V_{DSS}=100V$ ,  $I_D=22A$  e  $R_{DSon}=0,077\Omega$ . A interface entre o micro controlador que trabalha com níveis TTL de 5V e o MOSFET é realizada através do driver IRF-2110.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 6 mostra o protótipo implementado. Pode-se verificar nas áreas demarcadas o micro controlador, a entrada do sinal de referência, os driver's e a ponte inversora composta por seis MOSFET's.

Figura 6 – Protótipo implementado.



Fonte: Elaboração própria.

A verificação do controle foi possível após a elaboração de uma tabela verdade com os sinais

dos três sensores do motor BLDC e as chaves que devem ser acionadas em cada condição. Posteriormente, os sinais dos sensores foram verificados através do osciloscópio digital em confronto com os sinais de controle gerados pelo micro controlador.

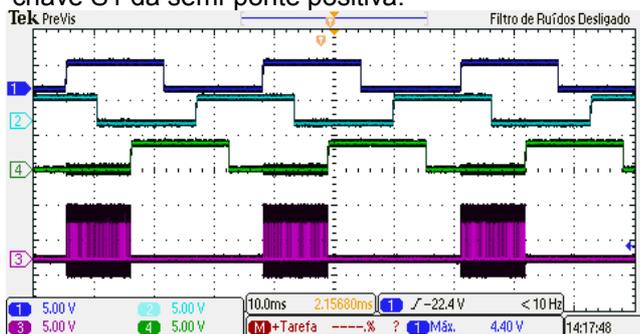
Tabela 1 - Tabela verdade dos sensores.

PASSO	1	2	3	4	5	6
Sensor 1	1	1	1	0	0	0
Sensor 2	0	0	1	1	1	0
Sensor 3	1	0	0	0	1	1
Chaves ativas	S5 S6	S5 S4	S3 S4	S3 S2	S1 S2	S1 S6

Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 7, canais 1, 2 e 4 do osciloscópio mostram os sinais da tensão provida dos sensores 1, 3 e 2 respectivamente. O canal 3 o sinal de controle modulado em PWM aplicado a chave S5. De acordo com a largura de pulso enviado a chave varia-se a velocidade do motor.

Figura 7 - Formas de onda de tensão dos sensores do motor BLDC e do sinal de controle da chave S1 da semi-ponte positiva.



Fonte: Elaboração própria.

## AGRADECIMENTOS

A Pró-Reitoria de Pesquisa, Pós-Graduação e Inovação pela elaboração e manutenção do programa de apoio a projetos de pesquisa e inovação tecnológica.

## CONCLUSÕES

Os resultados experimentais comprovaram ser possível o controle do motor BLDC através de um micro controlador. Através do uso do micro controlador tornam-se simples e rápidas as modificação de parâmetros no funcionamento do sistema de controle como frequência de PWM, limites de razão cíclica, monitoramento da corrente do motor, dentre outros. Outras funções podem ser implementadas como informações sobre velocidade, distância percorrida, autonomia. Entretanto percebe-se que para tais funções que exigem leitura de variáveis analógicas, se torna necessário o uso de outro micro controlador, dada a velocidade de processamento, que pode interferir na geração do PWM.

Como sugestão para trabalhos futuros, destaca-se com grande importância, a implementação de um sistema de frenagem regenerativa, aumentando a autonomia de um veículo elétrico e sua eficiência.

## REFERÊNCIAS

CESARE, Marcel Jacon. **Ponte Acionadora Trifásica de Média Potência para Acionamento de Alto Desempenho**. 2007. (TCC) - Escola de Engenharia de São Carlos, SP. 2007.

JULIANI, Aline Durrer Patelli. **Análise do Campo Magnético de um Motor de Ímã Permanente no Rotor Utilizando O Método dos Elementos Finitos**. 2007. 116 f. Dissertação (Mestrado) – Usp, São Carlos, 2007.

KRISHNAN, R.; SHIYOUNG L. P., Brushless DC Motor Drive with a New Power-Converter Topology. **IEEE Transactions on Industry Applications**, vol. 33, no. 4, July/August 1997.

RASHID, M. H. **Eletrônica de Potência: Circuitos, Dispositivos e Aplicações**. 1.ed. São. Paulo: Makron Books, 1998, 828p.

SIQUEIRA, Daniel Souto; ANDRADE, Darizon Alves de. Projeto e Simulação da Operação de um Motor de Corrente Contínua Sem Escovas. In: **XII Seminário de Iniciação Científica**. Uberlândia, 2008. Universidade Federal de Uberlândia.

TRINDADE, Rafael Henrique. **Estudo de máquinas elétricas não-convencionais: Motor Brushless DC**. 2009. 30 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

Z.Q. Zhu, Y. F. Shi, and D. Howe; **Comparasion of Torque-speed Characteristics of Interior-magnet Machines in Brushless AC and DC modes for EV/HEV Applications**. Journal of Asian Eletric Vehicles, Volume 4, Number 1, june 2006.