



Acionamento vetorial de máquinas elétricas com conversores estáticos de energia

Vector drive of electric machines with energy static converters

Rodrigo Garcia Almeida Martinez¹,

Emerson Giovani Carati²

RESUMO

Os conversores estáticos desempenham um papel fundamental na conversão de energia elétrica para diversas aplicações, desde sistema de geração fotovoltaica até o acionamento de motores elétricos. Este trabalho de Iniciação Científica (IC) aborda a utilização de conversores estáticos de energia para acionamento de um motor sem escovas. Os conversores estáticos são essenciais para garantir que a energia seja fornecida de forma controlada e eficiente aos motores, contribuindo para a melhoria do desempenho dinâmico e do rendimento energético do sistema. É realizada análise e simulação computacional deste motor utilizando o método Six-Step, o qual permite prever quais elementos comutadores (chaves semicondutoras) devem ser acionadas para o referido acionamento. Os motores sem escovas, também conhecidos como *Brushless DC motor* (BLDC), têm se destacado devido à sua eficiência e durabilidade em diversas aplicações, desde drones até veículos elétricos. Este artigo apresenta desde o princípio de funcionamento desses motores, também como suas características de acionamento e desempenho por meio de simulações computacionais.

PALAVRAS-CHAVE: Brushless; Conversores; Motor.

ABSTRACT

Static converters play a fundamental role in converting electrical energy for various applications, from photovoltaic power generation systems to electric motor drives. This undergraduate scientific research (IC) focuses on the use of static energy converters for driving a brushless motor. Static converters are essential to ensure that energy is supplied in a controlled and efficient manner to motors, contributing to the improvement of dynamic performance and energy efficiency of the system. Computational analysis and simulation of this motor are performed using the Six-Step method, which allows predicting which switching elements (semiconductor switches) should be activated for the mentioned drive. Brushless motors, also known as *Brushless DC motor* (BLDC), have gained prominence due to their efficiency and durability in various applications, from drones to electric vehicles. This article presents the operating principles of these motors, as well as their drive characteristics and performance through computer simulations.

KEYWORDS: Brushless; converters; Motor

INTRODUÇÃO

A eletricidade desempenha um papel central na sociedade atual, alimentando uma variedade de sistemas, como por exemplo o motor elétrico que converte energia elétrica em movimento mecânico. Essa mudança é importante em uma ampla gama de aplicações, desde motores de veículos elétricos que moldam o futuro da mobilidade até motores industriais que formam a base da produção em massa. Para utilização da energia elétrica em diversas aplicações é necessária a conversão entre

¹ Bolsista da Fundação Araucária. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, Paraná, Brasil. E-mail: rodrigomartinez@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: 4335750583474941.

² Docente no Curso de Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, Paraná, Brasil. E-mail: emerson@utfpr.edu.br. ID Lattes: 8681744957229767.



diferentes de fornecimento. Uma vez que a energia é convencionalmente distribuída na forma de corrente alternada e com frequência fixa, atualmente a grande maioria das aplicações faz uso de conversores estáticos de energia para adequar o padrão de fornecimento ao padrão de consumo, em muitos casos com tensão constante ou com frequência variável. Como exemplo, podemos considerar o uso de inversores em equipamentos de refrigeração mais modernos, que permite melhor qualidade de funcionamento ao mesmo tempo que reduz o consumo de acionamento. Inversores e conversores CC-CC também tem sido utilizados em diversos outros tipos de acionamento, desde geração de energia, acionamento de máquinas elétricas e fontes de alimentação de equipamentos eletro-eletrônicos. No caso de máquinas elétricas se destaca atualmente o motor brushless por diversas características, como alto torque, eficiência elevada e volume reduzido (BRIAN, 2018). Estes motores requerem um sistema de acionamento utilizando inversores e sistemas de controle digital.

Na sequência este artigo aborda uma discussão sobre conversores estáticos, motores brushless e a aplicação dos conversores para acionamento de motores. Uma simulação computacional é apresentada para ilustrar esta aplicação utilizando o método de controle Six-Step.

METODOLOGIA

Dispositivos eletro-eletrônicos geralmente são projetados para funcionar com valores bem determinados de corrente e tensão. Tais especificações estão relacionadas aos parâmetros dos componentes que formam o sistema de acionamento e com os requisitos da aplicação. Entretanto, nem sempre a energia fornecida está disponível nestas condições e é necessário adequar essas grandezas. Neste sentido percebe-se a importância dos conversores estáticos de energia, os quais podem ser utilizados para realizar estas adaptações para o funcionamento de sistemas eletro-eletrônicos. Dentre os conversores estáticos de energia se destacam:

- **Retificadores:** São utilizados para converter tensão de corrente alternada (CA) em corrente contínua (CC). Desta forma, estes conversores conseguem alimentar uma carga com tensão CC utilizando uma fonte CA. Os mesmos geralmente são utilizados em televisores, computadores, smartphones, eletrônica de consumo, entre outras diversas aplicações (MUHAMMAD, 2001).
- **Inversores:** Realizam o papel inverso ao retificador, convertendo tensão CC de entrada em tensão CA. Através deste tipo de conversor estático é possível controlar tanto a amplitude quanto a frequência da tensão de saída. Desta forma, os inversores podem ser utilizados para uma infinidade de aplicações, como, por exemplo, em painéis fotovoltaicos e controle de velocidade em motores (MUHAMMAD, 2001).
- **Conversor abaixador:** Este tipo de conversor é utilizado com o intuito de reduzir a tensão de saída em relação a tensão de entrada em corrente contínua (CC), como é o caso do conversor Buck. Como exemplo, o mesmo é empregado em fontes de alimentação de notebooks, convertendo uma tensão CC de 180V, proveniente da rede e um retificador, em uma saída de 12-24 V CC para carregamento de bateria (MUHAMMAD, 2001).
- **Conversor elevador:** Este tipo de conversor eleva a tensão de saída em relação a entrada em corrente contínua (CC), como o caso da topologia Boost. O mesmo é utilizado, por exemplo, em

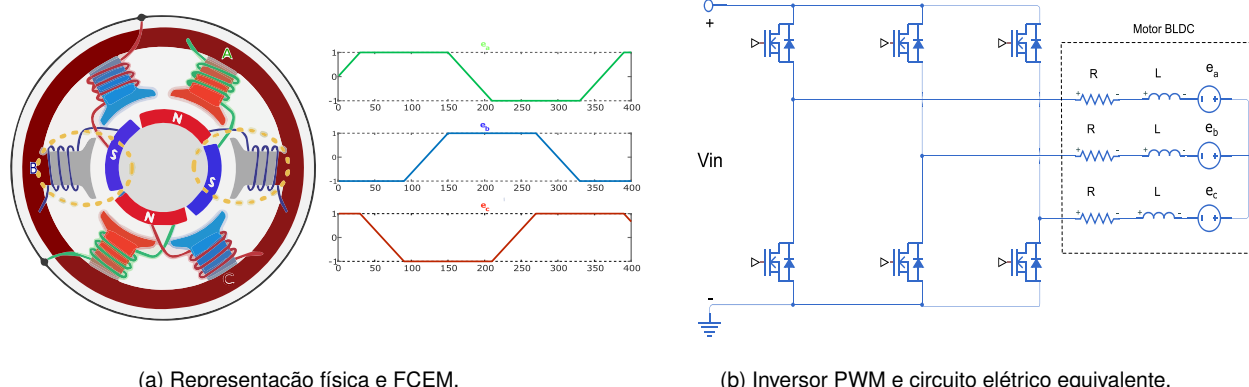
veículos elétricos para elevar a tensão da bateria aos níveis necessários para acionamento dos motores elétricos (MUHAMMAD, 2001).

Recentemente, os inversores tem ocupado um espaço significativo para acionamento de máquinas elétricos em diversos tipos de aplicações, como veículos elétricos e sistemas de refrigeração. Desta forma, na sequência é apresentada uma discussão sobre motores elétricos e a aplicação de inversores para seu acionamento.

Motor Brushless: Em 1698 foi desenvolvido por Thomas Savery o primeiro motor. Alimentado a vapor, sua principal função era remover líquidos dos poços das minas de carvão. Em 1765, James Watt melhorou esta invenção aumentando eficiência reduzindo custos e esta máquina foi a chave para a revolução industrial. Desde então, os motores tem sido de grande importância para a evolução da humanidade, e por este motivo grandes investimentos tem sido feitos neste campo. Com a facilitação ao acesso de energia elétrica, geração, linhas de transmissão, os motores tem evoluído, substituído os combustíveis fósseis pela energia elétrica como fonte de energia. Para adequar a energia de fornecimento aos parâmetros necessários de funcionamento das máquinas, tanto em Corrente Alternada(CA) quanto em Corrente Contínua (CC), são utilizados conversores estáticos. Motores a ímãs permanente são amplamente utilizados na indústria onde a variação de velocidade com torque constante e alto desempenho são requeridos. Entre os motores a ímãs permanentes destacam-se os motores sem escovas (Brushless DC) em virtude da sua baixa complexidade, custos reduzidos e alta eficiência. Entretanto, um dos problemas que este motor enfrenta são as altas vibrações e ruído elevado, devido ao seu conjugado (torque) ser pulsante. Como alternativa para reduzir tais problemas pode-se realizar o acionamento por inversores controlando seu conjugado.

Funcionamento do Motor Brushless: O motor brushless é constituído por um rotor feito de ímãs permanentes e um estator feito de bobinas. O movimento do rotor em relação ao estator é gerado quando ocorre repulsão e atração magnética de forma que o campo magnético gerado pelas bobinas no estator movimentam o rotor.

A figura 1a mostra a representação de um motor brushless. Quando a bobina 'A' for energizada será gerado um campo magnético de eixo Norte que vai atrair o polo Sul do rotor. Quando o rotor



(a) Representação física e FCEM.

(b) Inversor PWM e circuito elétrico equivalente.

Figura 1 – Representação do motor brushless.

Fonte: autoria Própria



de eixo sul alcançar a bobina 'A', a bobina 'B' será energizada, e depois a 'C', mantendo a rotação do rotor. Para obter mais torque é comum que duas bobinas sejam energizadas para que além da atração magnética seja gerada uma repulsão (ex.: polo Norte com polo Norte). A análise deste motor pode ser realizado considerando seu modelo matemático. Para representação deste modelo são utilizadas as variáveis e parâmetros do motor descritas na Tabela 1.

Tabela 1 – Variáveis e Parâmetros do motor

Variável/Parâmetro	Descrição
R	Resistência de fase do BLDC
$L - M$	Indutância equivalente por fase do BLDC
i_a	Corrente de fase do enrolamento a
i_b	Corrente de fase do enrolamento b
i_c	Corrente de fase do enrolamento c
B	Coefficiente de atrito viscoso do BLDC
J	Constante de inércia do BLDC
P	Número de pólos
ω_r	velocidade angular de rotação
ϕ_r	Ângulo mecânico do rotor
T_c	Conjugado eletromagnético do BLDC

Considerando tais definições, o circuito elétrico equivalente da Figura 1b, também como as leis mecânicas de rotação, pode-se escrever o seguinte modelo matemático (BARATIERI, 2011):

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ \omega_r \\ \phi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L-M} & 0 & 0 & -\frac{e_a(\phi_r)}{(L-M)\omega_r} & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L-M} & 0 & -\frac{e_b(\phi_r)}{(L-M)\omega_r} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R}{L-M} & -\frac{e_c(\phi_r)}{(L-M)\omega_r} & 0 \\ \frac{e_a(\phi_r)}{\omega_r} & \frac{e_b(\phi_r)}{\omega_r} & \frac{e_c(\phi_r)}{\omega_r} & \frac{B}{J} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R}{L-M} & \frac{P}{2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ \omega_r \\ \phi_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L-M} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L-M} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L-M} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{J} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_a(\phi_r) \\ e_b(\phi_r) \\ e_c(\phi_r) \\ T_c \end{bmatrix}. \quad (1)$$

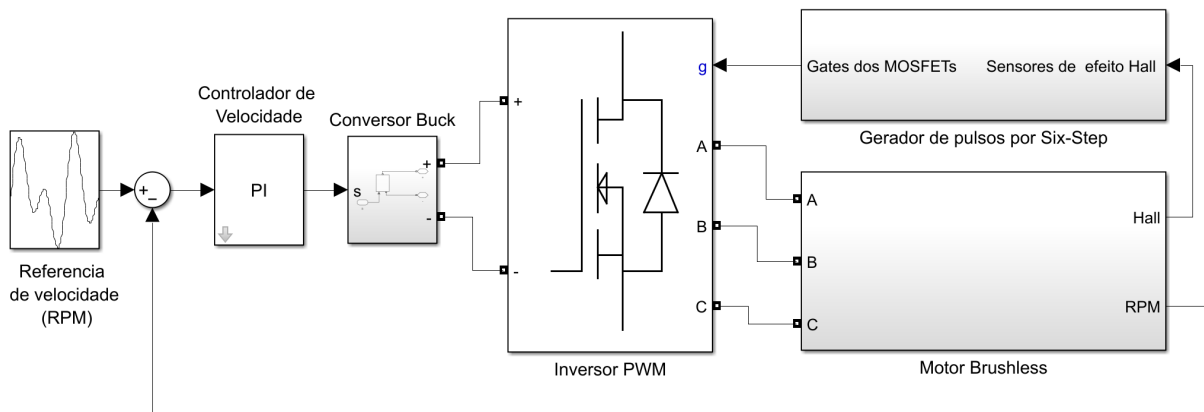
SIMULAÇÃO MOTOR BRUSHLESS

Para analisar o comportamento do motor brushless foram realizadas simulações computacionais considerando o acionamento do tipo six-step. Foi utilizado um conversor Buck para controlar o nível de tensão CC e os sinais PWM do inversor é definido pela estratégia six-step (vide Fig. 2). Para gerar os sinais PWM foram utilizadas 3 ondas senoidais defasadas de 120° entre si. Na sequência um circuito lógico é utilizado para gerar os sinais PWM complementares, dando origem a 3 outros sinais, de nível logico oposto aos sinais PWM originais. A estratégia six-step funciona como se fosse uma tabela verdade, considerando os sinais de efeito Hall para definir onde o rotor está e quais fases devem ser alimentadas. Esse tipo de estratégia de controle faz com que o campo magnético do estator e do rotor fiquem ortogonais entre si, dessa forma atingindo o torque eletromagnético máximo. A escolha de qual estado operar normalmente é realizada pela leitura de sensores Hall que indicam a posição do rotor. Após a leitura um enrolamento é alimentado com a fonte de entrada, enquanto em outro enrolamento é aplicado a referência dessa fonte, gerando uma corrente entre os dois enrolamentos, bem como um campo magnético no estator. O nome six-step deve-se ao

fato que existem apenas seis possíveis estados para o conjunto de chaves do inversor trifásico. A implementação do six-step segue o modelo proposto por (XIA,2012).

Para controle da velocidade do rotor é realizada uma comparação com a referência, dada em RPM, e caso a velocidade final esteja diferente da referência o controlador atua, alterando a tensão do barramento CC através de um conversor Buck. Como controlador automático do sistema de acionamento foi utilizada uma estratégia PI (Proporcional-Integral) com ganhos 0,015 e 16,5, respectivamente, que foram ajustados iterativamente.

Figura 2 – Acionamento Six-Step do Motor Brushless



RESULTADOS E DISCUSSÕES

A simulação deste sistema apresentou resultados com rápida resposta transitória e sobressinal reduzido (vide Fig. 3). Adicionalmente, quando ocorre aumento ou redução da referência (ω_{ref}), ou a carga é alterada (0 para 3 N·m em 0,1s), o torque (T_e) é ajustado rapidamente para regular a velocidade do motor à velocidade desejada. Para realizar esta alteração o sistema de controle altera o nível de tensão, resultando em correntes (i_a) proporcionais ao torque, seja para compensar a carga, para aumento ou redução da velocidade.

CONCLUSÕES

O sistema de acionamento com motor brushless, com controle automático de velocidade, demonstrou excelente capacidade em converter a energia elétrica em movimento, com respostas rápidas e precisas. Esta característica é especialmente interessante para aplicações como drones, veículos elétricos, entre outras.

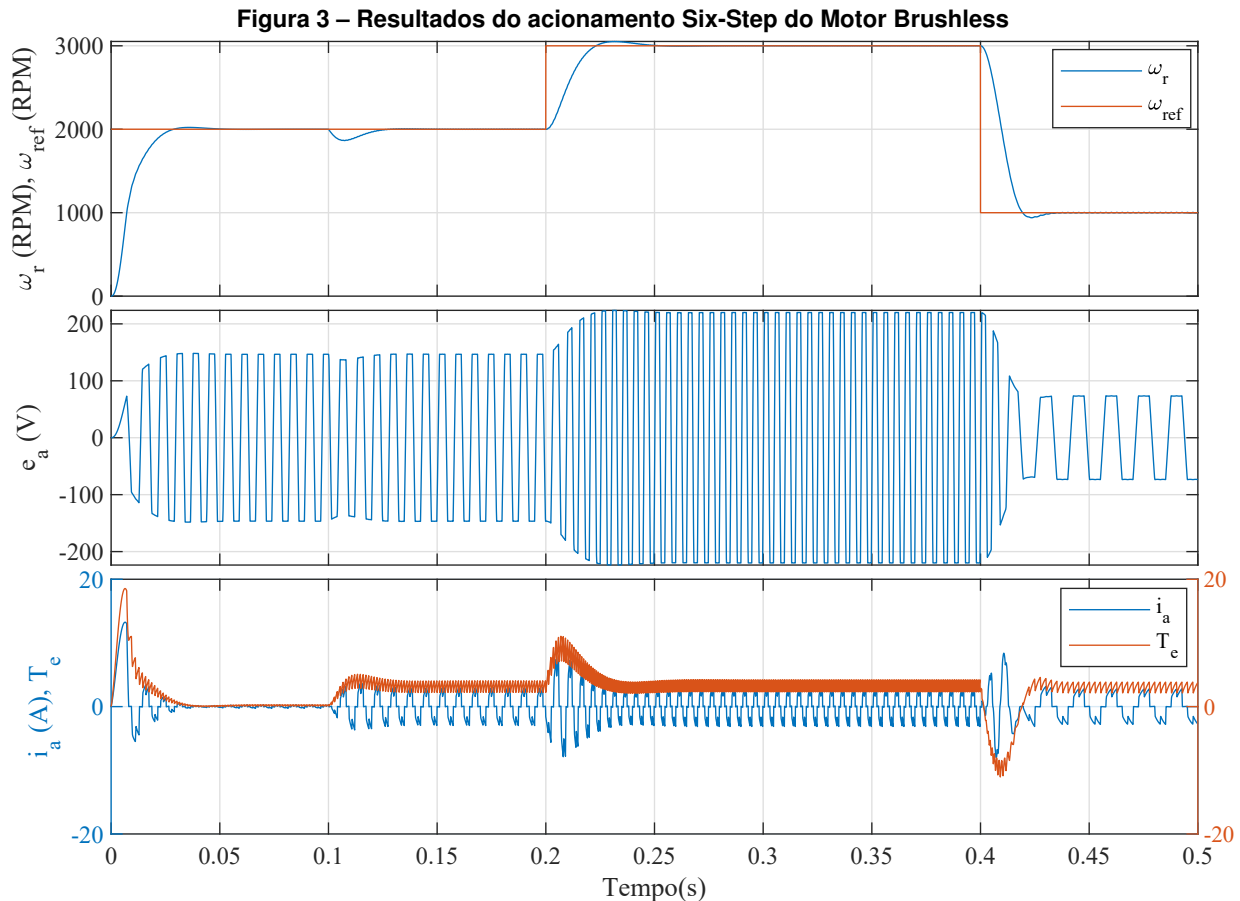
AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Fundação Araucária, pelo apoio financeiro através de bolsa de iniciação científica, e a Universidade Tecnológica Federal do Paraná, pela estrutura laboratorial, disponibilização de material de consumo e equipamentos.



CONFLITOS DE INTERESSE

Não há conflitos de interesse no desenvolvimento deste projeto.



REFERÊNCIAS

BARATIERI, C. L. Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2011.

XIA, C. L. Permanent Magnet Brushless DC Motor Drives and Controls. [S. l.: s. n.], 2012. ISBN 9781118188330. DOI: 10.1002/9781118188347.

XIA, K. et al. Model predictive control method of torque ripple reduction for BLDC Motor. IEEE Transactions on Magnetics, v. 56, n. 1, p. 1–6, 2020. ISSN 19410069. DOI: 10.1109/TMAG.2019.2950953.

MUHAMMAD H. RASHID. POWER ELECTRONICS HANDBOOK, 2001. University of West Florida. Disponível em biblioteca UTFPR.

BIAN, X. Li C.; ZHAO, G. The peak current control of permanent magnet brushless DC machine with asymmetric dual-three phases. [S.l.]: CES Transactions on Electrical Machines and Systems, vol. 2, 2018. 135 p