



Comparação de desempenho entre as técnicas de acionamento vetorial e de seis passos aplicado a motores síncronos de ímãs permanentes

Performance Comparison Between Vector Control and Six-Step Control Techniques Applied to Permanent Magnet Synchronous Motors

Felipe de Freitas Pastora¹, César Rafael Claire Torrico²

RESUMO

Neste estudo, são exploradas algumas das técnicas de controle comumente utilizadas para controle e acionamento de motores elétricos de ímãs permanentes. Realiza-se uma análise por meio de simulações (utilizando o software MATLAB) das estratégias de acionamento, controle e frenagem regenerativa, aplicadas a uma máquina síncrona trifásica projetada para aplicações em veículos elétricos compactos de alta eficiência. As técnicas de acionamento e controle incluídas na análise compreendem o acionamento seis passos em malha-fechada com controle de velocidade e o controle vetorial em malha-fechada com controle de velocidade. Será examinado o comportamento das tensões e correntes no estator da máquina elétrica, bem como a análise da velocidade de referência, análise do torque eletromagnético desenvolvido, além da potência ativa e potência eletromagnética gerada pela máquina elétrica. Essa avaliação abrange as duas técnicas de acionamento e controle aplicadas a uma máquina síncrona de ímãs permanentes (PMSM). **PALAVRAS-CHAVE:** controle vetorial; freio regenerativo; motor síncrono de ímã-permanente; comutação seis passos.

ABSTRACT

In this study, some commonly used control techniques for the operation and drive of permanent magnet electric motors are explored. An analysis is conducted through simulations (using MATLAB software) of drive, control, and regenerative braking strategies applied to a three-phase synchronous machine designed for high-efficiency compact electric vehicle applications. The included drive and control techniques encompass six-step drive in closed-loop with speed control and vector control in closed-loop with speed control. The behavior of voltages and currents in the electric machine's stator is examined, along with the analysis of reference speed, developed electromagnetic torque, as well as active and electromagnetic power generated by the electric machine. This assessment encompasses both drive and control techniques applied to a permanent magnet synchronous machine (PMSM).

KEYWORDS: vector control; regenerative braking; permanent magnet synchronous machine; six-steps commutation.

INTRODUÇÃO

A transição energética tem aumentado gradativamente, impulsionada pelas transformações climáticas que vêm se desenrolando ao longo do tempo. De acordo com o relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), a temperatura global experimentou um acréscimo de cerca de 1,1°C desde a época pré-industrial. Os níveis de dióxido de carbono (CO₂) e metano (CH₄) apresentaram um aumento de aproximadamente 47,3% e 157,8%, respectivamente. A pandemia de COVID-19 resultou em uma diminuição de aproximadamente 6% nas emissões globais de CO₂ provenientes da queima de combustíveis fósseis durante o ano de 2020, devido à redução na demanda global por energia (IEA, 2023).

As máquinas elétricas estão associados a uma economia ambientalmente mais

¹ Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, Paraná, Brasil. E-mail: felpas@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: 5905236184685103.

² Docente no Departamento Acadêmico de Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, Paraná, Brasil. E-mail: cesartorrico@utfpr.edu.br. ID Lattes: 2592799393618205.



limpa e desempenham um papel crucial na redução das emissões de poluentes. Motores elétricos oferecem uma diversidade abrangente de opções, incluindo diferentes sistemas de acionamento e recursos como a frenagem regenerativa, entre outras características. A frenagem regenerativa é um dos métodos mais eficazes de controle de desaceleração aplicadas em veículos elétricos. Além de uma grande confiabilidade, pela conservação de energia através da recuperação de parte da energia utilizada na frenagem que comumente é dissipada em calor, além contribuir para a redução de emissão de gases.

Este estudo terá como foco um motor síncrono de ímãs permanente (PMSM, sigla do inglês Permanent Magnet Synchronous Motor) e se concentrará na realização de uma análise comparativa entre acionamento controle vetorial e comutação seis passos.

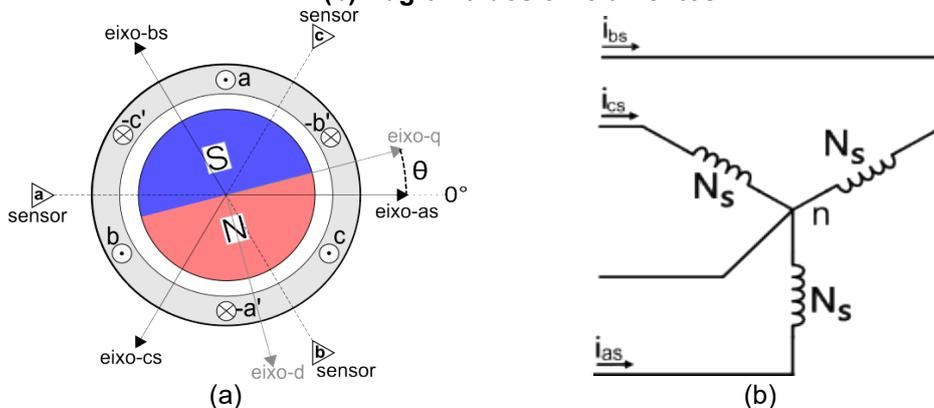
MÉTODOS

A metodologia para esse estudo envolve o estudo do PMSM, o acionamento por seis passos em malha-fechada, acionamento por meio de controle vetorial em malha-fechada, além do estudo sobre frenagem regenerativa.

MOTOR SÍNCRONO DE ÍMÃS PERMANENTES

Um PMSM elementar de dois pólos é mostrado na Figura 1. Na Figura 1(a) está representado a estrutura transversal simplificada. Na Figura 1(b) mostra os enrolamentos do estator $a-a'$, $b-b'$ e $c-c'$, que estão conectadas em estrela (KRAUSE, 2013).

Figura 1 — Motor síncrono de ímãs permanentes: (a) Estrutura Elementar do PMSM; (b) Diagrama dos enrolamentos



Fonte: Adaptado de Krause et al (2023).

Os eixos as , bs e cs representam os eixos da Força Magnetomotriz (FMM) gerada pela circulação de corrente elétrica nos enrolamentos do estator. Os três sensores (a , b e c), apresentados na Figura 1(a), são sensores de efeito Hall, estão no estator da máquina e determinam o posicionamento do rotor. Neste trabalho, o eixo- q e o eixo- d são adotados para representar os eixos de quadratura e direto, respectivamente. O ângulo θ é a medida angular entre o eixo de referência (0°) e o eixo- q do rotor.

ACIONAMENTO SEIS PASSOS E CONTROLE VETORIAL EM MALHA FECHADA

O seis passos é uma técnica de acionamento de PMSM. Nesta técnica, ocorre uma comutação sequencial das fases do motor, que é dividida em seis passos distintos para gerar um campo magnético giratório no estator. Esse campo magnético interage com o



XIII Seminário de Extensão e Inovação XXVIII Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR

Ciência e Tecnologia na era da Inteligência Artificial: Desdobramentos no Ensino Pesquisa e Extensão

20 a 23 de novembro de 2023 - Campus Ponta Grossa, PR



SEI-SICITE
2023

campo magnético existente no rotor para gerar torque para impulsionar o motor. Os sensores de efeito Hall, apresentados na Figura 1, detectam a posição do rotor e, ao combinar as leituras registradas, decompõe em 6 setores principais. A Tabela 1 apresenta a combinação de leitura dos sensores de efeito Hall.

Tabela 1 – Combinação dos sensores de efeito Hall

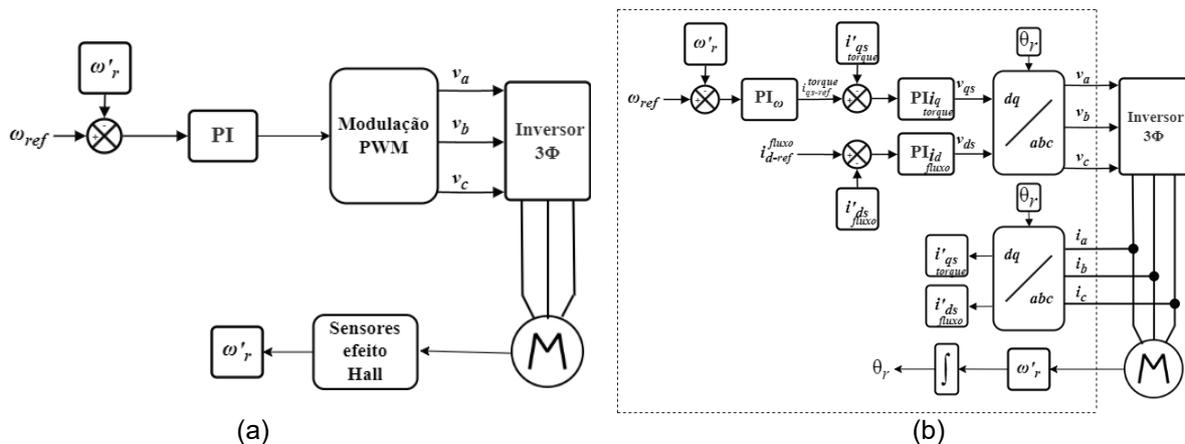
Setor	Hall A	Hall B	Hall C
1	0	1	0
2	0	1	1
3	0	0	1
4	1	0	1
5	1	0	0
6	1	1	0

Fonte: Autoria Própria (2023).

Na Figura 2 são apresentadas as técnicas de acionamento propostas, a Figura 2(a) apresenta a técnica seis passos, enquanto que a Figura 2(b) mostra o controle vetorial.

A estrutura acionamento seis passos, Figura 2(a), os sensores de efeito Hall são utilizados para leitura de posição do rotor, além estimar sua velocidade. Um controlador do tipo *PI* (Proporcional e Integral) gera uma ação de controle a fim de corrigir o erro gerado pela diferença de velocidade de referência, ω_r^{ref} , em relação à de saída ω_r .

Figura 2 — Malha de Controle: (a) seis passos (b) controle vetorial.



Fonte: Autoria Própria (2023).

O diagrama de controle vetorial, Figura 2(b), mostra três controladores do tipo *PI*, responsáveis pela dinâmica de controle para levar o sistema ao valor de referência e por eliminar o erro em regime permanente.

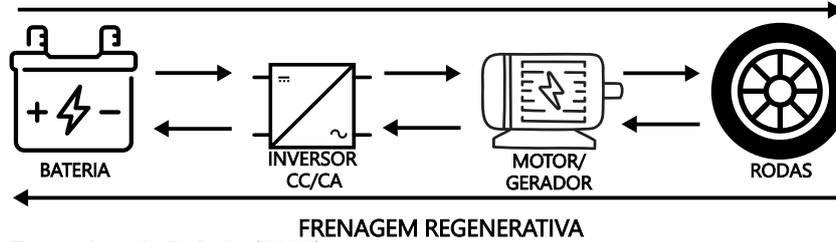
FRENAGEM REGENERATIVA

O freio regenerativo, Figura 3, é um sistema que recupera uma parte da energia cinética produzida durante a desaceleração do veículo e é transformada em energia química para carregar as baterias de um veículo elétrico. Na Figura 3, é ilustrado o sentido do fluxo de corrente e potência num veículo elétrico (GAO, 1999).

Quando o torque necessário para movimentar o veículo é menor do que o torque eletromagnético gerado pelo motor, o carro se desloca por meio da propulsão. Por outro lado, quando o torque necessário para movimentar o veículo supera o torque eletromagnético, a máquina passa a atuar como gerador.



Figura 3 — Dinâmica de uma máquina elétrica motor/gerador.
PROPULSÃO



Fonte: Autoria Própria (2023).

RESULTADOS

Os parâmetros do PMSM estão listados na Tabela 2. O sistema proposto foi simulado no MATLAB. Os resultados das simulações que demonstram a dinâmica do Torque de Carga (T_L) e Torque Eletromagnético (T_E), bem como o comportamento da tensão e corrente ao longo do tempo, são apresentados nas Figuras 4 e 5. As simulações foram realizadas para o acionamento seis passos em malha-fechada e controle vetorial.

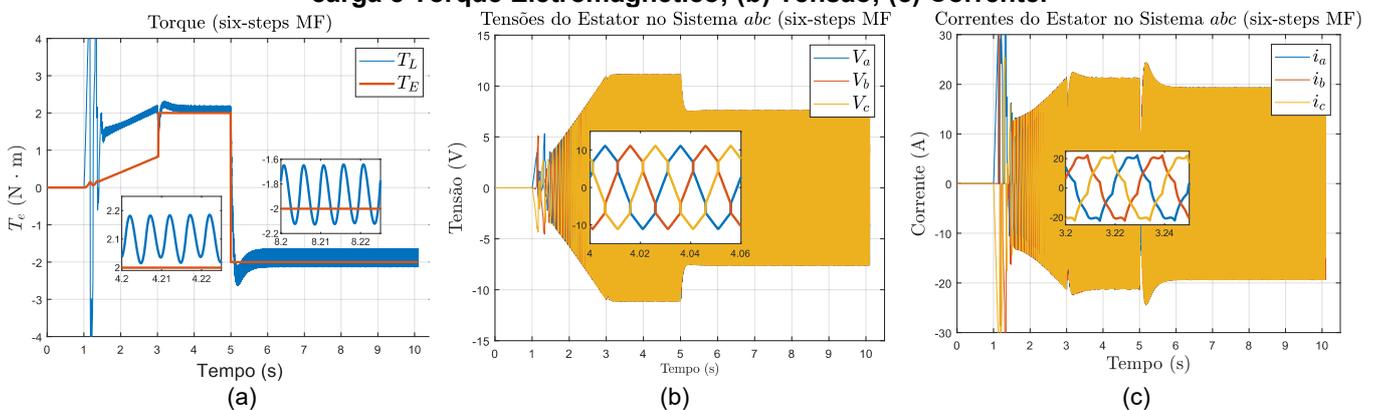
Tabela 2 – Parâmetros do motor

Parâmetro	Valor
Número de Pólos (P)	4
Tensão	12 [V]
Inércia do rotor (J)	0.025 [Kg m^2]
Atrito do motor (D)	0.001 [N.s/m]
Resistência enrolamento estator (r_s)	0.085 [Ω]
Fluxo gerado pelo rotor (λ_m)	0.041 [Wb]

Fonte: Autoria própria (2023).

Nas Figuras 4(a) e 5(a), são apresentados os perfis de T_L e os resultados de T_E . Para os dois modelos, observa-se uma rampa de aceleração nos primeiros segundos para suavizar as correntes durante a fase inicial de partida. Entre 3 e 5 segundos, é aplicada uma carga de 2N.m, momento em que a máquina opera como um motor. E a partir de 5 segundos, o perfil do torque de carga assume um valor negativo (-2 N.m).

Figura 4 — Resultados de simulação para seis passos em malha-fechada: (a) Torque de carga e Torque Eletromagnético; (b) Tensão; (c) Corrente.

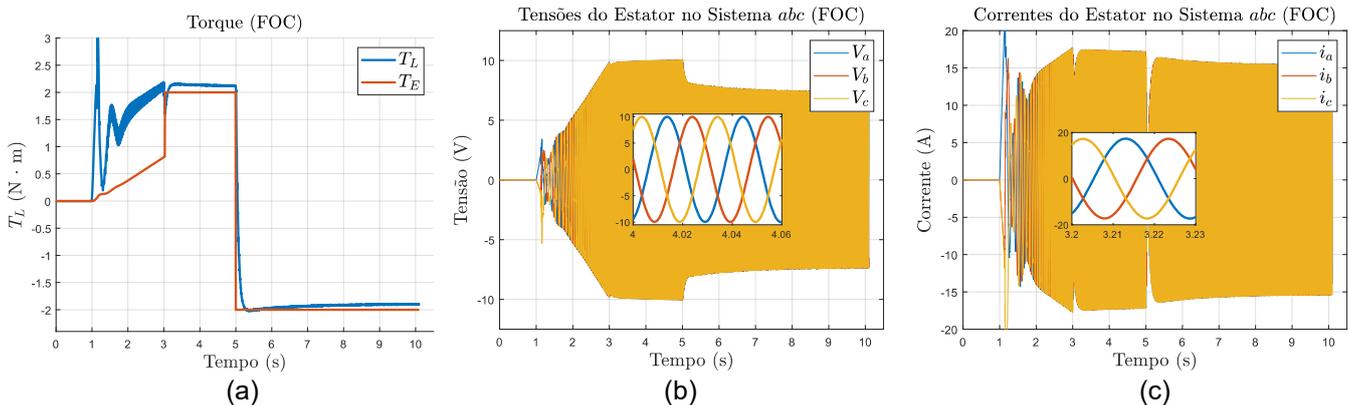


Fonte: Autoria própria (2023)



O perfil do Torque Eletromagnético, T_E , para o acionamento seis passos em malha-fechada, possui *ripple* devido a comutação de tensão e correntes que são dadas por setores fixos. O perfil de tensão e corrente também mostram as seis distintas etapas da comutação seis passos (CHUANG, 2009).

Figura 5 — Resultados de simulação para Controle Vetorial em malha-fechada: (a) Torque de carga e Torque Eletromagnético; (b) Tensão; (c) Corrente.

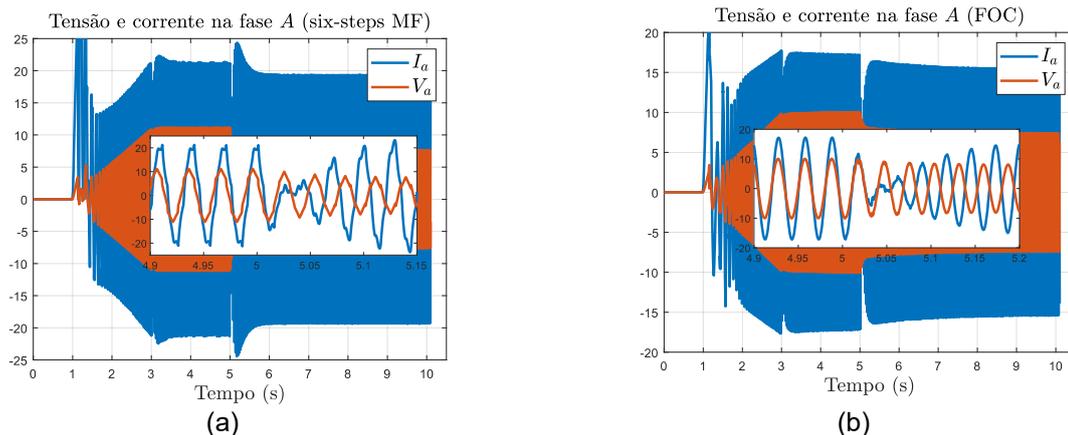


Fonte: Autoria própria (2023).

Na Figura 6(a), são exibidas as sobreposições dos sinais de tensão e corrente nos enrolamentos do estator na fase-A, estão representados os sinais para o acionamento seis passos em malha-fechada, e na Figura 6(b) retrata o comportamento dos sinais a técnica de controle vetorial em malha-fechada.

Até 5 segundos, os sinais mantêm-se em fase, mas quando T_L assume um valor negativo, ocorre um breve período transitório. Após isso, a mudança de fase dos sinais de tensão e corrente tornam-se evidentes. A máquina elétrica, que até então era usada como meio de propulsão do veículo (trabalhando como motor) passa a operar como gerador.

Figura 6 — Sinais de tensão e corrente: (a) seis passos em malha-fechada; (b) Controle vetorial.



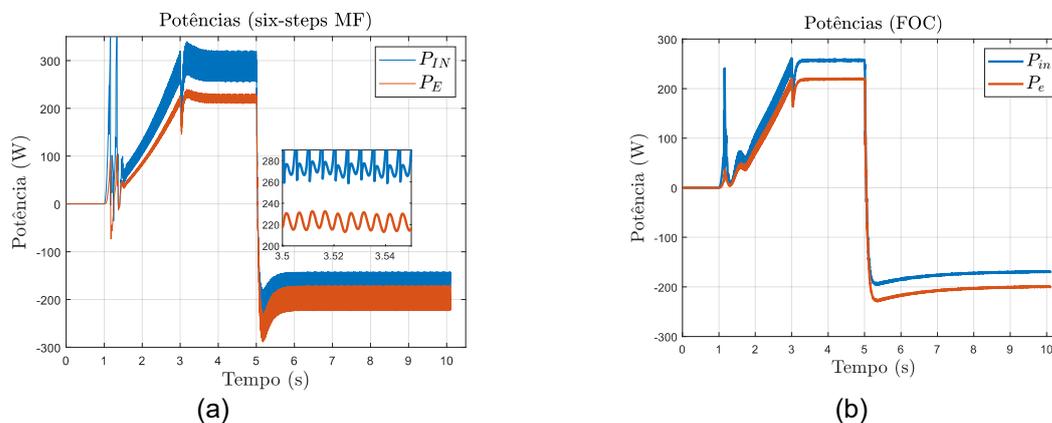
Fonte: Autoria própria (2023).

Na Figura 7, são exibidas as Potências Ativas (P_{IN}), consumida pelo motor, bem como as Potências Eletromagnéticas (P_E) que são geradas pela máquina. As potências associadas ao acionamento de seis passos apresenta *ripple*, assim como acontece com o torque eletromagnético mostrado na Figura 4. A divergência entre P_{IN} e P_E , é predominantemente causada pelo atrito dinâmico associado à máquina. Na prática, essas



diferenças seriam ainda maiores devido às perdas por histerese e correntes parasitas que estão presentes no motor (CHU, 2015).

Figura 7 — Potências Ativas e Eletromagnéticas do sistema: (a) seis passos em malha-fechada; (b) Controle vetorial.



Fonte: Autoria própria (2023).

Agradecimentos

Os autores expressam sua gratidão à Universidade Tecnológica Federal do Paraná e ao Conselho Nacional de Pesquisas pelo apoio e pelas oportunidades proporcionadas.

Conflito de interesse

Não há conflito de interesse.

REFERÊNCIAS

CHU, L.; LI, G. -I, QIAN, Z; YIN, W. -X; **Analysis of eddy current loss on permanent magnets in PMSM with fractional slot.**, 2015 IEEE 10th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)

CHUANG, H.S.; KE, Y. -L; CHUANG, Y.C. **Analysis of commutation torque ripple using different PWM modes in BLDC motors.** 2009. Conference Record 2009 IEEE Industrial & Commercial Power Systems Technical Conference

GAO, Y., CHEN, L., & EHSANI, M. (1999). **Investigation of the Effectiveness of Regenerative Braking for EV and HEV.** *SAE Transactions*, 108, 3184–3190.

IEA – International Energy Agency. **Greenhouse Gas Emissions from Energy Data Explorer.** 2021, Paris. Disponível em: <<https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/greenhouse-gas-emissions-from-energy-data-explorer>>. Acesso em Abr/2023.

IPCC. **Global Warming of 1.5°C.** [S.I.]: Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 616 pp., doi:10.1017/9781009157940

KRAUSE, Paul; WASYNCZUK, Oleg; SUDHOFF, Scott D; PEKAREK, Steven. "Permanent-Magnet AC Machines", **Analysis of Electric Machinery and Drive Systems.**