



Frenagem Regenerativa Aplicada em Motores Brushless DC Utilizados em Veículos Elétricos⁽¹⁾.

Jacson Rodrigo Dreher⁽²⁾; Arthur da Rosa⁽³⁾.

⁽¹⁾ Trabalho executado com recursos do Edital Universal de Pesquisa Nº 12/2013/PROPII, da Pró-Reitoria de Pesquisa, Pós-Graduação e Inovação.

⁽²⁾ Professor e coordenador do curso de Engenharia de Controle e Automação; Instituto Federal de Santa Catarina; Chapecó, Santa Catarina; jacson@ifsc.edu.br;

⁽³⁾ Acadêmico do curso de Engenharia de Controle e Automação; Instituto Federal de Santa Catarina; Chapecó, Santa Catarina; ahr_r@hotmail.com.

RESUMO: Motores Brushless DC são largamente utilizados em veículos elétricos. Um dos principais motivos relacionados a esta escolha deve-se a grande eficiência energética dos Brushless, o que garante elevada autonomia aos sistemas de veículos elétricos. Entretanto aponta-se que o processo de frenagem de veículos em geral dissipa grande quantidade de energia, que no caso dos veículos elétricos pode ser devolvida para as baterias do sistema, melhorando em até 15% a autonomia do veículo. Frenagem regenerativa consiste em utilizar a energia cinética do veículo durante o processo de frenagem para operar o motor Brushless DC como um gerador de energia elétrica e fazer com que esta retorne às baterias. Nesse contexto é apresentado um estudo sobre técnicas de frenagem regenerativa aplicadas em motores Brushless DC assim como resultados de simulações e experimentais realizados em laboratório, os quais mostram ser possível regenerar energia durante o processo de frenagem de veículos elétricos.

Palavra Chave: Frenagem Regenerativa, Motor Brushless DC, Veículo Elétrico.

I. I. INTRODUÇÃO

A utilização de veículos elétricos tem recebido grande atenção no meio tecnológico como uma alternativa aos tradicionais veículos movidos por motores de combustão interna. Os atuais conceitos econômicos e ambientais discutidos em relação ao consumo de combustíveis fósseis não renováveis são os principais fatores que contribuem para fomentar o desenvolvimento de pesquisas e os avanços tecnológicos no uso de veículos elétricos (CODY *et al.*, 2009).

Motores síncronos de ímãs permanentes (MSIP) são largamente utilizados em veículos elétricos devido às características de eficiência. Tais motores apresentam elevada densidade de potência, elevado rendimento, reduzida manutenção, alta confiabilidade, baixo nível de ruídos, desenvolvimento de modelos compactos e em formatos distintos (SIQUEIRA; ANDRADE, 2008).

A principal característica dos MSIP é não possuírem comutador mecânico, assim, não possuem escovas como os tradicionais motores de corrente contínua (CC). Segundo Siqueira e Andrade (2008), esta característica permite a redução do aquecimento e da inércia do motor,

aumentando a velocidade de rotação, diminuindo as perdas e a manutenção.

Os MSIP são subdivididos em Brushless AC (BLAC) e Brushless DC (BLDC). Motores BLAC são alimentados por correntes senoidais e induzem força contra eletromotriz também senoidal. Motores BLDC são alimentados por correntes em forma de onda quadrada e induzem força contra eletromotriz trapezoidal. Quanto ao enrolamento de armadura, a grande maioria dos MSIP possui enrolamentos trifásicos (TRINDADE, 2009).

Diferente dos motores BLAC, que operam segundo o princípio dos campos girantes e não necessitam de controle direto do posicionamento do rotor, os BLDC operam segundo o princípio de comutação eletrônica, onde sensores detectam o posicionamento do rotor e realimentam um circuito eletrônico conversor que realiza a comutação da corrente entre as fases (TRINDADE, 2009).

Motores BLDC são largamente adotados em veículos elétricos devido à simplicidade de controle de velocidade que oferecem. Utilizando a técnica de controle PWM (Pulse Width Modulation) é possível controlar a velocidade de operação do motor de forma simples. Além desta característica, Chen *et al.* (2011) apontam que motores BLDC apresentam menor custo e tamanho, sendo estas duas considerações as mais importantes em um projeto de veículo elétrico.

Durante o processo de frenagem de veículos tracionados por BLDC, a energia cinética do veículo aplica energia mecânica no eixo do motor, forçando este a entrar no modo de geração. Utilizando-se uma estratégia de controle adequada é possível redirecionar a energia gerada no BLDC para as baterias, recarregando as mesmas.

Esta técnica é conhecida como frenagem regenerativa e, segundo Cody *et al.* (2009), veículos elétricos com frenagem regenerativa possuem uma autonomia 15% maior quando comparados a veículos elétricos que não utilizam esta técnica.

Segundo Cody *et al.* (2009), frenagem regenerativa é:

O redirecionamento da energia gerada no motor para as baterias durante o processo de frenagem, quando a inércia do veículo força o motor a entrar no modo gerador. Neste modo, as baterias são vistas como uma carga pela máquina geradora, assim proporcionando uma força de frenagem ao veículo (CODY *et al.*, 2009, p. 1).

É comum em veículos elétricos combinar o freio mecânico com a frenagem regenerativa por questões de segurança (CODY *et al.*, 2009).

Neste contexto o presente trabalho contempla o estudo de uma estratégia de frenagem regenerativa e controle de operação e velocidade dos motores BLDC utilizados em veículos elétricos, assim como a simulação do sistema através de software e a implementação de um controlador eletrônico objetivando a extração de resultados experimentais em laboratório.

II. METODOLOGIA

A metodologia utilizada no presente trabalho consistiu inicialmente na revisão bibliográfica de artigos sobre veículos elétricos, motores BLDC e frenagem regenerativa. Através destes foi selecionado o método de frenagem mais simples e de maior eficiência para ser implementado. Para finalizar o estudo foram realizadas simulações através de software e testes experimentais em laboratório com a finalidade de validar o método de frenagem selecionado na etapa anterior.

Motor Brushless DC

O funcionamento do motor BLDC pode ser entendido a partir do princípio de alinhamento dos campos magnéticos. Através da Figura 1 observa-se que o estator é formado pelo enrolamento de fases enquanto o rotor é formado por ímãs permanentes.

Os ímãs permanentes estabelecem o campo magnético principal da máquina enquanto as correntes aplicadas nas bobinas do estator criam fluxos magnéticos que reagem com os dos ímãs prementes no sentido de alinhá-los, assim resultando em um conjugado eletromecânico (SIQUEIRA; ANDRADE, 2008).

No momento do alinhamento dos campos magnéticos ocorre a comutação eletrônica das fases através do circuito eletrônico de controle, este recebe informações de sensores hall presentes, internamente, no motor. O circuito de chaveamento trata-se de uma ponte inversora trifásica conforme apresentado na Figura 2.

Através das estratégias de chaveamento propostas por Cody *et al.* (2009) foram realizadas simulações e testes experimentais no intuito de verificar a sequência de chaveamento do motor BLDC em ambos os sentidos de rotação. O motor utilizado apresenta as características da Figura 3. A Figura 4 apresenta a estratégia de chaveamento aplicada para o motor operar no sentido normal. A Figura 5, por sua vez, apresenta a estratégia de chaveamento aplicada para o motor operar no sentido reverso.

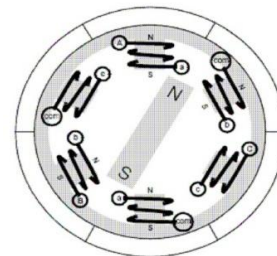


Figura 1 – Motor BLDC Simplificado. Fonte (CODY *et al.*, 2009)

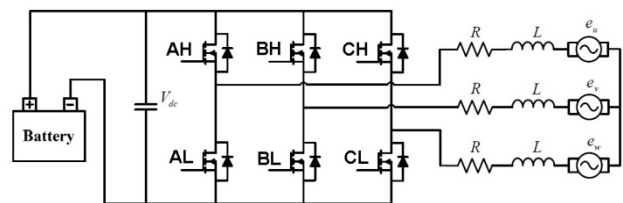


Figura 2 – Ponte Inversora Trifásica e Modelo Elétrico do BLDC (CHEN *et al.*, 2011)

Potência	600 W
Rotação (Máx)	250 RPM
Tensão Nominal	36V
Indutância (Fase)	502 μ H
Resistência (Fase)	52.1 m Ω
Vpk	178V/Krpm

Figura 3 – Característica Motor BLDC

Passo	Chave PWM	Chave On	Hall 1	Hall 2	Hall 3
1	CH	BL	1	0	1
2	CH	AL	1	0	0
3	BH	AL	1	1	0
4	BH	CL	0	1	0
5	AH	CL	0	1	1
6	AH	BL	0	0	1

Figura 4 – Estratégia de Chaveamento Normal

Passo	Chave PWM	Chave On	Hall 1	Hall 2	Hall 3
1	BH	CL	1	0	1
2	BH	AL	0	0	1
3	CH	AL	0	1	1
4	CH	BL	0	1	0
5	AH	BL	1	1	0
6	AH	CL	1	0	0

Figura 5 – Estratégia de Chaveamento Reversa

Frenagem regenerativa

A frenagem regenerativa é atingida através da inversão do sentido da corrente de armadura, fazendo-a fluir no sentido motor-bateria, durante o processo de frenagem do veículo. Em muitos casos a tensão induzida na armadura não possui uma amplitude suficiente para realizar a inversão, assim necessita ser elevada. Nesse sentido muitos fabricantes de veículos elétricos adicionam conversores buck-boost ao sistema de potência. Entretanto essa prática não beneficia o projeto, uma vez que adiciona maior número de componentes ao sistema tornando-o mais caro e de maior tamanho (CHEN *et al.*, 2011).

Segundo Chen *et al.* (2011), é possível realizar o processo de frenagem regenerativa sem adicionar componentes ao sistema de potência. Utilizando uma estratégia de chaveamento adequada é possível operar a ponte inversora (Figura 2) de controle segundo o princípio do conversor boost durante o processo de frenagem.

Para Chen *et al.* (2011) o método que oferece melhor desempenho quanto à quantidade de energia regenerada é o de frenagem regenerativa com uma chave, e será empregado neste trabalho.

Este método consiste em aplicar sinal PWM em uma chave da ponte inversora a cada passo de operação do motor durante o processo de frenagem. As chaves utilizadas neste método são as chaves baixas, representas pelo sufixo “L” na figura 2, enquanto as chaves altas, representadas pelo sufixo “H”, permanecem sempre desligadas. A chave selecionada a cada passo segue o padrão do gráfico apresentado na Figura 6.

A Figura 7 mostra o caminho da corrente elétrica durante o primeiro passo de operação. A linha sólida (vermelha) representa o caminho da

corrente no período em que a chave encontra-se fechada, ou seja, o PWM em nível alto. Nesse momento o objetivo é armazenar energia no indutor, onde este se trata das próprias bobinas de armadura. As linhas tracejadas (azuis) representam o caminho da corrente elétrica no período em que a chave encontra-se desligada, ou seja, PWM em nível baixo. Quando a chave é aberta, a corrente que estava circulando pelo indutor é direcionada a bateria, através de um dos diodos das chaves superiores da ponte inversora. Quanto maior a razão cíclica, maior a corrente e maior o torque de frenagem no veículo.

Simulações e testes experimentais foram realizados com o objetivo de verificar o desempenho do método de frenagem regenerativa com uma chave aplicado em um motor as características da Figura 3. A estratégia de chaveamento encontrada é apresentada na Figura 8. Os resultados serão apresentados e discutidos na próxima sessão.

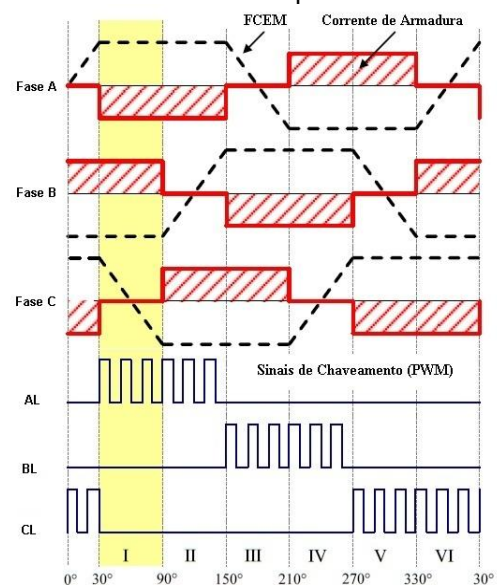


Figura 6 – Chaveamento para Frenagem Regenerativa (CHEN *et al.*, 2011)

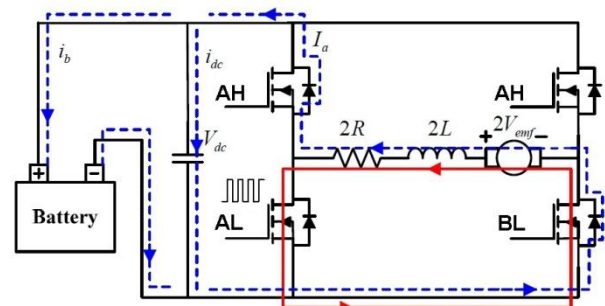


Figura 7 – Corrente de Frenagem Regenerativa (CHEN *et al.*, 2011)

Passo	Chave PWM	Chave On	Hall 1	Hall 2	Hall 3
1	CL	Nenhuma	1	0	1
2	CL	Nenhuma	1	0	0
3	BL	Nenhuma	1	1	0
4	BL	Nenhuma	0	1	0
5	AL	Nenhuma	0	1	1
6	AL	Nenhuma	0	0	1

Figura 8 – Estratégia de Frenagem Regenerativa

III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos são apresentados no gráfico da Figura 9. O eixo horizontal do gráfico relaciona os valores da razão cíclica do PWM, enquanto o eixo vertical relaciona a corrente elétrica de retorno para a bateria. A Figura 10 apresenta a banca de testes onde foram obtidos os resultados experimentais e a placa de controle.

Os resultados apontam que quanto maior a velocidade de operação do veículo elétrico maior a corrente regenerada. Isso ocorre porque o valor da tensão gerada pelo motor depende da velocidade. A tensão gerada é representada no modelo do motor pela fonte de tensão interna (Figura 2), e depende do parâmetro V_{pk} , apresentado na Figura 3.

O valor da razão cíclica implica diretamente no valor de corrente regenerada, pois tem relação direta com o valor de tensão aplicada a bateria. Quanto maior a razão cíclica do PWM, maior é o valor de tensão aplicada a bateria e conseqüentemente maior a corrente de carga da mesma, como mostrado na Figura 7.

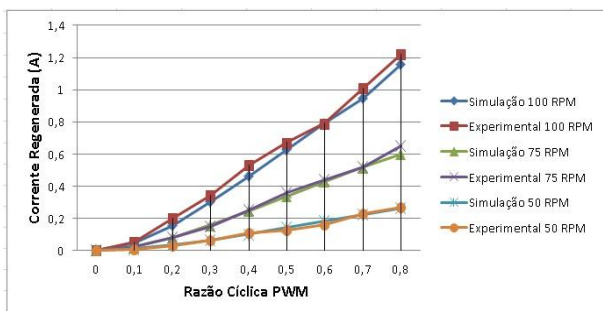


Figura 9 – Resultados Simulados e Experimentais



Figura 10 – Bancada de Testes Experimentais

IV. CONCLUSÕES

O estudo realizado reafirma a escolha dos motores Brushless DC em aplicações de tração de veículos elétricos. Dentre estes se enquadram bicicletas, scooters, motos e carros. Utilizando as estratégias de chaveamento apresentadas é possível operar o motor em dois sentidos (normal e reverso) tornando notável a aplicação destes em cadeiras de rodas elétricas.

Através dos resultados de simulação e experimentais comprova-se a operação do método de frenagem regenerativa, o qual pode tornar os sistemas de tração com motores Brushless DC mais eficientes, fomentando as atuais discussões sobre a utilização de veículos elétricos como uma alternativa aos veículos tracionados por motores à combustão.

Como sugestão para trabalhos futuros aponta-se o levantamento do modelo matemático do sistema de frenagem regenerativa, possibilitando a implementação de um controle de frenagem com alto nível de eficiência e segurança. Também se sugere a aplicação do sistema desenvolvido em um protótipo de veículo elétrico.

AGRADECIMENTOS

Os pesquisadores que realizaram este trabalho agradecem a Pró-Reitoria de Pesquisa, Pós-Graduação e Inovação pela elaboração e manutenção do programa previsto no Edital Universal no IFSC.

REFERÊNCIAS

CHEN, C. *et al.* Regenerative Braking Control For Light Electric Vehicles. **IEEE Ninth International Conference on Power Electronics and Drive Systems (IEEE - PEDS 2011)**. Singapura, 2011. p. 631 - 636.

CODY, J. *et al.* Regenerative Braking in a Electric Vehicle. Disponível em: <http://www.komel.katowice.pl/ZRODLA/FULL/81/ref_20.pdf>. Acesso em 9 mai. 2013.

SIQUEIRA, D. S.; ANDRADE, D. A. 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, R. H. **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.