



PROJETO DE UM CONVERSOR HALF-BRIDGE ASSIMÉTRICO DE BAIXO CUSTO COM PROTEÇÃO CONTRA CURTO-CIRCUITO E SOBRECORRENTE PARA O ACIONAMENTO DE UM MRV

Matheus Fernandes Valadares*¹, Eduardo Sylvestre² e Geyverson Teixeira de Paula¹

¹UFG – Universidade Federal de Goiás

²UFTM – Universidade Federal do Triângulo Mineiro

Resumo – As Máquinas de Relutância Variável (MRV) (SRM - Switched Reluctance Machines) são amplamente conhecidas por sua simplicidade de estator e rotor o que resulta em uma máquina de baixo custo de produção. Entretanto, essas máquinas apresentam um complexo controle e conversor de potência o que as levam a ter um baixo uso na indústria. Por outro lado, com o crescimento da mobilidade elétrica, também conhecida como “a eletrificação dos meios de transporte” ao redor do mundo, as MRVs são apontadas por vários pesquisadores e empresas como uma das máquinas mais adequadas para realizar a produção e comercialização de veículos elétricos de baixo custo em países em desenvolvimento. Quando se trata do uso dessas máquinas em laboratórios, visando o desenvolvimento de pesquisa e estudos práticos, o conversor de potência geralmente é mais caro que a própria máquina. Dessa forma, este artigo propõe uma metodologia de projeto de um hardware aberto, de baixo custo e com um conversor CA-CC escalonável em corrente com proteção contra sobrecorrente e curto-circuito visando a construção de um barramento CC para ser acoplado a um conversor Half-Bridge para o acionamento de uma SRM.

Palavras-Chave – Conversor Half-bridge Assimétrico; Conversor de Potência; Proteção contra Curto-Circuito; Motor de Relutância Variável.

Abstract - The Switched Reluctance Machines (SRM) are widely known by their stator and rotor simplicity which results in a low-cost production machine. However, these machines present a complexity control and power converter which lead them to a low usage in the industry. On the other hand, with the increase of electric mobility, a.k.a., the freight electrification, around the world, the SRM is pointed out by numerous researchers and companies as one of the most suitable machines to achieve a low-cost electric vehicle production and commercialization in developing countries. When it comes to the usage of these machines in laboratories, aiming research development and practical studies, the power converter is usually more expensive than the machine itself. This way, this paper proposes a design

methodology for an open-hardware, low-cost and current scalable AC-DC converter with over-current and short-circuit protection aiming the DC-Link construction to be linked with a SRM half-bridge converter.

Keywords – Asymmetric Half Bridge, Power Converter, Short-circuit protection, Switched Reluctance Machine.

I. INTRODUÇÃO

As máquinas elétricas têm ocupado cada vez mais espaços em aplicações industriais e residenciais desde o seu advento e grande progresso no final da década de 1880. O emprego das máquinas elétricas como solução de eficiência tem ganhado mais força nos últimos anos graças ao crescimento de uma ampla variedade de aplicações envolvendo mobilidade elétrica que surge a partir da demanda por soluções menos poluentes e com baixa emissão de gases tóxicos. Dentre os modelos de máquinas elétricas o motor de relutância variável (MRV) é uma opção de alto custo-benefício entre os motores elétricos. Sua estrutura simples e robusta, que consiste em um estator e um rotor com polos salientes, e a dispensabilidade do uso de ímãs permanentes e enrolamentos no rotor, o tornam uma máquina de baixo custo de produção uma vez que, materiais magnéticos de terras raras utilizados na fabricação de ímãs permanentes são escassos e possuem um alto valor de produção e, conseqüentemente, aquisição [1-2]. Estas características somadas a sua alta eficiência e performance, fazem do MRV uma opção atrativa para aplicações em veículos elétricos [2 - 5].

Por outro lado, o MRV apresenta elevado ruído acústico, oscilação de torque eletromagnético que é dependente da corrente nos enrolamentos do estator [6] e um complexo mecanismo de controle, uma vez que a geração do torque depende da posição dos polos do rotor.

Adicionalmente, o conversor empregado para o acionamento de um MRV é usualmente um conversor CA-CC alimentando um conversor Half-bridge Assimétrico (AHB - *Asymmetric Half-Bridge converter*). No que diz respeito ao barramento CC, é uma etapa desafiadora do projeto uma vez que é preciso levar em conta uma proteção de sobrecorrente, uma proteção contra curto-circuito e uma proteção contra

*mfvaladares.ef@gmail.com

surto de tensão do lado da máquina que pode retornar pelos diodos de roda livre do AHB e danificar o barramento CC.

Desta forma, este trabalho tem como objetivo desenvolver um conversor CA-CC Half-Bridge Assimétrico (HBA) para o acionamento do MRV, com duas propostas de proteção contra curto-circuito e sobrecorrente levando em conta a proteção contra surto de tensão.

II. OPERAÇÃO DO MRV E O CONVERSOR HALF-BRIDGE ASSIMÉTRICO

O funcionamento do MRV depende da variação da indutância de cada fase (polos do estator diametralmente opostos) com a posição instantânea do rotor [7]. Quando as fases são energizadas, os polos do rotor mais próximos alinham-se a elas, gerando o torque.

A tensão nas fases do motor pode ser descrita da forma:

$$v = R \cdot i + L(\theta, i) \cdot \frac{\partial i}{\partial t} + e \quad (1)$$

Onde:

- v - Tensão de fase.
- R - Resistência interna.
- i - Intensidade da corrente.
- L - Indutância própria.
- e - Força contra eletromotriz.

O primeiro termo do lado direito da equação (1) está associado a queda de tensão nos enrolamentos do estator, o segundo termo representa a queda de tensão devido ao efeito indutivo da fase e o último termo representa a força contra eletromotriz, que é descrita em função da taxa de variação da indutância em função da posição dos polos do rotor multiplicada a intensidade da corrente na fase e a velocidade angular do rotor (ω). Expressa da seguinte forma:

$$e = i \cdot \omega \cdot \frac{\partial L(\theta, i)}{\partial \theta} \quad (2)$$

Para o acionamento do MRV, geralmente é utilizado o conversor *half-bridge* assimétrico, mostrado na Figura 1.a.

O conversor HB, apresenta quatro componentes semicondutores por fase, e em seu ciclo de funcionamento apresenta duas etapas, representando os períodos de motorização, Figura 1.b e desmagnetização da máquina, Figura 1.c.

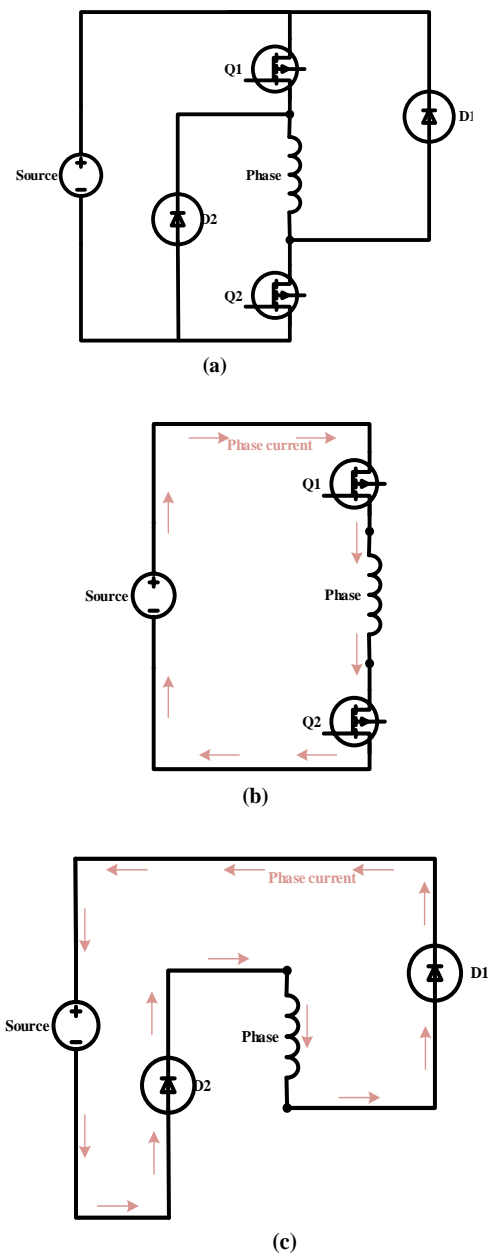
Em seu funcionamento, a etapa de motorização ocorre quando as chaves Q1 e Q2 entram em condução fechando o circuito entre a fonte CC e a bobina da fase. Os diodos D1 e D2 estão reversamente polarizados e não entram em condução. A corrente de fase começa a subir, sendo limitada pela resistência interna e indutância de fase. O campo magnético da máquina cresce, o que força o rotor a deslocar para a região de menor relutância.

Quando os polos de rotor e estator se alinham, as chaves Q1 e Q2 deixam de conduzir, retirando a fonte CC do circuito. Como ocorreu armazenamento de energia nos enrolamentos da fase, esta energia necessita ser dissipada, e isso acontece

por meio da etapa de desmagnetização ou roda livre. Agora a bobina de fase desempenha o papel de fonte, os diodos D1 e D2 estão diretamente polarizados, entram em condução, e a energia armazenada na bobina de fase é enviada de volta para a fonte CC. Note que ocorre a inversão no sentido da corrente na fonte nesta etapa, invertendo do fluxo e energia.

Por Q1 e Q2 estarem em série com o enrolamento de fase na etapa de motorização, eles devem suportar a corrente nominal da máquina, e sua frequência de chaveamento dependerá da velocidade operacional. Como são componentes importantes, sujeitos a bruscas oscilações de tensão e altas correntes instantâneas, um sistema para protegê-los contra falhas é bem-vindo.

Figura 1: (a) HBA para uma fase qualquer; (b) etapa de motorização; (c) etapa de desmagnetização.

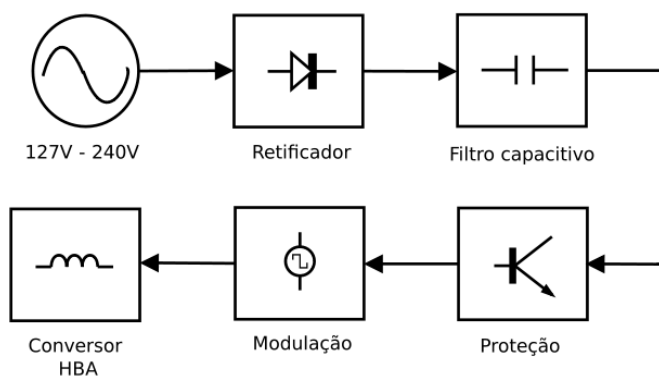


III. PROJETO DO CONVERSOR DE POTÊNCIA: PROTEÇÃO CONTRA CURTO-CIRCUITO E SOBRECORRENTE

A visão geral da topologia do conversor proposto está ilustrada na Figura 2 em forma de diagrama de blocos.

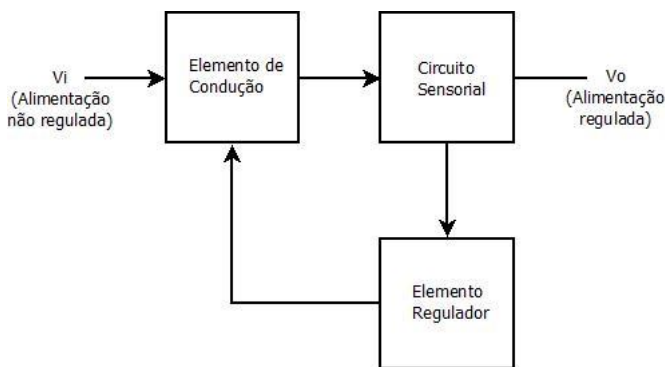
Na topologia proposta, a alimentação principal passa primeiro por um retificador de onda completa com um filtro capacitivo com um *fator de ripple* de 1%. Em seguida, está aplicado o circuito de proteção contra curto-circuito e sobrecorrente. Após a etapa de proteção, a tensão de entrada passa por um circuito de modulação que entrega a tensão desejada para o acionamento do MRV.

Figura 2: Diagrama de blocos da topologia do conversor de energia.



O circuito de proteção contra curto-circuito e sobrecorrente proposto, é um regulador de tensão e corrente em série [8-9], e sua topologia está ilustrada na Figura 3.

Figura 3: Diagrama de blocos da topologia do circuito de proteção.



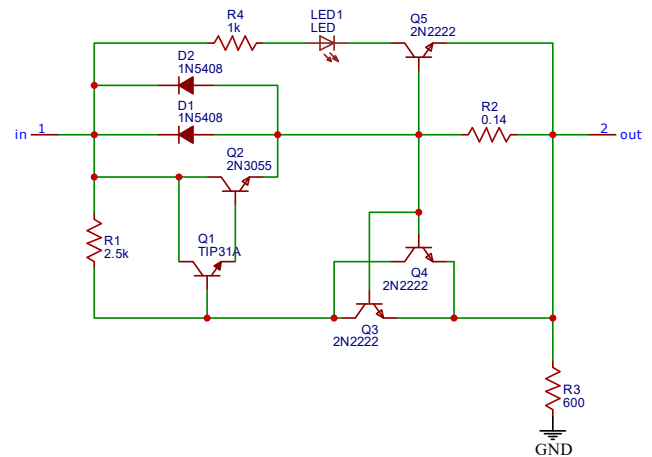
Para fazer o sensoriamento da corrente fornecida ao AHB e garantir a proteção de corrente foram considerados dois métodos de sensoriamento: resistor sensor (resistor *shunt*) e sensor hall de corrente.

Com o objetivo de projetar um conversor de potência com corrente variável, o circuito de proteção com resistor sensor foi, a princípio, projetado em módulos para limitar a corrente em 5A. Assim, conectando mais módulos em paralelo, o usuário pode obter um conversor de potência com corrente

mais alta de acordo com o número de módulos conectados em paralelo.

A Figura 4 apresenta o circuito da proposta de sensoriamento com resistor sensor.

Figura 4: Circuito da proposta de controle de corrente com resistor sensor.



Na topologia apresentada na Figura 4, os transistores Q1 e Q2, combinados na configuração *Darlington*, compõem o elemento de condução. À direita, o resistor R2 (0,14 Ohms) é o resistor sensor (resistor *shunt*). Quando a corrente que passa por R2 atinge o valor máximo projetado (5A), a queda de tensão sobre ele polarizará Q3 e Q4, combinados em paralelo, que constituem o elemento regulador. Uma vez polarizado, o elemento regulador passará a absorver parte da corrente que iria para o elemento de condução, limitando assim a corrente na carga.

A parte superior do circuito da Figura 4, foi adicionada com o intuito de ser uma indicação visual de que o módulo está entregando 5A à carga (corrente máxima), i.e., operando no seu limite de corrente e a proteção contra curto-circuito e sobre corrente foi acionada. Quando o elemento regulador é polarizado, Q5 também polarizará, fazendo com que o LED acenda.

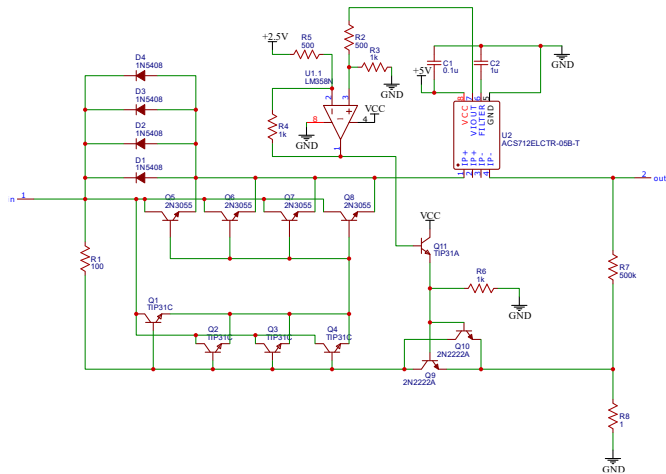
Já, no que diz respeito ao circuito de proteção contra surto de tensão, este é composto pelos diodos D1 e D2 colocados em antiparalelo (*free-wheeling*) para a descarga ou regeneração de energia do conversor AHB para o barramento CC.

Apesar de não ilustrado, no barramento CC há além do filtro capacitivo, um circuito de balanceamento de carga e tensão entre os capacitores que auxiliam na proteção do barramento e também na dissipação de energia quando da ocorrência do surto de tensão ou regeneração do conversor AHB.

A configuração do circuito de proteção com sensor hall, é relativamente mais complexa quando comparada com a configuração com o resistor sensor. Dessa forma, a modulação desta proposta se torna mais difícil. Então, a proteção com sensor hall foi projetada para uma corrente de carga de 50A e um resistor equivalente se faz necessário para garantir a polarização dos transistores do elemento de regulação.

O circuito proposto com sensoriamento por meio de sensor hall é mostrado na Figura 5.

Figura 5: Circuito da proposta de controle de corrente com sensor hall.



Nesta topologia, os transistores Q1-Q8 arranjados na configuração *Darlington* compõem o elemento de condução, tal como na topologia anterior. Como essa proposta foi projetada para suportar uma corrente de 50A, uma quantidade maior de transistores foi associada em paralelo para que a corrente total seja dividida entre eles.

O circuito sensorial apresenta um arranjo mais complexo quando comparado com a proposta anterior. O sensor hall empregado, possui uma sensibilidade intrínseca k , e a tensão de saída V_o é dada pelo produto da corrente de saída i_o com a sensibilidade, acrescido de 2,5V.

$$V_o = 2,5V + k \cdot i_o \quad (3)$$

Na saída do sensor hall, está empregado um Amplificador Operacional na configuração diferencial e em seguida um transistor na configuração coletor comum, ou seguidor de emissor, para amplificar a corrente que chega na base do elemento regulador que é composto pelos transistores Q9 e Q10.

À direita, o resistor R7 está aplicado para garantir a polarização do elemento regulador quando a corrente de carga atingir 50A.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados deste trabalho, foram obtidos por meio de simulações computacionais uma vez que, devido à situação pandêmica não foi possível ter acesso ao laboratório para que fossem realizados ensaios no sistema proposto e aquisição de dados experimentais.

A Figura 6 mostra a curva V-I e P-I do conversor CA-CC utilizando a proposta de proteção com resistor sensor (resistor shunt), tendo 10 módulos de 5 A ligados em paralelo, possibilitando assim uma corrente de até 50 A no MRV.

Já a Figura 7 mostra a curva V-I e P-I do conversor utilizando a proposta de proteção com o sensoriamento realizado pelo sensor hall.

Observa-se pelo comportamento das curvas V-I que a topologia com resistor sensor apresenta um melhor desempenho quando comparada com a topologia com sensor hall, uma vez que os valores de tensão, antes e depois da proteção, são bem próximos para valores de corrente mais baixos na proposta com o resistor sensor, ao passo que, na topologia com sensor hall, há uma diferença de quase 100V para todos os valores de corrente.

Nota-se ainda que, como consequência da proximidade da tensão antes e depois da proteção na topologia com resistor sensor, há menos potência dissipada pelo sistema de proteção, tornando-o mais eficiente do que a topologia com sensor hall. Vale lembrar que, com relação à limitação de corrente, ambas as propostas são eficazes.

Figura 6: Curva V-I e potência dissipada na configuração em paralelo.

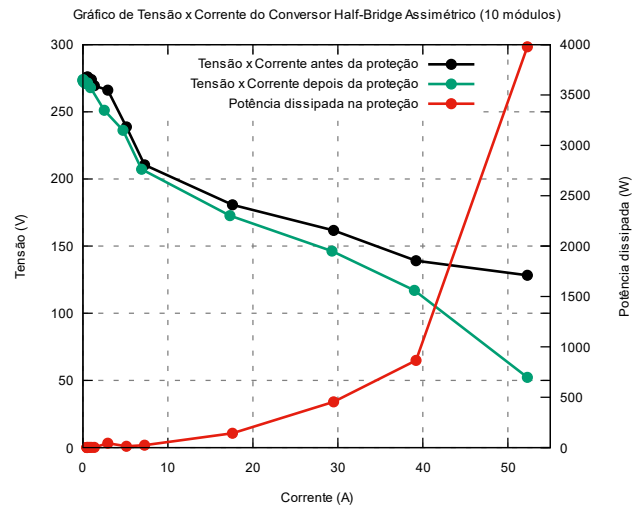
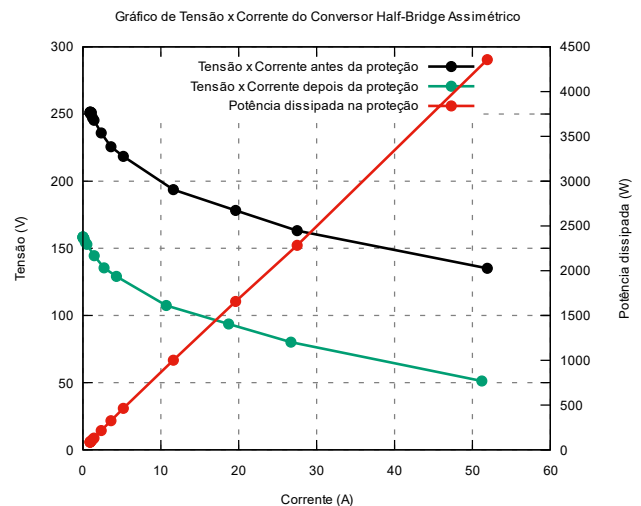


Figura 7: Curva V-I e potência dissipada na configuração com sensor hall.



A Figura 8 apresenta as curvas V-I para diferentes números de módulos da proposta com resistor sensor acoplados em paralelo, mostrando o comportamento da proteção e da variação da corrente conforme os módulos são adicionados.

Já a Figura 9 ilustra a comparação das curvas V-I do conversor de potência, utilizando as topologias propostas para a proteção contra curto-circuito e sobrecorrente, e sem a utilização de nenhum tipo de proteção. Observa-se pelo comportamento das curvas que a topologia da proteção em paralelo possui uma melhor performance e pode lidar facilmente com sobrecorrente e curto-circuito com maior potência transferida, próximo a potência transferida sem nenhum tipo de proteção.

Figura 8: Curva V-I para diferentes números de módulos em paralelo.

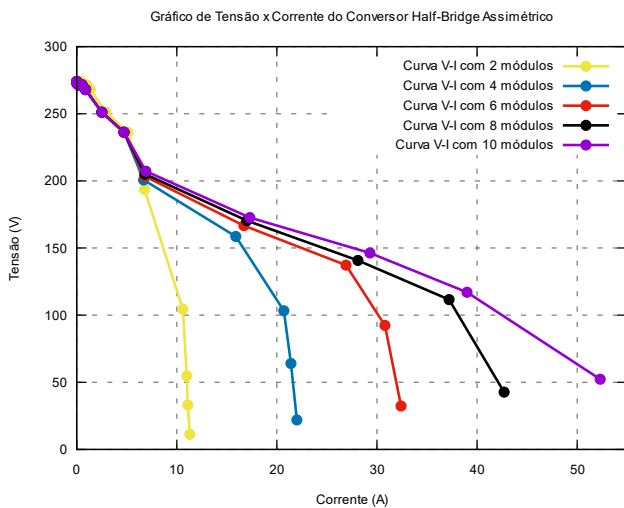
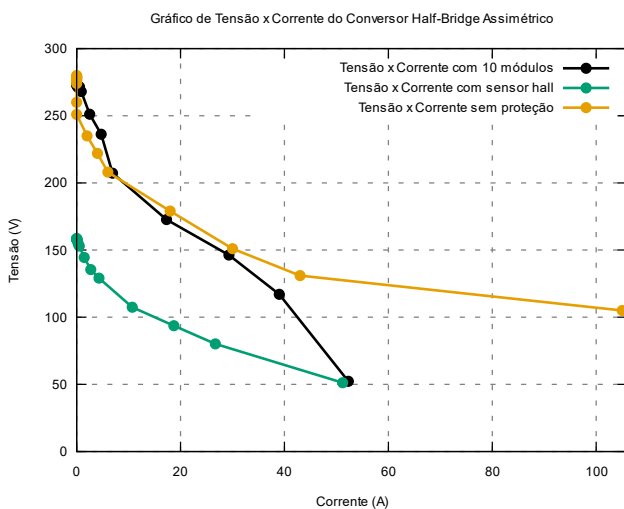


Figura 9: Curva V-I comparando as topologias empregadas (paralelo e hall) e sem proteção.



V. CONCLUSÕES

Este trabalho propôs e descreveu um conversor CA-CC com proteções contra curto-circuito, sobrecorrente e surto de tensão no barramento CC.

Conforme foi discutido ao longo do texto, o conversor CA-CC proposto é capaz de lidar com sobrecorrente e curto-circuito no barramento CC graças ao seu circuito de ajuste de tensão e monitoramento e controle da corrente de barramento. Destaca-se aqui, que esta proteção é feita diretamente em hardware, tornando o projeto mais robusto e confiável.

Adicionalmente, o conversor proposto é projetado de forma escalável, i.e., mais módulos idênticos podem ser fabricados e instalados em paralelo (*stack*) para aumentar a potência nominal do barramento CC. Esta característica inerente do projeto garante a construção de um conversor de baixo custo, escalável em corrente (e em custo), versátil e de alto custo-benefício quando comparado às soluções comerciais.

Por último, mas não menos importante, o projeto do conversor é open-hardware e disponível no GitHub sob a licença MIT: <https://github.com/geyversontp/AHB>.

REFERÊNCIAS

- [1] Lawrenson, P. J., et al. "Variable-speed switched reluctance motors." IEE Proceedings B (Electric Power Applications). Vol. 127. No. 4. IET Digital Library, 1980.
- [2] Yang, Zhi, et al. "Comparative study of interior permanent magnet, induction, and switched reluctance motor drives for EV and HEV applications." IEEE Transactions on Transportation Electrification 1.3 (2015): 245-254.
- [3] Rahman, Khwaja M., et al. "Advantages of switched reluctance motor applications to EV and HEV: Design and control issues." IEEE transactions on industry applications 36.1 (2000): 111-121.
- [4] Hu, Yihua, et al. "Split converter-fed SRM drive for flexible charging in EV/HEV applications." IEEE Transactions on Industrial Electronics 62.10 (2015): 6085-6095.
- [5] Mir, Sayeed. "Classification of SRM converter topologies for automotive applications." SAE transactions (2000): 54-62.
- [6] Ye, Jin, Haoding Li, and James Weisheng Jiang. "Control of Switched Reluctance Machines." Switched Reluctance Motor Drives: Fundamentals to Applications (2019): 425.
- [7] Bernardeli, Victor Regis, et al. "Switched reluctance machine modeling including core magnetic saturation-the self-excited operation mode." IECON 2012-38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. IEEE, 2012.
- [8] BOYLESTAD, Robert L. "Electronic devices and circuit theory". 2013.
- [9] SEDRA, Adel S. et al. "Microelectronic circuits". New York: Oxford University Press, 1998.