



Acionamento para motor de tração de um protótipo de veículo elétrico de alta eficiência energética

Traction motor drive for an energy efficient electric vehicles prototype

Letícia Balbinotti

leticiabalbinotti@alunos.utfpr.edu.br

Eduardo dos Santos Junior

edujun@alunos.utfpr.edu.br

Everton Trento Junior

evertonjunior@alunos.utfpr.edu.br

Diogo Ribeiro Vargas

diogovargas@utfpr.edu.br

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, PR, Brasil

RESUMO

Apesar dos primeiros veículos elétricos serem de 1899, apenas em 1997 houve o primeiro sucesso comercial desse tipo de veículo. Parte disso devido ao amadurecimento de tecnologias, como o advento da eletrônica de potência (na década de 1960) e a intensificação de pesquisas em acionamento e controle de motores elétricos. Parte pelos, ainda, altos custos de baterias e a baixa capacidade de armazenamento de energia, ou seja, baixa densidade energética. Esse cenário vem mudando anualmente, com novas tecnologias e empresas no ramo. Este artigo apresenta parte do desenvolvimento de um protótipo de veículo elétrico, desenvolvido pela equipe Tubarão Branco da UTFPR câmpus Pato Branco. Sendo focado no inversor trifásico para o acionamento de um motor, do tipo corrente contínua sem escovas, para a tração do protótipo. Em um primeiro momento é detalhado o funcionamento e as características do motor e em seguida o desenvolvimento da estratégia para acionamento desse. São apresentados resultados experimentais de ensaios com carga realizados em laboratório, avaliando principalmente a eficiência desse acionamento.

PALAVRAS-CHAVE: Eficiência Energética. Inversor trifásico. Motor elétrico. Veículo Elétrico.

ABSTRACT

Although the first electric vehicles were from 1899, it was only in 1997 that there was the first commercial success. Part of this is due to the technology maturation, such as power electronics in the 1960s and electric motors driving and controlling research. Partly because of the high battery costs and low energy storage capacity (low energy density). This scenario has been changing annually, with new technologies and new companies. This paper presents part of the development of an electric vehicle prototype, developed by the Tubarão Branco team at UTFPR Pato Branco campus. Being focused on the three-phase inverter designed to drive the prototype traction motor, a brushless direct current motor. The motor characteristics and the proposed driving strategy are shown. Experimental results are presented, evaluating the efficiency of the three-phase inverter.

KEYWORDS: Energy Efficiency. Electric motor. Electric vehicle. Three-phase inverter.



INTRODUÇÃO

Os veículos elétricos (*electric vehicles*, EV), do tipo totalmente elétricos ou híbridos, têm recebido destaque na indústria e na academia. O primeiro EV data de 1899 tendo baixa autonomia o que limitava seu alcance e seu uso fora dos grandes centros urbanos. Com o advento da eletrônica de potência (*power electronics*) na década de 1960 intensificaram-se as pesquisas em acionamento e controle de motores elétricos, porém a baixa capacidade de armazenamento de energia (baixa densidade energética) e o alto custos das baterias não permitiram aos EV serem competitivos com os veículos com motor de combustão interna. Sendo o Toyota Prius, um EV híbrido lançado em 1997, considerado o primeiro veículo comercial de sucesso econômico [De Santiago, 2012].

Atualmente é possível encontrar vários veículos elétricos comerciais rodando nas estradas. No ano de 2020 a empresa americana Tesla, fabricou 499.600 carros, e a alemã Volkswagen 421.600 unidades, considerando totalmente elétricos e híbridos [ZSW, 2021]. O número de veículos movidos totalmente a eletricidade vem crescendo continuamente no mercado, sendo que o total de EV no mundo foi 1.398.050 (em 2015), 2.155.410 (em 2016), 3.408.670 (em 2017), 5.606.490 (em 2018), 7.860.690 (em 2019) e 10.907.150 (em 2020) [ZSW, 2021].

No Brasil, no âmbito de regulamentação estatal, a lei 13.755/2018 institui o Programa Rota 2030, tendo como objetivo apoiar o desenvolvimento tecnológico, a inovação, a proteção ao meio ambiente, a eficiência energética de automóveis, caminhões e ônibus [Brasil, 2018]. Na sociedade, no âmbito industrial, temos a empresa brasileira Voltz Motors, originária de Recife-PE, que produz e comercializa motos elétricas desde novembro de 2019 [Prado, 2020]. Em 2021 aconteceram dois lançamentos de caminhões elétricos produzidos no Brasil. A multinacional Volkswagen lançou o modelo e-Delivery, projetado, desenvolvido e produzido na cidade de Resende-RJ, esse modelo utiliza um motor elétrico da fabricante nacional WEG [CESAR, 2021]. E a empresa Agrale de Caxias do Sul-RS relançou a marca FNM para caminhões elétricos para serviços urbanos, utilizando motores da empresa europeia Danfoss [Rodriguez, 2021].

Esse artigo é fruto do projeto de extensão “Engenharia de veículos elétricos de alta eficiência energética e inovação tecnológica” que se propõe a desenvolver soluções de engenharia aplicadas a veículos elétricos eficientes. Sendo o objetivo final o desenvolvimento de um protótipo de EV com consumo de energia reduzido, permitindo uma maior autonomia e/ou um aumento no intervalo de tempo entre cada recarga. O consumo de energia dos veículos elétricos está diretamente relacionado ao peso total do conjunto, à eficiência do motor, do conjunto de controle e acionamentos, e de todo sistema mecânico utilizado. Sendo necessárias ações em diversas áreas do conhecimento, por exemplo, Engenharia Eletrônica, Engenharia Elétrica, Engenharia Mecânica, Engenharia de Materiais e Engenharia de Computação. Por esse motivo esse projeto é multidisciplinar, transdisciplinar e pode englobar diversos cursos de graduação e pós-graduação. Dos cursos ofertados no câmpus Pato Branco podemos destacar engenharia elétrica, engenharia mecânica, engenharia de computação, engenharia civil e química.

Atualmente a equipe executora do projeto é formada por 29 alunos de diferentes cursos de graduação, três professores doutores e um técnico administrativo (TA). A equipe está dividida em três células principais: elétrica, mecânica e gestão. Os alunos têm suas atividades geridas pelo capitão de cada célula. Algumas dessas células podem estar subdivididas em equipes menores como: Powertrain; Direção e Frenagem; Carenagem; Gestão; Marketing e Financeiro; Acionamento; e IHM.

Como uma maneira de validar os protótipos desenvolvidos e realizar a integração com a comunidade, esse projeto de extensão participa de competições universitárias. Nessas competições os alunos têm a oportunidade de interagir com a indústria, meios de comunicação que fazem a cobertura dos eventos,

comunidade local (visita de escolas) e equipes de outras universidades. Além de ter seu projeto avaliado por uma equipe técnica. Nos anos de 2018 e 2019 a equipe participou presencialmente da competição Shell Eco-marathon. No ano de 2020 a equipe participou da versão virtual dessa competição, a primeira atividade realizada foi a proposta “Pitch the Future” que focava em resoluções de problemas reais de energia em diferentes contextos. O problema desenvolvido pela equipe foi o carregamento de baterias de carros elétricos. A ideia do desafio era planejar uma viagem utilizando um carro elétrico saindo do Pão de Açúcar da cidade do Rio de Janeiro/RJ até a CN Tower em Toronto, Canadá. Além disso, outra etapa foi o “Virtual Check Inspection”, que foi uma inspeção virtual dos protótipos desenvolvidos pelas diferentes equipes, realizado para agilizar uma futura competição presencial.

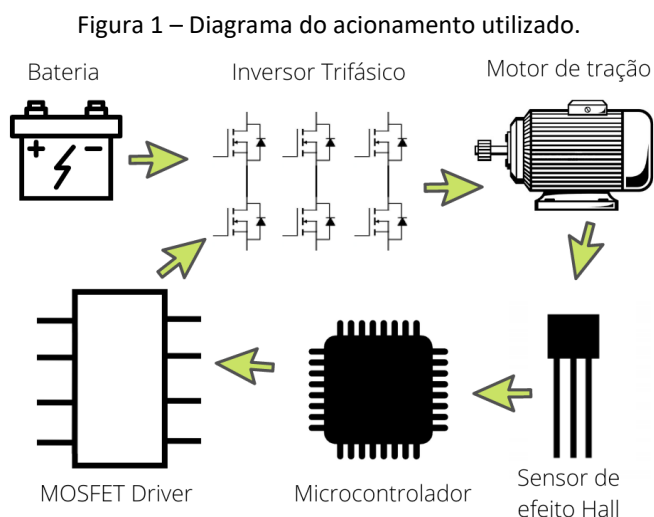
Esse artigo será focado no desenvolvimento do acionamento do motor de tração do protótipo, ou seja, na estratégia de acionamento, no projeto do inversor trifásico e na validação desse acionamento.

MATERIAIS E MÉTODOS

Diversos tipos de motores elétricos têm sido apontados como candidatos para tração de EV. Motores de tração devem apresentar robustez sobre alta temperatura, larga faixa de velocidade de operação, alta eficiência e alta densidade de potência [Bilgin, 2019]. Os motores síncronos de ímã permanente (*permanent magnet synchronous motors*, PMSMs) são largamente utilizados em aplicações de tração, pois apresentam alta densidade de potência e alta eficiência. Motores de relutância chaveada (*switched reluctance motor*, SRM) também são uma alternativa, apresentando baixo custo e robustez. O veículo elétrico comercial Tesla Modelo S (lançado em 2012) utiliza um motor de indução trifásico (*induction motor*, IM) com barras de cobre no rotor [Bilgin, 2019].

Esse presente projeto se propõe a utilizar um motor corrente contínua sem escovas (*brushless DC motor*, BLDC) para tração do EV. Para fomentar as novas soluções, foram consultadas diversas referências bibliográficas (livros, artigos, TCCs, dissertações, teses, *application note*, etc). Sendo proposto um sistema de acionamento baseado em um microcontrolador para gerar o padrão de acionamento, um *driver* de potência, um inversor trifásico e um conjunto de sensores de efeito Hall para obter a posição do rotor do motor. Conforme

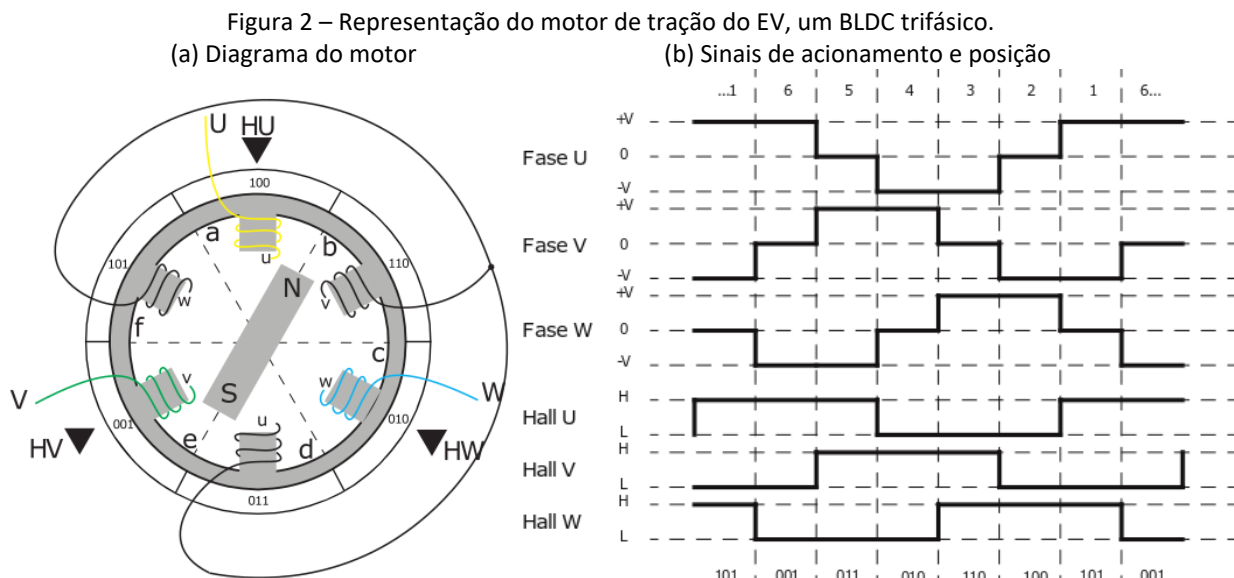
apresentado na Figura 1.



Fonte: Autoria própria.

Foram realizados projetos matemáticos com auxílio computacional, utilizando o *software* Smath Studio, e simulações computacionais utilizando o *software* LTspice. Após a validação dos projetos as soluções foram implementadas por meio de integração ao protótipo de veículo elétrico da equipe.

As principais especificações do motor de tração são: motor BLDC trifásico com tensão nominal de 48 V e corrente nominal de 19 A. No próprio motor já encontram-se três sensores de posição de efeito Hall. O padrão de acionamento para o inversor trifásico utilizado nesse trabalho é chamado de seis passos (*six steps*) no qual busca-se obter o torque máximo, ao posicionar o ímã permanente a 90 graus em relação ao campo magnético do estator [BROWN, 2011]. A Figura 2 (a) apresenta uma representação do motor BLDC e a Figura 2 (b) demonstra os sinais de comutação das fases do motor e os sinais de posição do rotor.



Fonte: Adaptado de Brown (2011) e Trento (2019).

A Figura 3 apresenta a topologia do inversor trifásico, composto por seis MOSFETs canal n de potência. E a Tabela 1 apresenta a sequência de acionamento do inversor trifásico de acordo com os sinais dos sensores de posição do rotor. Essa sequência de acionamento foi implementada em um microcontrolador STM32, responsável pela leitura dos sensores de efeito Hall e a geração dos sinais para acionamento do inversor.

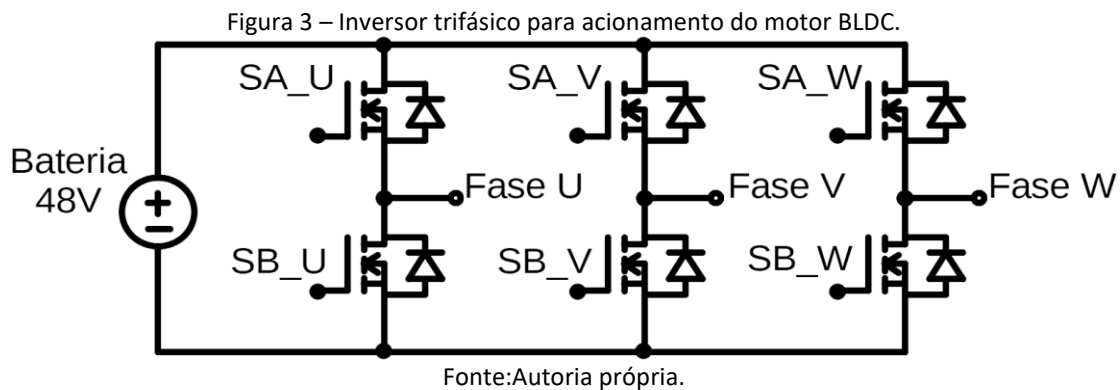


Tabela 1 – Sequência de acionamento do inversor para acionamento *six step*.

Sensores de posição do rotor	Fase U	Fase V	Fase W
------------------------------	--------	--------	--------

Hall U	Hall V	Hall W	SA U	SB U	SA V	SB V	SA W	SB W
	001		OFF	OFF	OFF	ON	ON	OFF
	010		ON	OFF	OFF	ON	OFF	OFF
	011		ON	OFF	OFF	OFF	OFF	ON
	100		OFF	OFF	ON	OFF	OFF	ON
	101		OFF	ON	ON	OFF	OFF	OFF
	111		OFF	ON	OFF	OFF	ON	OFF

Fonte: Adaptado de Trento (2019).

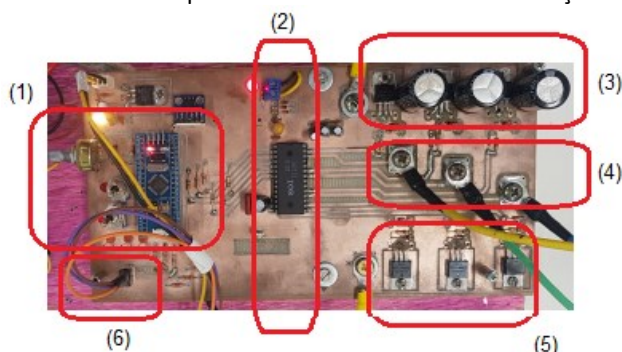
A escolha dos semicondutores de potência optou-se pelo MOSFET IRFB3307PbF. Esse componente suporta uma tensão *drain-source*, V_{DSS} , de 75 V, corrente de dreno, I_D , de 120 A; apresenta uma resistência interna da condução, $R_{DS(on)}$, de 6,3 m Ω ; em um encapsulamento TO-220. Além disso, foram calculadas e simuladas as perdas de condução (0,7456 W), chaveamento (4,575 W) e do diodo de corpo (1,7480 W), totalizando uma perda estimada de 7,0686 W na condição de operação nominal [Trento, 2019].

RESULTADOS E DISCUSSÕES

O sistema desenvolvido para o acionamento do motor de tração é apresentado na Figura 4 (a), em detalhe (1) o microcontrolador STM32; (2) o *gate driver* IR2130; (3) as chaves superiores do inversor e os capacitores de barramento; (4) as conexões com as três fases do motor; (5) as chaves inferiores do inversor; e (6) a conexão com os sensores de efeito Hall para obtenção da posição do rotor do motor. O protótipo completo de veículo elétrico é apresentado na Figura 3 (b).

Figura 4 – Protótipo desenvolvido.

(a) Inversor trifásico para acionamento do motor de tração.



(b) Protótipo completo do veículo elétrico.



Fonte: Autoria própria.

Foram realizados ensaios para estimar a eficiência do sistema de acionamento proposto. Os testes foram realizados aplicando-se uma carga ao eixo do motor sem escovas, a carga utilizada foi um freio eletromagnético acoplado com um disco de inércia. Para cada um dos testes, foi realizado o acionamento do inversor, sem carga, até estabilizar a velocidade (RPM) e então aumentado progressivamente a força do freio sobre o disco de inércia. Então foi medido a tensão e corrente drenada da bateria, com a multiplicação dessas obtém-se a potência instantânea e com sua média é possível calcular a potência ativa (em Watts) de entrada. Também foi medido a tensão e corrente de cada braço do inversor e calculada a potência ativa de saída, pela



soma da potência nos três braços do inversor. Os resultados obtidos estão resumidos e apresentados na Tabela 2. Foram realizados ensaios para quatro pontos de corrente no motor (I_{MED}), 25% (4,75 A), 50% (9,5 A), 75% (14,25 A) e 100% da corrente nominal (19 A). Sendo obtidos os valores de potência ativa de entrada (P_{IN}), potência de saída (P_{OUT3PH}) e com isso foi possível estimar a eficiência (razão entre a potência de saída e a potência de entrada) do acionamento do motor de tração.

Tabela 2 – Resultados dos ensaios com carga do sistema de acionamento.

I_{MED} (A)	I_{NOM} (%)	P_{IN} (W)	P_{OUT3PH} (W)	Eficiência (%)
4,75	25	235,532	216,928	92,101
9,50	50	462,909	423,961	91,586
14,25	75	683,444	628,039	91,893
19,00	100	830,012	722,285	87,021

Fonte: Adaptado de Trento (2019).

CONCLUSÃO

Os sistema de acionamento proposto, baseado no padrão *six steps* (implementado através da leitura dos sensores de efeito Hall e executado pelo microcontrolador) e em um inversor trifásico (implementado através de seis MOSFETs discretos) foi considerado adequado para o acionamento do motor BLDC de tração do veículo elétrico. Tendo atingido uma eficiência de aproximadamente 87% na corrente nominal de operação, conforme os ensaios realizados com carga. Também é possível observar que para potências menores existe um aumento na eficiência do inversor proposto, alcançando uma eficiência de aproximadamente 92% para uma carga de 25% da corrente nominal, o que é um resultado coerente pois com uma corrente elétrica menor são esperadas perdas reduzidas, principalmente as perdas de condução.

AGRADECIMENTOS

O presente projeto foi realizado com apoio da UTFPR por meio da Pró-Reitoria de Relações Empresariais e Comunitárias (PROREC) e da Diretoria de Extensão (DIREX) através da concessão de bolsa para estudante de graduação, edital 02/2020.

REFERÊNCIAS

BILGIN, B; et al. **Modeling and Analysis of Electric Motors: State-of-the-Art Review**. IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 5, no. 3, pp. 602–617, 2019.

BRASIL. **Lei nº 13.755, de 10 de dezembro de 2018**. Estabelece requisitos obrigatórios para a comercialização de veículos no Brasil; institui o Programa Rota 2030 - Mobilidade e Logística; dispõe sobre o regime tributário de autopeças não produzidas. Diário Oficial de União, Brasília, DF, p.21, de 11 dez.2018.

BROWN, W. **Brushless DC Motor Control Made Easy**. 2011.

CESAR, Julio. **Caminhão elétrico VW e-Delivery tem detalhes e preços divulgados**. UOL. 16 Julho 2021.

DE SANTIAGO, Juan; et al. **Electrical motor drivelines in commercial all-electric vehicles: A review**. IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 61, no. 2, pp. 475–484, 2012.



SEI-SICITE 2021

Pesquisa e Extensão para um mundo em transformação

XI Seminário de Extensão e Inovação
XXVI Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica
08 a 12 de Novembro - Guarapuava/PR



PRADO, Matheus. **Tesla brasileira? Marca nordestina de motos elétricas, Voltz chega a São Paulo.** CNN Brasil Business. São Paulo, SP, 04 jul.2020.

RODRIGUEZ, Henrique. **Novo caminhão FNM elétrico vai entregar cerveja no Rio de Janeiro.** Quatro Rodas. 22 jan 2021.

TRENTO, Everton. **Estudo de ponte trifásica para acionamento de motor cc sem escovas para uso em veículos elétricos.** 2020. 79 f. Monografia (Trabalho de conclusão do curso de graduação) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2020.

ZSW. **Press Release 04/2018.** Center for Solar Energy and Hydrogen Research Baden-Württemberg (Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg, ZSW), 2018.

ZSW. **Data Service Renewable Energies.** Center for Solar Energy and Hydrogen Research Baden-Württemberg (Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg, ZSW), 2021.