

## ESTUDO DO CONTROLE DE TRAÇÃO E FRENAGEM REGENERATIVA DE UM MOTOR BLDC APLICADO À UMA BICICLETA ELÉTRICA

**Otávio Rodrigues Gomes** – otavio.rodrigues@engenharia.ufjf.br  
Universidade Federal de Juiz de Fora  
Rua José Lourenço Kelmer, s/n – São Pedro  
36036-900 – Juiz de Fora – Minas Gerais

**Bruna Kethelen Reis da Silva** – brunakethelenr@gmail.com  
**Matusalém Martins Lanes** – mmlanes@cefetmg.br  
**Rodolfo Lacerda Valle** – rodolfolacerda@cefetmg.br  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais  
Rua José Péres, 588 - Centro  
36700-000 – Leopoldina – Minas Gerais

**Resumo:** *O presente artigo apresenta um sistema de tração para bicicletas elétricas que visa explorar conceitos de eficiência energética através da implementação da frenagem regenerativa incorporada ao conjunto proposto. O projeto é desenvolvido no software MATLAB®/Simulink®, constituído pela modelagem do sistema elétrico de tração e pelo modelo dinâmico de uma bicicleta. A integração de ambos os modelos permite que as estratégias de acionamento e controle possam ser ensaiadas no sistema elétrico e suas implicações possam ser percebidas e compreendidas no movimento dinâmico da bicicleta. Dessa forma, o estudo tem por objetivo servir de base para o desenvolvimento de um protótipo experimental que ressalte, concretamente, a funcionalidade, a praticidade e a eficiência do estudo abordado. Ademais, o artigo apresenta os principais resultados obtidos a partir de ensaios realizados, que permitem a validação da estratégia de controle e das restrições de projeto previstas pela norma de trânsito brasileira para bicicletas elétricas.*

**Palavras-chave:** *Bicicleta elétrica. Eletrônica de potência. Motor BLDC. Simulação.*

### 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos cinquenta anos as questões ambientais tornaram-se cada vez mais presentes. Temas como sustentabilidade e redução das emissões de gases de efeito estufa, por exemplo, são cada vez mais discutidos. Importantes conferências internacionais trataram de promover e estabelecer compromissos – Declaração de Estocolmo, Protocolo de Quioto e Acordo de Paris – que demonstram a relevância e o anseio pelo comprometimento com as questões ambientais. (LAGO, 2007)

Dentro deste contexto, a adoção de políticas públicas tem estimulado tanto mudanças de hábitos da população, através da conscientização, quanto o desenvolvimento e ampliação de pesquisas voltadas a estas temáticas. Países como Reino Unido, França e Alemanha já anunciaram medidas para limitar, ou em alguns casos banir, veículos movidos a combustíveis fósseis como diesel e gasolina (SCHMITT, 2016; CASTLE, 2019). Um relatório recente da

Agência Europeia do Ambiente (AEA) concluiu que, em função das alterações climáticas e de qualidade do ar, os veículos elétricos são claramente preferíveis aos automóveis movidos à combustíveis fósseis (AEA, 2019). Diante deste cenário os investimentos em veículos elétricos (VE) e veículos elétricos híbridos (VEH) se encontram em franca expansão.

Todavia, enquanto os VEs não se tornam uma opção popular e veículos à combustão interna (VCI) continuam dominando o mercado, uma iniciativa viável é o estímulo à utilização do transporte público e de meios alternativos de locomoção com baixa emissão de carbono, como as bicicletas. Em cidades como Rio de Janeiro, São Paulo e Vila Velha, empresas como a Tembici operam sistemas de compartilhamento de bicicletas e patinetes, permitindo que usuários possam retirá-los de um ponto e devolvê-los em qualquer outros distribuídos pela cidade (TEMBICI, 2019).

As bicicletas são meios de transporte que, além de não emitirem gases poluentes, contribuem com a mobilidade urbana e impactam positivamente na qualidade de vida de seus usuários. Os modelos elétricos de bicicletas, também chamadas de *e-bikes*, prometem uma nova experiência. Nelas, um motor elétrico contribui com o ciclista no fornecimento de torque ou aceleração para se locomover. As *e-bikes* podem ser, basicamente, de dois tipos: *pedelecs* e bicicletas com acelerador manual. Enquanto as primeiras contam com pedais assistidos e que monitoram velocidade e/ou torque e utilizam estes parâmetros no controle de acionamento do motor, as segundas possuem acionadores manuais – que podem ser dos tipos *twist and go* ou *thumb* – que permitem o ciclista dosar a aceleração desejada.

Alguns fabricantes desenvolveram modelos intermediários aos dois tipos supracitados, nos quais é possível escolher o modo de operação. A escolha do modelo mais adequado pode ser definida pelas intenções ou necessidades do usuário. Ademais, as normas de trânsito vigentes em cada país para as *e-bikes* também podem ser determinantes na escolha do modelo. No Brasil, a resolução nº 465, de 27 de novembro de 2013, é a responsável por regulamentar as bicicletas elétricas, determinando que sejam do modelo *pedelec*.

Pode-se dizer que o mercado nacional de *e-bikes* ainda está em desenvolvimento. Exemplos de fabricantes brasileiras são a *Brazil Electric* e a EDG.

Este artigo tem por objetivo desenvolver estudos sobre um sistema de tração para bicicletas elétricas através da modelagem computacional utilizando o *software* MATLAB®/Simulink®. A modelagem é composta por um modelo elétrico – para acionamento e controle de um motor BLDC – e outro mecânico – para estudo de variáveis como velocidade e aceleração –, que auxiliam no estudo e na compreensão do comportamento do sistema como um todo de modo simplificado, permitindo prever o funcionamento dinâmico do sistema e validar as estratégias de controle do motor, controle de velocidade, frenagem regenerativa e etc.

O modelo dinâmico permitirá prever o comportamento da bicicleta no que diz respeito a deslocamento, velocidade e aceleração. Dessa forma, a proposta também tem o objetivo de servir de suporte ao desenvolvimento de um protótipo, permitindo validar, principalmente, o sistema de controle elétrico no estágio de testes do protótipo físico. Ao final serão apresentados os principais resultados de simulações alcançados a partir do modelo proposto.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O aparato de funcionamento do motor de corrente contínua de ímãs permanentes sem escovas, ou simplesmente BLDC (do inglês, *Brushless DC*) é composto por uma fonte de alimentação de corrente contínua (CC), um conversor eletrônico de potência (inversor), o motor propriamente dito e um controlador eletrônico. O BLDC reúne características como:

alta eficiência e densidade de potência, facilidade de acionamento e controle, baixa emissão de ruídos e longevidade, tornando este motor uma opção viável em diversas aplicações como na indústria química, aeroespacial e náutica, por exemplo. Nestes motores, ímãs permanentes substituem enrolamentos de cobre no rotor e eliminam a necessidade de escovas de comutação. Dessa forma, os motores BLDC tornam-se mais leves e compactos, o que os tornam mais atrativos nas aplicações em que se encontram embarcados, como em VE e *e-bikes* (EHSANI et al., 2004; VALLE, 2017; XIA, 2012).

Em qualquer instante, nos motores BLDC trifásicos, duas fases estarão em condução. Enquanto uma fase absorve corrente, outra irá drenar esta mesma corrente. A sequência em que as bobinas serão energizadas é determinada pela posição do rotor, pela lógica de chaveamento e pelo conversor eletrônico. Ao serem energizadas, as bobinas do estator geram um campo magnético e, à medida que as demais bobinas se energizam, o campo magnético, produzido por elas, é capaz de girar. O campo magnético dos ímãs do rotor interage com o campo magnético gerado pela energização das bobinas, produzindo torque, que, por sua vez, é responsável pela rotação do rotor.

A continuidade da rotação depende da comutação das chaves eletrônicas, fazendo o campo magnético do estator se movimentar. A sequência de comutação das chaves eletrônicas do conversor é denominada "seis etapas de comutação".

Uma fonte de alimentação CC é responsável por fornecer energia ao motor através do conversor eletrônico. Essa fonte de alimentação pode ser oriunda de uma rede elétrica ou de sistemas de armazenamento de energia. Na maioria das vezes, em veículos elétricos, a alimentação é feita por baterias.

Os conversores CC-CA, ou seja, os inversores, são os responsáveis por efetivar o acionamento. Nesses circuitos, acontece a transferência de potência de uma fonte de corrente contínua (CC) para uma carga de corrente alternada (CA). Portanto, o inversor, neste caso, cumpre um papel semelhante ao dos comutadores no motor CC com escovas.

E, para o desenvolvimento da modelagem do sistema, a escolha pelo MATLAB®/Simulink® deve-se à variedade de recursos oferecidos pelo *software* que atendem às necessidades do projeto. Além disso, muitas universidades possuem a sua licença de utilização, o que faz o *software* ser familiar aos estudantes de engenharia.

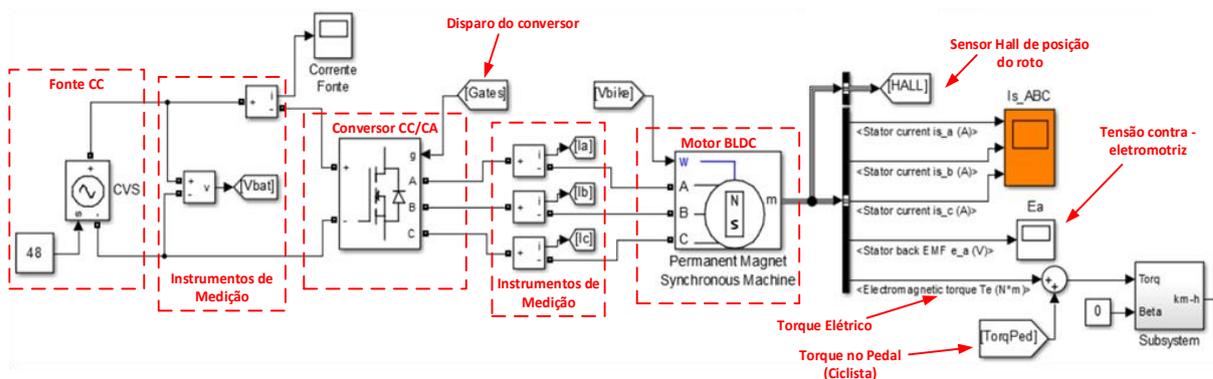
### 3 MODELO DINÂMICO E ELÉTRICO

O estudo desenvolvido neste trabalho busca estudar o sistema elétrico de tração de uma *e-bike*, realizando ensaios e avaliando estratégias de controle para o motor BLDC. O modelo elétrico conjuntamente com o modelo dinâmico da bicicleta permite analisar variáveis como deslocamento, velocidade e aceleração, sendo estas utilizadas no sistema de controle.

#### 3.1 Modelo do sistema elétrico de tração

O sistema elétrico de tração é constituído pelo motor BLDC e todo o seu aparato de acionamento. A Figura 1 apresenta o modelo computacional do sistema elétrico desenvolvido no MATLAB®/Simulink®, onde é possível visualizar a disposição dos equipamentos do sistema elétrico.

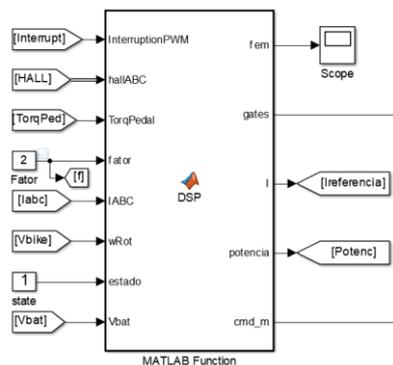
Figura 1 – Diagrama de blocos do sistema de controle da bicicleta elétrica.



Fonte: os autores.

O modelo do motor disponível no Simulink® – máquina síncrona de ímãs permanentes – fornece variáveis como velocidade de rotação, corrente de estator, força contra-eletromotriz (FCEM) e torque elétrico. Na Figura 2 é exibido um bloco do tipo *MATLAB Function* que opera como controlador do sistema e tem a funcionalidade de ler os parâmetros da máquina e calcular a ação de controle.

Figura 2 – Bloco do sistema de controle.



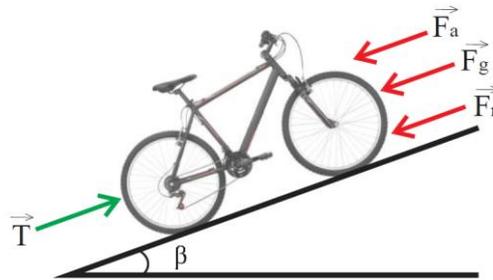
Fonte: os autores.

O controle é realizado sobre o torque elétrico, o que é executado controlando as correntes de fase (correntes do estator), uma vez que torque e corrente se relacionam por uma constante. Como trata-se de uma *e-bike* do tipo *pedelec*, o modelo elaborado baseia-se na medição de torque aplicado pelo ciclista no pedal e, então, o torque elétrico do motor é controlado visando fornecer um torque proporcional. A proporção pode ser determinada pelo ciclista através de uma interface de configuração.

### 3.2 Modelo dinâmico da bicicleta

Sabemos que a Física é uma ciência fundamental que se desenvolveu com base em teorias e experimentos. Observamos em uma dessas teorias, na dinâmica, o estudo do movimento de um corpo e as causas que o acometem. A partir dos princípios gerais da mecânica levantou-se as principais forças envolvidas no movimento de uma bicicleta, são elas: força de tração ( $T$ ), força de resistência aerodinâmica ( $F_a$ ), força de resistência ao aclave ( $F_g$ ) e força de resistência ao rolamento ( $F_r$ ), representadas na Figura 3.

Figura 3 – Principais forças envolvidas no movimento de uma bicicleta.



Fonte: os autores.

A força de tração ( $T$ ) é responsável por tracionar a bicicleta e, normalmente, é desenvolvida pelo ciclista. No caso das bicicletas elétricas do tipo *pedelecs*, o motor auxilia o ciclista fornecendo parte desta força através do seu torque. Para que a força de tração seja capaz de movimentar a bicicleta, ela deve superar as forças de resistência ao movimento que são: a resistência ao rolamento, a resistência aerodinâmica e a resistência ao aclave.

A resistência ao rolamento ( $F_r$ ) diz respeito ao atrito entre as partes móveis da bicicleta, à deformação dos pneus e às oscilações do relevo. As partes móveis incluem as correntes e os rolamentos. As oscilações, por sua vez, são provocadas pelo desenho do relevo no qual a bicicleta circula. No entanto, o principal responsável pela resistência ao rolamento são os pneus, e a deformação que estes sofrem em superfícies de contato rígidas (asfalto, por exemplo), ou que estes provocam em superfícies macias (areia) (EHSANI et al., 2004). A  $F_r$  pode ser determinada pela Equação (1) (EHSANI et al., 2004):

$$F_r = f_r \cdot M \cdot g \cdot \cos(\beta) = f_r \cdot P \cdot \cos(\beta) \quad (1)$$

sendo:  $f_r$  o coeficiente de resistência ao rolamento,  $M$  a massa do conjunto bicicleta e ciclista,  $g$  a aceleração gravitacional e  $\beta$  o ângulo de inclinação da rampa.

A resistência aerodinâmica ( $F_a$ ) é a força que um corpo em movimento encontra no ar e que se opõe ao movimento. Também conhecida como arrasto aerodinâmico, a força resulta das zonas de alta e baixa pressão que são formadas da interação entre o corpo em movimento e a massa de ar no ambiente. Outra componente dessa força é a superfície de arrasto, oriunda das diferentes velocidades das camadas de ar em torno do corpo em movimento, causando atrito entre as moléculas de ar (EHSANI et al., 2004). A Equação (2) descreve esta força.

$$F_a = \frac{1}{2} \rho_{ar} \cdot A_f \cdot C_d (V + W)^2 = K_a \cdot (V + W)^2 \quad (2)$$

sendo:  $\rho_{ar}$  a densidade do ar;  $A_f$  a área frontal;  $C_d$  o coeficiente de arrasto aerodinâmico;  $V$  a velocidade do corpo;  $W$  a velocidade do vento.

A velocidade do vento pode influenciar no arrasto e, na fórmula, é tomada como positiva se possui sentido contrário à velocidade do veículo. Quando possui o mesmo sentido da velocidade da bicicleta,  $W$  é negativa.

A resistência ao aclave ( $F_g$ ), representada na Equação (3), é a força que surge quando o corpo está subindo ou descendo uma inclinação. Nessa situação, a componente  $Px$  da força peso (do conjunto bicicleta e ciclista) está direcionada para o lado de descida da inclinação, como é possível observar na Figura 3.

$$F_g = M \cdot g \cdot \text{sen}(\beta) \quad (3)$$

Conhecendo as forças que atuam sobre o corpo, podemos escrever a força resultante ( $F_{res}$ ) como:

$$F_{res} = \sum \text{Forças atuantes em um corpo} \quad (4)$$

Logo:

$$F_{res} = T - (F_r + F_a + F_g) \quad (5)$$

A força resultante é composta por uma parcela angular e outra linear:

$$F_{res} = J \cdot \alpha + M \cdot a = \frac{J}{r_d^2} \cdot \frac{dV}{dt} + M \cdot \frac{dV}{dt} \quad (6)$$

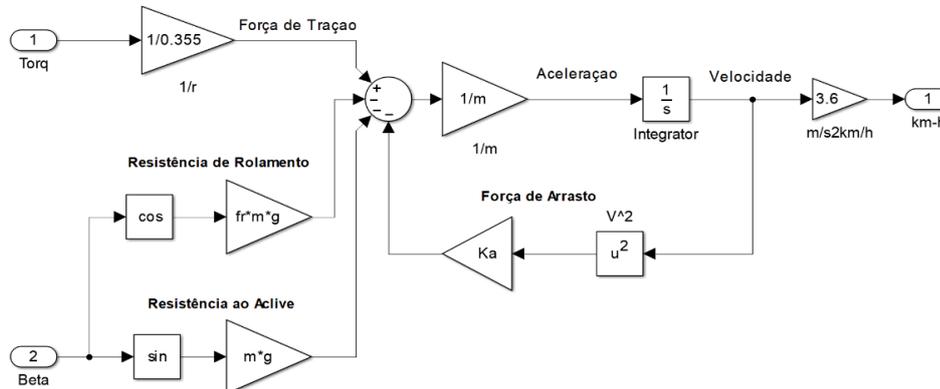
Onde  $J$  é o momento de inércia do corpo – este foi desconsiderado pois facilita a modelagem sem prejudicar a análise do sistema de tração – e  $r_d$  é o raio efetivo da roda. Substituindo (6) em (5), isolando a força de tração ( $T$ ) e, sabendo-se que força de tração pode ser expressa em função do torque de tração através da relação  $\tau_{tração} = T \cdot r_d$ , tem-se:

$$\frac{\tau_{tração}}{r_d} = f_r \cdot M \cdot g \cdot \cos(\beta) + K_a \cdot (V + W)^2 + M \cdot g \cdot \text{sen}(\beta) + \left( \frac{J}{r_d^2} + M \right) \frac{dV}{dt} \quad (7)$$

A Equação (7) permite desenvolver o modelo computacional simplificado, representado na Figura 4. Trata-se de um modelo simplificado devido a consideração feita anteriormente em relação ao momento de inércia, além disso, os coeficientes que compõem as relações matemáticas das forças envolvidas no movimento possuem valores bastante comutáveis em função da interdependência com outros fatores. Porém, o modelo simplificado prever o desenvolvimento de variáveis e validar as estratégias de controle do motor, controle de velocidade, frenagem regenerativa e etc.

Um bloco do tipo “Subsystem” implementa o modelo dinâmico da bicicleta. Este bloco tem como entradas o torque resultante da soma do torque fornecido pelo motor e pelo ciclista e o ângulo de inclinação da pista para cálculo de um dos termos da relação matemática do modelo. A partir das entradas de torque resultante e ângulo de inclinação da pista, o sistema é capaz de retornar variáveis como aceleração, velocidade e deslocamento. O estudo das forças envolvidas no movimento da bicicleta auxilia no conhecimento do comportamento dinâmico da bicicleta.

Figura 4 – Diagrama de blocos do sistema de controle da bicicleta elétrica.



Fonte: os autores.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

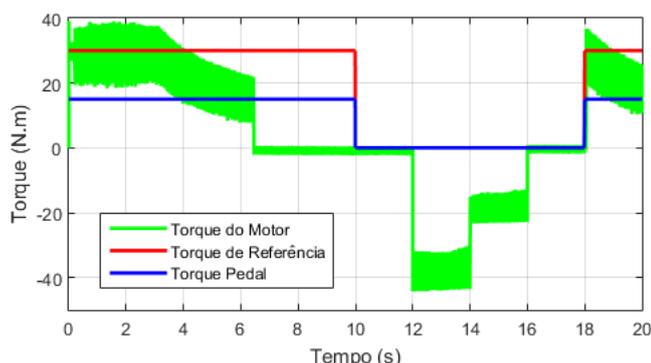
Os resultados foram obtidos supondo-se uma entrada de torque inserida pelo ciclista e mensurada por um sensor no pedal da bicicleta. Através da interface de configuração, determinou-se que a bicicleta contribuiria com o dobro do torque aplicado pelo ciclista. Os parâmetros utilizados na simulação são apresentados na Tabela 1. A legislação nacional vigente limita a potência máxima fornecida pelo motor em 350 W, desta forma foi utilizado um limitador para a potência aplicada ao motor. Na Figura 5 estão representados o torque aplicado pelo ciclista (azul), o torque de referência utilizado no controle do motor (vermelho) e o torque elétrico do motor (verde).

Tabela 1 – Valores utilizados para simulação digital.

Parâmetros	Valor
M	100 kg
$f_r$	0,002
$K_a$	0,2
g	9,81 m/s <sup>2</sup>
$r_d$	0,3556 m (Aro 28")

Fonte: os autores.

Figura 5 – Forma de onda dos torques elétrico, de referência e do ciclista.



Fonte: os autores.

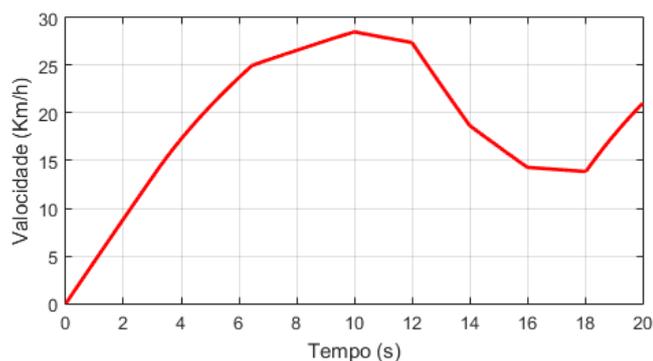
A Figura 5 permite observar momentos onde o torque do motor é negativo – refere-se à frenagem elétrica. O projeto implementa a frenagem regenerativa do motor, que se trata de um momento no qual o processo de desaceleração da máquina elétrica permite recuperar a sua energia cinética de rotação. Nesse momento, a máquina passa a operar como gerador, fornecendo torque de frenagem às rodas (GUO; WANG; CAO, 2009).

O torque aplicado pelo ciclista foi de 15 N.m, portanto, o torque aplicado pelo motor foi de 30 N.m. Observa-se, na Figura 5, que o torque do motor não rastreia o torque de referência em todos os momentos. Isso acontece pois, em determinados instantes, algumas restrições são acionadas.

O torque e a corrente do motor estão relacionados e o objetivo do controle é o de regular a corrente visando controlar torque. A escolha pelo controlador IP deve-se pelo fato de não possuir zero na função de transferência do controlador (BOUCHAKOUR et al., 2015), tornando-se útil para o sistema.

A Figura 6 apresenta o perfil da velocidade desenvolvida pela bicicleta para a entrada de torque fornecida pelo ciclista e pelo motor, além da inclinação do relevo, configurado como um terreno plano (0°).

Figura 6 – Perfil de velocidade desenvolvida pela bicicleta.

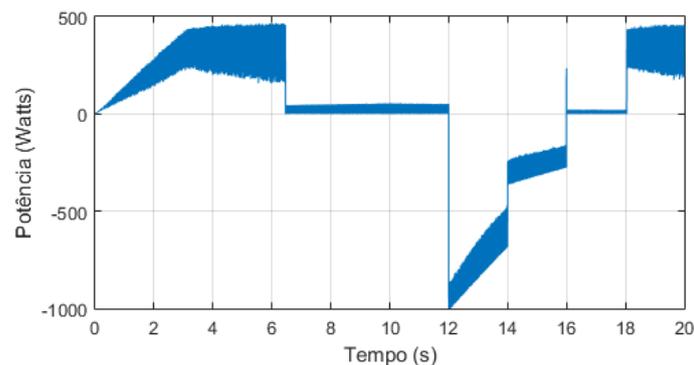


Fonte: os autores.

Após o instante de 6 segundos, a velocidade da bicicleta é superior a 25 Km/h, como é possível observar na Figura 6. Neste momento é acionada a restrição de velocidade e, então, o motor é desativado e o ciclista passa a contribuir, sozinho, com o torque.

Na Figura 7 percebe-se que, em torno do instante de 3 segundos, o motor alcançou a restrição de 350 W de potência estabelecidos pela norma de trânsito brasileira. A partir desse instante, à medida que a velocidade da bicicleta aumenta, deve-se controlar as correntes de fase do motor para que a potência não supere o limite. Logo, controlando-se a corrente, o torque também é controlado e, por isso, a curva do torque desenvolvido pelo motor (em verde, na Figura 5) não rastreia a referência (em vermelho, na Figura 5).

Figura 7 – Forma de onda da potência desenvolvida pelo motor.



Fonte: os autores.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O artigo apresentou a modelagem de um sistema de tração para *e-bikes* que leva em conta as normas de trânsito brasileiras para estes veículos. No trabalho, os modelos elétrico e dinâmico da bicicleta foram desenvolvidos, permitindo a análise de variáveis como torque, velocidade e potência, por exemplo, auxiliando nos estudos do sistema e de seu comportamento.

O trabalho tem o objetivo de auxiliar estudos e servir de suporte ao desenvolvimento de um protótipo. Assim, com a possibilidade de implementar estratégias de controle e avaliar suas ações antes de aplicá-lo no sistema físico, auxilia na previsão do comportamento do sistema nas diferentes condições que este possa ser submetido. Ademais, é válido ressaltar as dificuldades de realização de ensaios práticos, uma vez que o controle de torque requer um controle da velocidade no eixo da máquina, de tal forma a coibir o disparo do motor, caso o motor esteja à vazão.

A modelagem dinâmica apresentada trata-se de um modelo simplificado, que busca fornecer a velocidade estimada a partir de valores de torques mecânicos. Os coeficientes das relações matemáticas das forças de resistência ao movimento possuem valores extremamente mutáveis, pois são dependentes de outras variáveis. Em consequência, o modelo dinâmico apresentado torna-se uma relação que não se aplica em todas as condições, a não ser as estabelecidas pelas considerações feitas.

### *Agradecimentos*

Os autores agradecem ao CEFET-MG e ao CNPq pelo apoio ao desenvolvimento deste trabalho de iniciação científica (PIBIT proposta 10124/2018).

## REFERÊNCIAS

AEA, Veículos elétricos: uma escolha inteligente em defesa do ambiente. Agência Europeia do Ambiente, 2019.

BOUCHAKOUR, A. et al. **Performance Comparison of PI and IP Controllers Used to Control a DC Machine Powered by a Photovoltaic Generator.** p. 6, 2015.

CASTLE, Stephen. Britain to Ban New Diesel and Gas Cars by 2040. Jul. 2017. The New York Times, 2019. Disponível em: <<https://www.nytimes.com/2017/07/26/world/europe/uk-diesel-petrol-emissions.html>>. Acesso em: 26 abr. 2019.

LAGO, André Aranha Corrêa do. Estocolmo, Rio, Joanesburgo: o Brasil e a três conferências ambientais das Nações Unidas. Thesaurus Editora, 2007.

EHSANI, M. et al. **Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles: fundamentals, theory, and design.** [s.l.] CRC press, 2004.

GUO, J.; WANG, J.; CAO, B. **Regenerative braking strategy for electric vehicles.** 2009 IEEE Intelligent Vehicles Symposium. **Anais...** In: 2009 IEEE INTELLIGENT VEHICLES SYMPOSIUM. jun. 2009.

SCHMITT, B. Germany's Bundesrat Resolves End of Internal Combustion Engine. out. 2016. Disponível em: < <https://www.forbes.com/sites/bertelschmitt/2016/10/08/germanys-bundesrat-resolves-end-of-internal-combustion-engine/> >.

TEMBICI. Bicicletas Compartilhadas. Disponível em: < <https://tembici.com.br/bicicletas-compartilhadas>>. Acesso em: 26 abr. 2019.

VALLE, R. L. **Controlador preditivo aplicado na regulação das correntes de um motor CC de ímãs permanentes sem escovas de baixa indutância.** Juiz de Fora: Universidade Federal de Juiz de Fora, 2017.

XIA, C. **Permanent Magnet Brushless DC Motor Drives and Controls.** Singapore: John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd., 2012.

## **STUDY OF THE TRACTION CONTROL AND REGENERATIVE BRAKING OF A BLDC MOTOR APPLIED TO AN ELECTRIC BIKE.**

**Abstract:** *This paper presents a traction system for electric bicycles that aims to explore concepts of energy efficiency implementing regenerative braking. The project is developed in MATLAB® / Simulink® software, which consists of the modeling of the electric traction system and the dynamic model of a bicycle. The integration of both models allows the driving and control strategies to be tested in the electric system and its implications for the dynamic movement of the bicycle can be perceived and understood. In this way, the study is able to provide basis for the development of an experimental prototype that emphasizes the functionality, practicality and efficiency of the study addressed. In addition, the article presents the main results obtained from tests carried out, which allow the validation of the control strategy adopted and the design restrictions foreseen by the Brazilian traffic regulations for electric bicycles.*

**Key-words:** *Electric bicycle. Power electronic. BLDC motor. Simulation.*