

Atuador para um Sistema de Freio Brake-By-Wire Aplicado a Carros Elétricos de Competição

1 INTRODUÇÃO

Na busca por um mundo mais sustentável, a humanidade tenta aliar tecnologia ao meio ambiente. Uma das maneiras de alcançar este objetivo é fazer com que certo produto ou máquina tenha sua pegada de CO₂ reduzida (WWF, 2017). Seguindo esta ideia, veículos elétricos estão ganhando cada vez mais força no cenário mundial e já são considerados o futuro dos carros para maioria da população (Revista quatro rodas, 2021). O Brasil é um país em que a vasta maioria da energia gerada é proveniente de fontes renováveis, como hidrelétricas, portanto os veículos elétricos se tornam ainda mais atrativos e sustentáveis.

Uma grande mostra desta tendência global são as categorias de corridas exclusivas para veículos elétricos, onde pode-se destacar a Formula E. Reforçando o propósito de sustentabilidade, os organizadores da Formula E afirmam em seu site oficial que: "O campeonato ABB FIA Formula E promove ativamente veículos elétricos e meios de energia renovável visando reduzir a poluição do ar e lutar contra as mudanças climáticas em todo o mundo" (FIA Formula E, 2020). Outro exemplo é o crescimento das categorias estudantis como a Formula SAE Elétrico, em que estudantes de continentes como Europa e América competem entre si para desenvolver o melhor e mais rápido protótipo de veículo elétrico.

Para garantir uma maior autonomia para estes veículos, é indispensável implementar a chamada frenagem regenerativa (EHSANI, 2018). Esta utiliza os motores elétricos do veículo como geradores, fazendo com que parte da energia utilizada durante a aceleração seja recuperada. Esta estratégia garante uma maior distância viajada com apenas uma carga da bateria (YOONG, 2010). Em grande parte das vezes, o torque frenante necessário é maior que o torque produzido pela frenagem regenerativa devido às limitações físicas dos motores e baterias. Isso torna imprescindível a utilização do método híbrido, que consiste na coexistência de dois tipos de frenagens: a tradicional por atrito e a regenerativa (YUAN, 2020).

Para realizar a frenagem híbrida, é necessário que exista um equipamento para efetuar o controle e determinar quanto torque frenante deverá ser aplicado por cada um dos tipos. Este controle visa atingir a maior recuperação de energia possível, mantendo boa performance na frenagem (YUAN, 2020)..

Um dos sistemas de freio mais utilizados em veículos elétricos é o Brake-by-Wire (BBW), no qual a frenagem é realizada por um dispositivo inteligente e não mais pelo condutor do carro (GONG, 2020). Tradicionalmente este sistema é composto por um servo motor ou bomba de alta pressão, sendo estes dispositivos os responsáveis pelo aumento da pressão no sistema e conseqüentemente a frenagem do veículo. Neste trabalho, o autor propõe uma alternativa à utilização de motores e bombas, visando simplificar os métodos de controle da pressão e ainda obter uma redução do gasto energético envolvido no processo.

A substituição dos equipamentos será feita por meio da utilização de um eletroímã que, por sua vez, aciona um pistão diretamente conectado à linha de freio. Este será responsável por comprimir o fluido, elevando a pressão e permitindo que a modulação da corrente aplicada se traduza em um controle direto da pressão no sistema.

Para levantamento dos parâmetros necessários no dimensionamento do eletroímã proposto, os dados do circuito hidráulico e motores elétricos foram disponibilizados por uma equipe de competição Formula SAE. Por fim, o algoritmo genético proposto por Sudhoff (2014) foi utilizado para determinar os parâmetros físicos e construtivos do eletroímã. Os

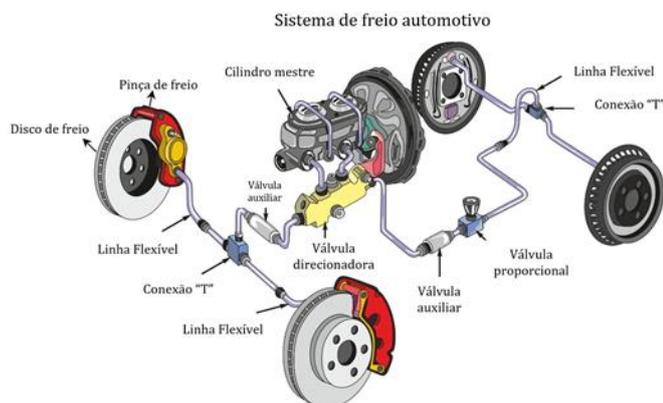
resultados obtidos são apresentados, analisados e, então, é apresentada uma conclusão sobre a viabilidade do sistema proposto.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Um sistema de freio hidráulico tradicional é composto por seis componentes principais, sendo eles: Pedal de freio, Amplificador de Força, Cilindro Mestre, Pinça, Pastilha, Disco de freio e algumas válvulas auxiliares. Conforme apresentado na Figura 1.

A pinça de freio é, por meio de seus pistões, o componente responsável pelo movimento e pelas forças aplicadas às pastilhas. As pinças podem ter um ou vários pistões. A determinação do número de pistões é vasta e não será contemplada neste trabalho. Porém, sabe-se quanto mais pistões, maior a força de frenagem, pois quanto maior a área total dos pistões, maior será a multiplicação da força vinda do cilindro mestre (DOS SANTOS, 2014).

Figura 1 – Ilustração do sistema de freio



Fonte: Adaptado de (DOS SANTOS, 2014).

A caracterização dos sistemas BBW será apresentada nos tópicos a seguir.

2.1 BBW Eletro-Hidráulico

O sistema de freio acionado pelo atuador eletro-hidráulico consiste na utilização de bomba hidráulica como fonte de pressão do sistema. Ou seja, a bomba assume o papel que anteriormente era feito pelo pedal de freio (GONG, 2020).

A bomba hidráulica faz com que a pressão em um acumulador aumente. Este é composto por uma câmara preenchida por fluido, onde um pistão é acoplado a uma mola. Desta forma, à medida que a pressão aumenta, o pistão comprime a mola e mais fluido pode ser armazenado. Com isso o acumulador é capaz de manter a pressão elevada mesmo após o desligamento da bomba.

Neste sistema, a pressão é controlada nas rodas através de um esquema de válvulas de entrada e saída. Quando deseja-se aumentar a pressão na roda, as válvulas de saída são fechadas e as de entrada abertas. Quando atinge-se o nível desejado, ambas são fechadas e caso uma menor pressão seja necessária, a válvula de saída é aberta (YUAN, 2018). Sistemas semelhantes são propostos por (YUAN, 2020), (YUAN, 2018) e (KWON, 2016).

2.2 BBW Híbrido

O freio híbrido possui como atuador um motor associado a um parafuso de rosca sem fim e um sistema de engrenagens. Este parafuso é utilizado para converter o movimento rotacional do motor a um movimento linear que, então, irá deslocar as pastilhas para o acionamento do freio. O sistema de engrenagens é utilizado para reduzir a velocidade de movimento e aumentar a força na saída, tornando possível que o motor exerça força suficiente para a parada do veículo.

O BBW híbrido combina o freio hidráulico tradicional à utilização do conjunto com motor e parafuso de rosca sem fim (GONG, 2020). Com isso, além do sistema de engrenagens, ainda existe um outro sistema de amplificação hidráulico, utilizando-se do princípio da Lei de Pascal (BRUNETTI, 2008) demonstrado pela Equação 1.

$$\frac{A_p}{A_e} = \frac{F_p}{F_e} \quad (1)$$

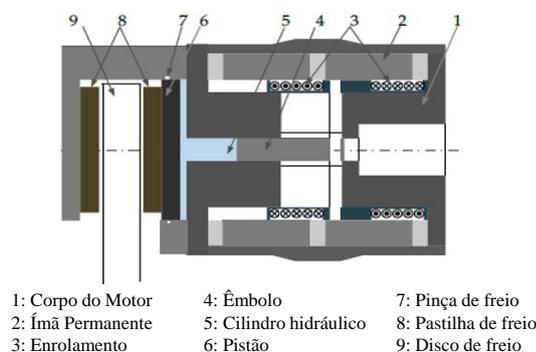
Em que F_p é a Força exercida pelos pistões da pinça de freio, A_p a soma das áreas de todos os pistões, A_e e F_e são respectivamente a área e a força aplicada no êmbolo do cilindro mestre.

O sistema BBW híbrido é um dos mais utilizados atualmente. Alguns exemplos são o Bosch IBP (Bosch, 2021), o Bosch iBooster (Bosch, 2021), o Continental MK C1 Evo (Continental, 2021) e os estudos desenvolvidos por (ZHU, 2019) e (YONG, 2017).

2.3 BBW Eletromagnético

O freio eletromagnético consiste na utilização de ímãs permanentes e/ou eletroímãs no desenvolvimento de motores elétricos lineares ou "pistões eletromagnéticos". Neste sistema, um eletroímã é ativado pela Electronic Control Unit (ECU) que determina qual valor de corrente fluirá pelos enrolamentos. A amplitude desta corrente resultará em diferentes níveis de força aplicados a um amplificador hidráulico idêntico ao do freio híbrido e, então, a força amplificada será aplicada às pastilhas (GONG, 2020). Já existem estudos relacionados a este tipo de freio, como o trabalho proposto por (LI, 2015). A Figura 2 apresenta um BBW Eletromagnético.

Figura 2 – Ilustração do sistema de freio



Fonte: Adaptado de (GONG, 2020).

3 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento deste trabalho, a modelagem do eletroímã foi feita por meio do algoritmo genético desenvolvido por Sudhoff (2014). Este algoritmo utiliza uma série de parâmetros que servirão como condições de fronteira e a partir delas seleciona aqueles indivíduos que melhor atendem a estas condições. Segundo Sudhoff (2014), o algoritmo apresenta melhores resultados para sistema com mil indivíduos ao longo de mil gerações, totalizando o valor de um milhão de indivíduos por simulação.

Durante a especificação do eletroímã, fez-se necessário o levantamento de alguns dados sobre um veículo participante da competição Fórmula SAE. O dado mais importante sendo a força mínima que deverá ser exercida pelo eletroímã. Os dados levantados são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Dados do veículo

Dado	Valor
Pinça dianteira	Wilwood GP 200
Pinça traseira	Wilwood PS-1
Diâmetro da linha de freio	3/16"
Distância entre eixos	1550 mm
Distância entre rodas	1150 mm / 1170 mm
Máxima força de frenagem	6400 N
Potência dos motores elétricos	39,72 kW
Massa	279 kg
Mínimo diâmetro efetivo do disco de freio	97,5 mm

A partir destes levantamentos, pode-se efetuar os cálculos para determinar quais parâmetros devem ser atendidos pelo eletroímã. Estes parâmetros calculados são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros de entrada para o eletroímã

Variáveis	Valor
Tensão aplicada	12 V
Dimensão do entreferro	0,5 mm
Proporção máxima entre as dimensões da peça	3
Tolerância para o enrolamento	1 mm
Volume máximo	0,250 dm ³
Proporção máxima	3
Fator de empacotamento	0.6
Fator de construção do enrolamento	1.20
Força mínima necessária	228,08 N

A tensão aplicada foi definida a partir do nível de tensão disponível dentro do veículo que, para este trabalho, é 12V. A máxima dimensão do entreferro é dada a partir do cálculo da distância máxima que o pistão deve se deslocar para que o volume necessário de fluido entre na pinça. Para este cálculo, foi necessário determinar qual o volume total dentro do sistema e, assim, determinar qual o possível volume de fluido comprimido a partir do aumento da pressão, pois a partir do momento que a pinça toca o disco, o deslocamento de líquido ocorrerá apenas devido à sua compressibilidade.

Sabe-se que o diâmetro da linha de freio é de 4,8 mm e que seu comprimento até uma das rodas é de 2720 mm. Portanto, o volume de líquido contido na linha é de:

$$V_l = \left(\pi \frac{4,8^2}{4} \right) \times 2720 \quad (2)$$

Logo,

$$V_l = 49,22 \times 10^3 \text{ mm}^3 \quad (3)$$

O cálculo do volume da pinça de freio foi feito a partir da sua área total de 794 mm² e altura de 33,8 mm. Com isso, tem-se:

$$V_p = 794 \times 33,8 = 26,84 \times 10^3 \text{ mm}^3 \quad (4)$$

A soma dos dois volumes resulta no volume total de:

$$V_t = 76060 \text{ mm}^3 \quad (5)$$

Considerando-se a compressibilidade de 0,04% especificada pela fabricante do fluido (BREMBO, 2020), calculou-se o volume compressível:

$$V_c = 76060 \text{ mm}^3 \times 0,04 \% \quad (6)$$

Assim,

$$V_c = 30,4 \text{ mm}^3 \quad (7)$$

Para obter a distância que o pistão deverá percorrer para compensar esse deslocamento de fluido, basta dividir o volume compressível pela área do pistão. Com isso,

$$D_p = \frac{30,4}{794} = 0,0383 \text{ mm} \quad (8)$$

Para atender esta condição e tornar mais fácil a fabricação do eletroímã, a dimensão máxima do entreferro foi considerada como 0,5 mm.

Para os parâmetros da proporção máxima entre as dimensões do eletroímã, a taxa de empacotamento e tolerância para o enrolamento, foram utilizados valores típicos propostos pelo autor em (SUDHOFF, 2014).

A força máxima necessária exercida pelo eletroímã foi calculada a partir dos dados de força máxima aplicados à pinça de freio. Sabe-se que o veículo foi projetado para uma força de frenagem máxima de 6400 N e que a área de contato dos pistões da pinça com a pastilha é de 794 mm². Além disso, seguindo o proposto por (LI, 2015), o diâmetro do pistão movimentado pelo eletroímã foi definido como 6 mm, resultando em uma área de 28,3 mm². A razão entre as áreas do pistão da pinça de freio e do eletroímã, resulta no número de vezes que a força exercida pelo pistão será multiplicada.

Portanto,

$$R_a = \frac{7,94}{0,283} = 28,06 \quad (9)$$

Com isso, pôde-se calcular a mínima força que deverá ser exercida pelo pistão:

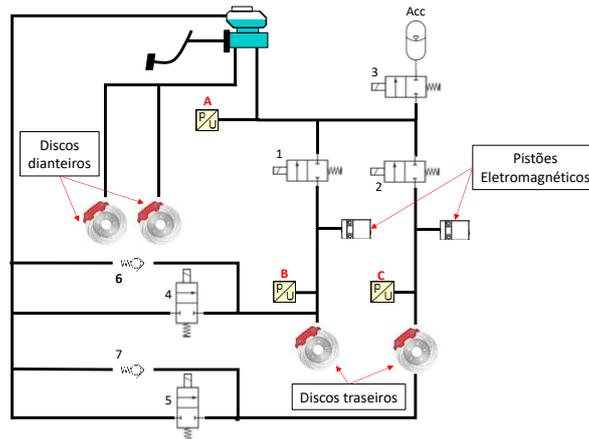
$$F_{min} = \frac{6400 \text{ N}}{28,06} = 228,08 \text{ N} \quad (10)$$

Uma premissa importante para a especificação do eletroímã é o deslocamento exclusivo de fluido devido à compressão do líquido de freio. Portanto, foi desenvolvida uma lógica de controle para que a força do próprio piloto realize o trabalho de transportar este fluido até que a pastilha toque o disco de freio.

Esta lógica consiste em checar o nível da pressão do fluido na roda e, a partir disso, determinar se a válvula que a conecta ao pedal do piloto deve ou não estar aberta. O aumento da pressão no sistema indica que a pastilha está em contato com o disco.

Considerando todas as condições citadas e que o veículo apresentado é movido por dois motores conectados a cada uma das rodas traseiras, o circuito hidráulico foi projetado conforme a Figura 3.

Figura 3 – Esquema do sistema de freio proposto



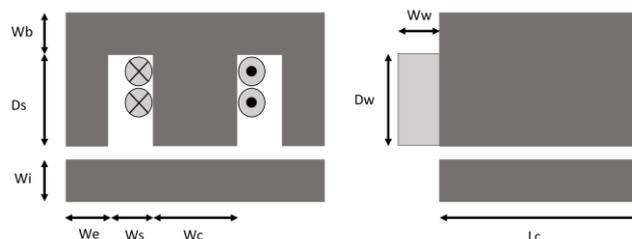
Fonte: Do próprio autor

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Ao introduzir os dados da Tabela II no algoritmo genético desenvolvido por (SUDHOFF, 2014), determinou-se uma geometria ótima para o eletroímã que será utilizado como atuador deste sistema de freio. A Tabela 3, mostra estas dimensões e o número N de voltas do enrolamento, enquanto a Figura 4 identifica para o leitor o significado destas medidas.

Para as dimensões apresentadas na Tabela III, é fácil observar que as proporções do eletroímã não serão um empecilho para sua acomodação dentro do veículo. Os resultados do algoritmo genético mostram que o eletroímã possuiria um volume total de 57,45 cm³ ou 57,44 ml. Com estas dimensões estes eletroímãs mostraram-se apropriados para o uso, tendo em vista que seriam menores que pinças atualmente utilizadas tais como as pinças Wilwood PS-1 ou Wilwood GP 200. Com as dimensões definidas, foi possível utilizar os valores da densidade do cobre (8,96 g/cm³) e da liga metálica M43 (8,03 g/cm³) para estimar um peso total de 90,61g ou 0,033% do peso total do veículo.

Figura 4 – Dimensões do eletroímã



Fonte: Adaptado de (SUDHOFF 2014)

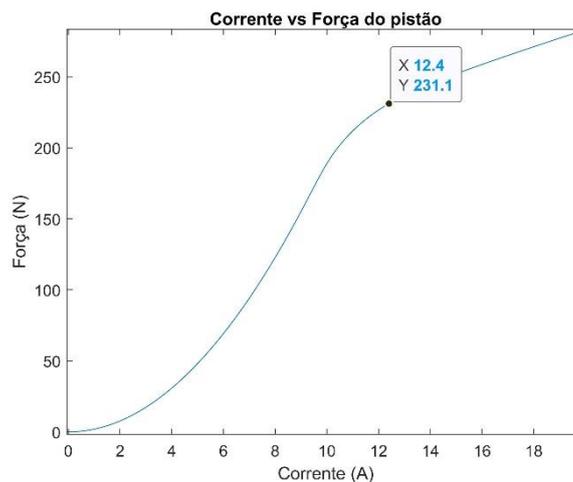
Tabela 3 – Parâmetros de entrada para o eletroímã

Dimensões	Resultado (mm)
Wc	12,0
We	3,278
Wi	2,647
Wb	3,262
Ws	8,754
Ds	24,747
Lc	36,064
Dw	4,328
Ww	3,030
Corrente nominal	12.5 A
N	70

Para obter a curva característica deste eletroímã, variou-se a corrente fornecida por esta fonte entre 0 e 20A, porém com tensão fixada em 12V. O resultado desta variação fornece a curva de corrente pela força que poderá ser exercida pelo pistão eletromagnético. Na Figura 5, pode-se observar esta relação.

Ao analisar o gráfico, observa-se que o alvo de força para o pistão supera a marca de 228,08N antes mesmo de atingir seu valor nominal de 12.5A como apresentado na Tabela III . É importante observar que o modelo inclui as características não lineares deste sistema, como os efeitos de histerese e saturação.

Figura 5 – Gráfico de força versus corrente aplicada no eletroímã



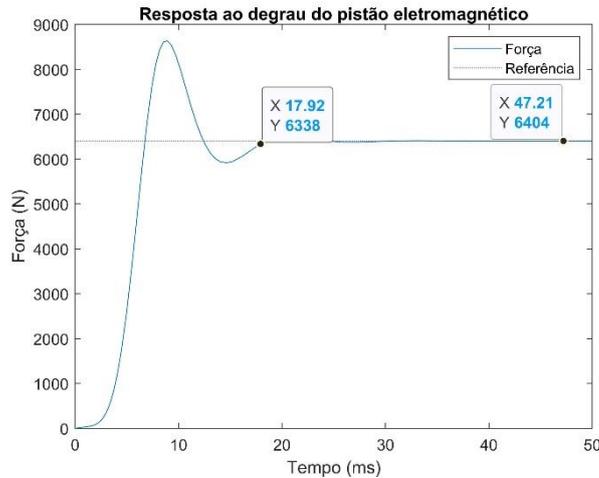
Fonte: Do próprio autor

A Figura 5 também permite a comparação entre a performance do modelo proposto e os trabalhos presentes na literatura. Em (LI, 2015) obteve-se uma força eletromagnética de 339N para uma potência consumida de 480W. Já o sistema do presente trabalho atinge a força de 231,1 N para uma potência de 150 W, ou seja, o primeiro obteve 0,706 N/Watt enquanto o segundo 1,54 N/Watt. Isto permite notar uma maior eficiência quando comparado com o sistema proposto por (YONG, 2017).

Um dos principais parâmetros para sistemas de controle, como o apresentado neste trabalho é o tempo de resposta. A obtenção deste parâmetro foi possível a partir de uma simulação computacional. Foi aplicado um degrau de corrente e, com isso, obtém-se a Figura 6.

A resposta do conjunto ao degrau demonstra algumas características relevantes. A primeira delas é a existência de um overshoot de aproximadamente 35% que, tem pouco impacto na performance de frenagem por seu período de duração ser menor que 10 ms. A segunda, é o erro em regime estacionário de 4 N, ou seja, um erro inferior a 0,1%.

Figura 6 – Resposta do sistema hidráulico proposto para o degrau de corrente no eletroímã

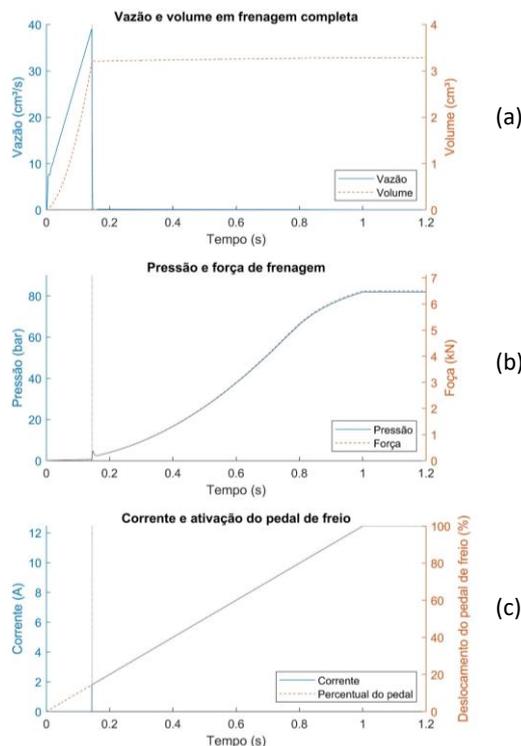


Fonte: Do próprio autor

Para (LI, 2015), o tempo resposta de seu sistema foi de 17ms para um aumento de 50 bar ou 2,94 bar/s. Contudo, o sistema deste trabalho apresenta um tempo de resposta de 17,92ms para um aumento de 80 bar ou 4.47 bar/s, representando performance 1,52 vezes melhor.

Como descrito anteriormente, estas condições partem da premissa de que no momento da ativação do pistão, a pastilha de freio já está em contato com o disco de freio. Portanto, na Figura 7, observa-se a ativação do freio pelo piloto e as duas fases desta ativação. Na primeira, o piloto exerce o deslocamento de fluido utilizando sua própria força. Enquanto na segunda, o conjunto de válvulas atua sobre a condição estabelecida de pressão, fazendo com que apenas o pistão possa atuar sobre a pastilha. As duas etapas da frenagem são separadas pela linha vertical no tempo de 0.14 segundos

Figura 7 – Demonstração do funcionamento do sistema proposto



Fonte: Do próprio autor

O gráfico da Figura 7(a) mostra como o deslocamento de fluido na primeira etapa é elevado, resultado do grande deslocamento da pastilha até o disco. Porém, após os 0.14 s, esta vazão torna-se insignificante e valida os cálculos feitos na sessão V. No gráfico 7(b), é possível observar como o aumento da pressão provoca apenas a compressão do fluido, não havendo vazão relevante. Por fim, o gráfico 7(c) demonstra, a partir da curva de corrente, que o pistão foi ativado logo após a pastilha tocar o disco.

5 CONCLUSÃO

A partir dos resultados, é possível concluir que o sistema proposto neste trabalho é viável. A substituição dos atuadores tradicionais por um eletroímã resultou em um sistema com melhor tempo de resposta e com menor variação durante a modulação do torque de saída.

Cada uma das situações de frenagem propostas foram efetuadas com sucesso pelo sistema proposto e demonstram performance acima da média dos sistemas encontrados na literatura. Também foi possível validar que o comportamento do piloto tem grande influência sobre a eficiência encontrada durante a frenagem regenerativa.

Por fim, a simulação deixou claro os benefícios deste sistema aos veículos de competição estudantil Fórmula SAE, ao exibir os níveis de energia que podiam ser recuperados para cada uma das frenagens.

Agradecimentos

Agradecemos à instituição CEFET-MG (Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais) pelo suporte no desenvolvimento desta pesquisa e a todos que, por meio desta, contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho. Agradecemos também ao professor Sudhoff pela disponibilização de seu algoritmo genético para otimização de máquinas elétricas.

REFERÊNCIAS

Bosch Mobility Solutions IPB. Disponível em: <https://www.bosch-mobility-solutions.com/en/products-and-services/passenger-cars-and-light-commercial-vehicles/driving-safety-systems/integrated-power-brake/> . Acesso em: 03 mar. 2021.

Bosch Mobility Solutions iBooster. Disponível em: <https://www.bosch-mobility-solutions.com/en/products-and-services/passenger-cars-and-light-commercial-vehicles/driving-safety-systems/brake-booster/ibooster/> . Acesso em: 03 mar. 2021.

BREMBO. Moto Brembo, 2020. Disponível em: http://moto.brembo.com/en/media/product/brake_fluid_brembo_racing#:~:text=Brembo%20Racing%20LCF%20600%20PLUS,Brembo%20Racing%20LCF&text=It%20has%20a%20low%20compressibility,generally%20between%202000%20and%204000km . Acesso em: 10 out. 2020.

Brunetti, Franco. **Mecânica dos Fluidos**. 2. ed, São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008

Continental Solutions for Passenger Cars MK-C1 EVO, Disponível em: <https://www.continental-automotive.com/en-gl/Passenger-Cars/Safety/Products/Brakes/Electronic-Brakes/MK-C1/MK-C1-EVO> . Acesso em: 03 mar 2021

DOS SANTOS, Gustavo Carvalho Martins. **Projeto e Dimensionamento de Um Sistema de Freios Aplicado a um Veículo Fórmula Sae**. 2014. Monografia – Curso de Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <http://repositorio.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10011351.pdf>. Acesso em: 16 jul. 2020:

EHSANI, Mehrdad; GAO, Yimin; EMADI, Ali. **Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles**. 3a. ed. CRC Press, 2018

FIA Formula E. Disponível em: <https://www.fiaformulae.com/> . Acesso em: 07 mar. 2020.

GONG, Xiaoxiang; GE, Weiguo; YAN, Juan; ZHANG, Yiwei; GONGYE, Xiangyu. Review on the Development, Control Method and Application Prospect of Brake-by-Wire Actuator. **Actuators**, 2020

KWON, M.; PARK, J.; GWAK, G.; HUH, J.; CHOI, H.; HWANG, S. Cooperative control for friction and regenerative braking systems considering dynamic characteristic and temperature condition. **International Journal of Automotive Technology**, 2016. v.17, pp. 437-446

LI, X; CHANG, S; GONG, X; Modeling of a new brake by wire system based on the direct-drive electro-hydraulic brake unit, **2015 IEEE Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC)**, 2015, pp. 211-215

Revista Quatro Rodas. **Alemanha quer proibir carros a combustão até 2030**. Disponível em: <https://quatrorodas.abril.com.br/noticias/alemanha-quer-proibir-carros-a-combustao-ate-2030/> . Acesso em: 03 mar. 2021.

Sudhoff, Scott. **Power Magnetic Devices: A Multi-Objective Design Approach**. 1. ed, New Jersey: John Wiley & Sons, 2014.

WWF. O Papel dos Veículos Elétricos na Economia Limpa, **Clima & Energia**, 2017

YONG, Jiawang; GAO, FENG; DING, Nenggen; HE, Yuping. Design and validation of an electro-hydraulic brake system using hardware-in-the-loop real-time simulation. **International Journal of Automotive Technology**, 2017. v.18, pp. 603-612.

YOONG, M.K.; GAN, Y.H.; GAN, G.D. Studies of regenerative braking in electric vehicle. **2010 IEEE Conference on Sustainable Utilization and Development in Engineering and Technology**, Malaysia, v.1, n.1, pp. 40-45, 2010.

YUAN, Y.; ZHANG, J.; GAN, G.D. Studies of regenerative braking in electric vehicle. **2010 IEEE Conference on Sustainable Utilization and Development in Engineering and Technology**, Malaysia, v.1, n.1, pp. 40-45, 2010.

YUAN, Y; ZHANG, J; Li, Y; Li, C; A Novel Regenerative Electrohydraulic Brake System: Development and Hardware-in-Loop Tests. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 67, n.12, pp. 11440-11452, 2018

YU, Li; LIU, X. Analysis of Energy Consumption on Typical Main Cylinder Booster Based Brake-by-Wire System. **SAE Technical Paper Series**, 2016

ZHU, F.; GUO, H.; XU, W.; LIU, J.; CHEN, H.; Lv, Y. Modeling of a Novel Brake-by-wire (BBW) System for Electric Vehicle Based on Dual Closed - loop PID. **2019 Chinese Control And Decision Conference (CCDC)**, 2019, pp. 6144-6149

ACTUATOR FOR A BRAKE-BY-WIRE BRAKE SYSTEM APPLIED TO ELECTRIC MOTORSPORT CARS

Abstract: *With the advancing popularity of electric vehicles, new challenges arise every day. One of these challenges is the development of a brake system capable of integrating hydraulic and regenerative torque simultaneously. This work proposes a brake-by-wire system for a Formula SAE competition vehicle. The author proposes the replacement of conventional actuators by an electromagnet developed from the use of a genetic algorithm. The whole system was designed and analyzed through computer simulations and it is concluded that the development proposed in this work presented satisfactory dynamic characteristics, such as the improvement of response time.*

Keywords: *Regenerative braking, Electromagnet, Brake-by-Wire, Electric vehicle, Formula SAE*