Insper

Engenharia Mecânica

Relatório Final de Iniciação Tecnológica

Luís Antônio Bordignon de Oliveira

Orientador: Carlos Eduardo de Brito Novaes

Freio regenerativo: Aplicação e efeito de métodos de controle para aumentar a eficiência de energia em carros elétricos.

São Paulo

2024

Resumo

A frenagem regenerativa é uma tecnologia é um método que permite recuperar parte da energia cinética de um veículo durante a frenagem, ao contrário dos sistemas tradicionais. Essa energia é convertida em eletricidade e armazenada, melhorando o desempenho energético do veículo.

Com isso, há o desafio de carregar a bateria, que tem tensão maior à gerada pelo motor durante a frenagem. Assim, será abordado duas técnicas. A primeira, um circuito *buck-boost chopper* e um regime especial de capacitores que cria pulsos de tensões elevadas. A pesquisa combina modelagens analíticas e simulações computacionais no software Matlab/Simulink.

Os resultados iniciais mostraram necessidade de buscar uma abordagem alternativa, visto que não foi atingido a recuperação de energia esperada durante a simulação. Também, é importante destacar a importância da otimização dos parâmetros para o desempenho do sistema.

Foi identificado a importância do impacto da frequência do PWM e velocidade final na eficiência da recuperação de energia. Assim, sabe-se o primeiro atua em papel fundamental no resultado final da simulação, e o segundo se mantém indiferente. Também, é inerente o apoio do tempo de frenagem, velocidade inicial e corrente de frenagem no desempenho da simulação.

Assim, é concluído que é possível a recuperação de energia na frenagem de veículos elétricos, por meio de circuitos elevadores de tensão, além de fatores externos, como intensidade da frenagem, terem forte influência na performance do sistema. Para justa comparação, recomenda-se simular condições específicas, baseadas na competição de eficiência energética Shell Eco-Marathon, que ocorre no Rio de Janeiro anualmente.

Palavras-chave: Frenagem regenerativa, Eficiência energética, *Buck-Boost,* Simulação, MatLab.

Abstract

Regenerative braking is a technology that allows for the recovery of part of a vehicle's kinetic energy during braking, unlike traditional systems. This energy is converted into electricity and stored, improving the vehicle's energy performance.

However, there is a challenge in charging the battery, which has a higher voltage than what is generated by the motor during braking. To address this, two techniques will be explored: the first involves a buck-boost chopper circuit, and the second uses a special capacitor regime that creates high voltage pulses. The research combines analytical modeling and computer simulations using Matlab/Simulink software.

Initial results showed the need for an alternative approach, as the expected energy recovery was not achieved during the simulation. Additionally, it is important to emphasize the need for optimization of system parameters to enhance performance.

It was identified that the frequency of the PWM and final speed significantly impact the efficiency of energy recovery. The PWM frequency plays a crucial role in the final simulation results, while the final speed remains indifferent. Moreover, factors such as braking time, initial speed, and braking current inherently support the simulation's performance.

Thus, it is concluded that energy recovery during braking of electric vehicles is possible through voltage-boosting circuits, with external factors like braking intensity having a strong influence on system performance. For fair comparison, it is recommended to simulate specific conditions based on the Shell Eco-Marathon, an energy efficiency competition held annually in Rio de Janeiro.

Keywords: Regenerative breaking, energy efficiency, Buck-Boost, Simulation, MatLab.

Sumário

Introdução 5
Objetivo 6
Metodologia 6
Técnica I 6
Técnica II 7
Revisão bibliográfica: Manuais de Bancada LabVolt 7
Modelagem e simulação do *buck-boost chopper* 8
Modelagem analítica 10
Mudança de escopo 13
Frequência do PWM ou velocidade final ideal 13
Pontos ótimos de operação 16
Conclusão 20
Referências 21

Introdução

Os meios de transporte são vitais para a vida atual, e permitem rápido deslocamento para atividades cotidianas ou grandes viagens. O carro movido à combustão é uma das alternativas mais populares, porém há dois grandes problemas: sua aceleração depende de um motor movido à combustível fóssil, com eficiência de cerca de 30%[1], e a desaceleração decorre da transformação da energia cinética do conjunto em calor, vibrações e som, através dos freios mecânicos. Isso acontece de maneira que inviabiliza a recuperação da energia incialmente adicionada ao sistema. Assim, não só próprio método de conversão de energia, o motor à combustão, possui baixo aproveitamento, como o sistema de frenagem solidifica, de maneira inerente, a perda desta carga.

Com esta situação em mente, há uma alternativa que usufrui de mais eficiência: motores elétricos. Esta classe possui alta eficiência energética, e é passível de sediar o recurso de freio regenerativo que, ao invés de dissipar a energia cinética em calor, recupera parte dela ao carregar novamente a bateria ou até substituí-la temporariamente. Isso é possível devido à diferentes técnicas e abordagens de software e hardware – um exemplo utilizado é o KERS (Sistema de Recuperação de Energia Cinética, em português) eletrônico, utilizado em alguns veículos de corridas esportivas. Ademais, a aplicação destes métodos deriva da modelagem e verificação de qual alternativa acarreta maior eficiência para o objetivo daquele sistema. Deste modo, esta pesquisa acolhe a escolha e teste de diferentes métodos para aumentar a eficiência de um carro elétrico através da tecnologia de frenagem regenerativa.

[1] https://www.linkedin.com/pulse/eficiência-energética-do-motor-de-combustão-interna-andré-fusco/

Objetivo

O objetivo desta iniciação tecnológica é o estudo e exploração de diferentes técnicas de controle para a aplicação de freio regenerativo em carros elétricos. Este projeto visa recuperar a energia que seria transformada em calor pelo sistema de freios tradicionais, e utilizá-la para acelerar o carro novamente – de maneira que aumente a eficiência energética do veículo. Também, é previsto que este projeto possa ser testado por meio de um aparato experimental em laboratório que represente um sistema geral de aplicação em veículos em ambiente de corrida. Além disso, o exemplo de aplicação previsto é o carro Bolt, do Insper Mileage – preparado para participar da Shell Eco-Marathon, competição sediada no Rio de Janeiro, RJ.

Durante a frenagem, o motor se comporta como um gerador, mas a tensão produzida por ele será menor ou, no melhor caso, igual à tensão nominal da bateria. A grande dificuldade em reaproveitar a energia produzida pelo motor é que se faz necessária uma tensão superior à tensão nominal da bateria para estabelecer um regime funcional de carregamento.

Surgem, então, duas possíveis abordagens para contornar esse problema:

1. A primeira utiliza um circuito elevador de tensão independente (*step-up* ou *boost*) que aumenta a tensão gerada pelo motor e permite a carga da bateria.
2. A segunda faz uso da própria indutância do motor e de um regime especial de chaveamento para conseguir induzir pulsos de tensão mais elevada e assim obter o carregamento da bateria.

Metodologia

Técnica I

Modelar o comportamento elétrico e mecânico de um motor, bem como seu acionamento elétrico e modelo de carga/descarga das baterias. Em seguida, em ambiente de simulação, como Matlab/Simulink, ensaiar a abordagem de frenagem regenerativa escolhida e verificar o consumo energético com e sem a aplicação de frenagem regenerativa, em condições diversas - diferentes perfis de velocidade, aceleração, frequência, intensidade das frenagens, entre outros.

Técnica II

Construção de um sistema de ensaios com um motor (Brushed DC Motor ou Brushless/BLDC), roda de inércia para emular a carga mecânica, sistema de freio mecânico (caso possível) e sistema de acionamento elétrico. Instrumentar o aparato de forma a conseguir monitorar potências elétricas, mecânica, calcular desempenho e avaliar a economia de energia, nos mesmos moldes da técnica I.

Revisão bibliográfica: Manuais de Bancada LabVolt

Para o início do projeto, é necessário considerar os conhecimentos iniciais do estudante vindos da base de engenharia: funcionamento de circuitos elétricos e introdução ao controle de sistemas dinâmicos. Tendo isso em vista, é vital a capacitação mais aprofundada na área para a realização do projeto. Assim, os manuais de bancada LabVolt foram escolhidos para esta função.

A partir deste material, é introduzida a ideia do funcionamento de freio regenerativo em um circuito básico (do tipo *buck-boost*), que baseia sua parte dinâmica em duas chaves, que podem ser controladas por um PWM. Este circuito pode ser visualizado pela figura 1:

Fonte: Manual de bancada LabVolt

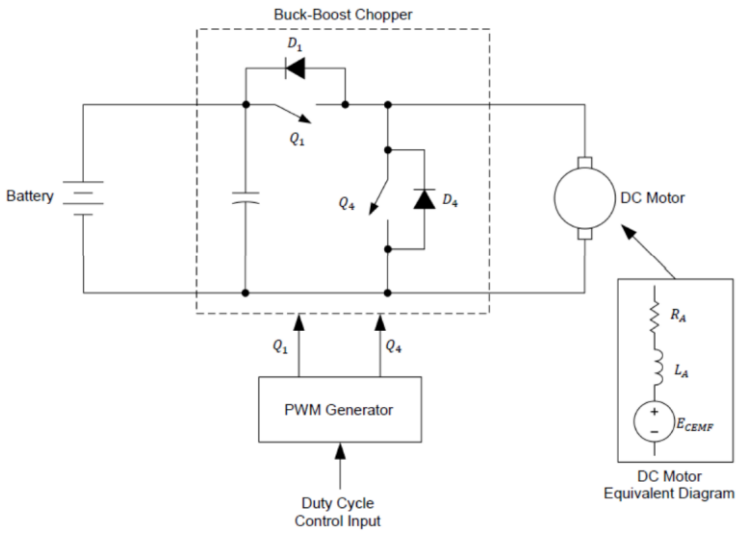

Figura 1: circuito base (*buck-boost*) que possibilita a frenagem regenerativa.

Para entender seu funcionamento, é possível dividir a dinâmica em duas partes. A primeira seria a aceleração do motor, com a chave Q_1 fechada e Q_4

aberta, de modo que o motor seja energizado pela bateria diretamente. Já a segunda seria frenagem e regeneração – note que são duas partes distintas, possibilitadas por um controlador PWM. Este irá alternar as chaves de maneira que, quando uma estiver fechada, a outra estará aberta.

Quando a Q_1 estiver fechada, ocorre a recarga da bateria, e quando a Q_4 estiver fechada, ocorre o curto do motor, que ocasionará no fenômeno da autoindutância: um campo magnético gerará força eletromotriz contrária na corrente elétrica da fiação e forçará a parada.

Este modelo de circuito foi escolhido pela sua simplicidade e capacidade de ser alterado de maneira ágil. Com estes conhecimentos em mente, teve início a capacitação na biblioteca Simscape do software MatLab / Simulink. Essa extensão permite a integração de sistema dinâmicos variados, como a união da parte mecânica e elétrica de um veículo.

Modelagem e simulação do *buck-boost chopper*

Desta maneira, teve início a simulação no Simscape. O circuito é mostrado na figura 2, abaixo:

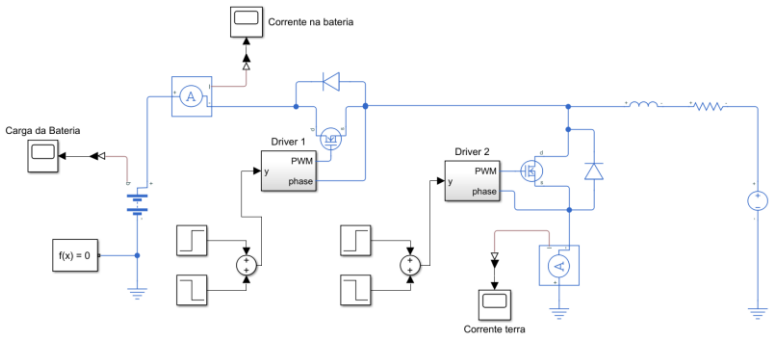

Figura 2 – Circuito (MatLab / Simulink)

Esta montagem equivale ao sistema mostrado na Figura 1. Perceba que há três *scopes,* ferramentas da plataforma para visualização do comportamento das formas de onda nos pontos chave: corrente na bateria e transistor Q2 (nomeado “terra”), e também a carga da bateria. Os *drivers,* nomeados “1” e “2”, controlam quando a simulação deve estar nos três modos explicados nos conceitos.

A simulação rodou sem erros computacionais, porém não foi obtido o resultado esperado. Para a reprodução do ambiente de um carro real, na primeira metade do tempo, foi determinado nos drivers que o motor acelerasse, e na segunda freasse – com regeneração. Nas figuras abaixo (3, 4 e 5), é mostrado as representações dos resultados obtidos nas simulações.

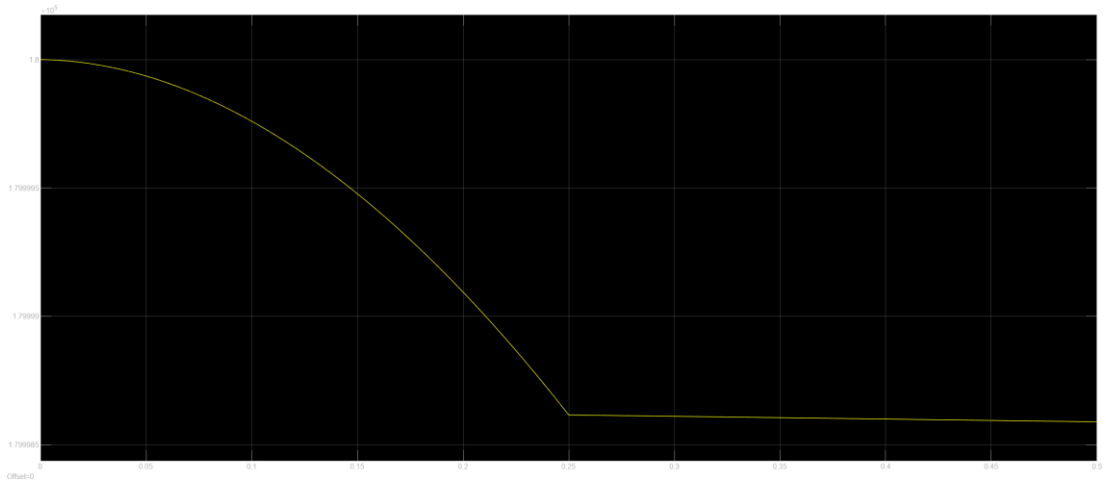

Figura 3: Carga da bateria

Nas figuras 4 e 5, a comutação realizada fez uso de um PWM, com frequência igual a 20 kHz. Isso explica a “faixa” na primeira metade do eixo horizontal dos gráficos.

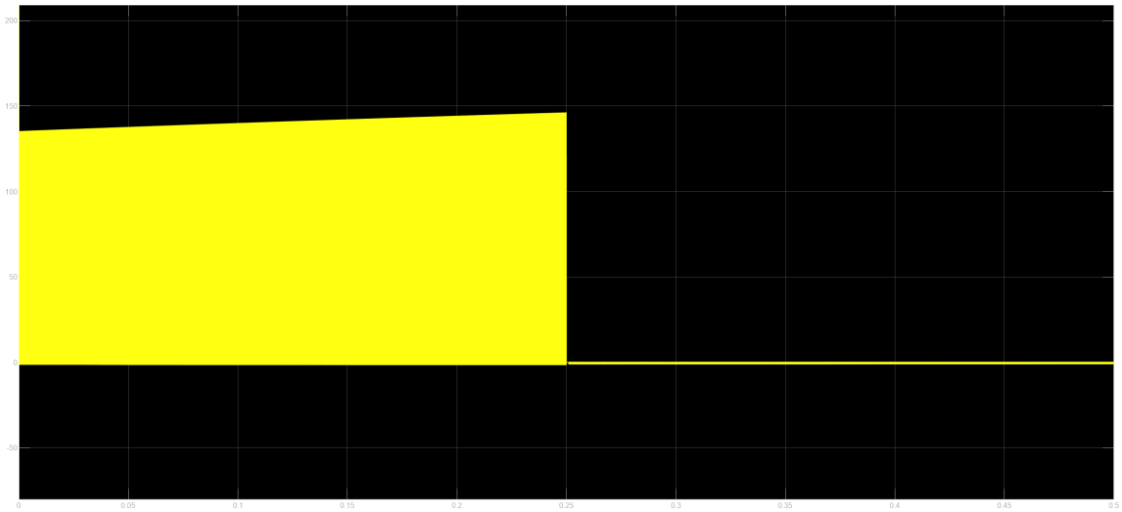

Figura 4: Corrente na bateria

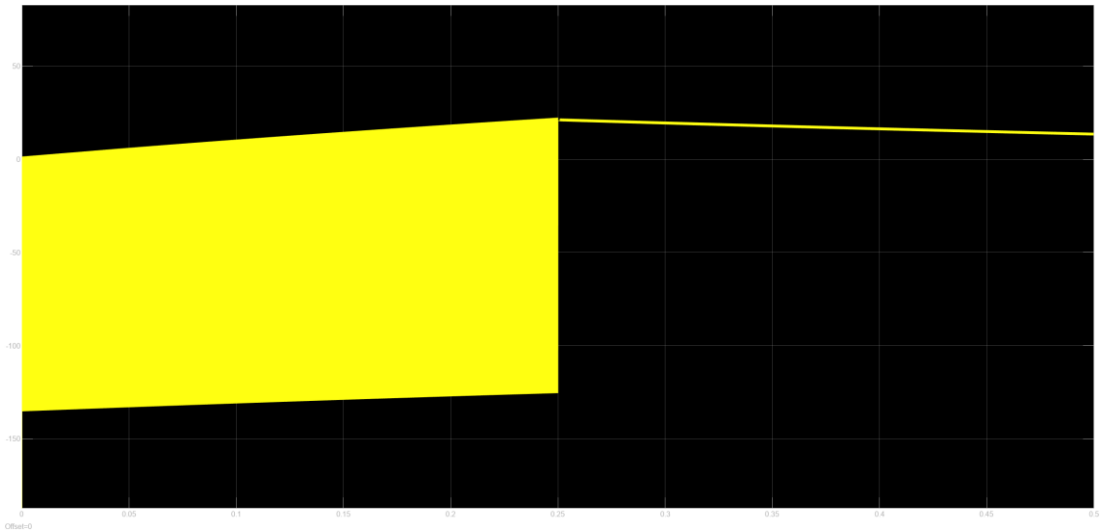

Figura 5: Corrente no terra (transistor Q2)

É possível perceber, na figura 3, na primeira metade de tempo que a carga diminui (como esperado). Porém, na segunda continua a diminuir (ao invés de recuperar energia) – apesar deste comportamento não ser esperado, o modelo indica ser inicialmente coerente, visto que o resultado obtido é crível na situação atual. Também, note que as figuras são representações dos resultados, porque esse comportamento peculiar se repete ao testar diferentes valores dos parâmetros, baseados no motor atual utilizado no veículo do Insper Mileage.

Este resultado inconsistente deriva de duas possibilidades: parâmetros do circuito arbitrários, seja valores dos componentes ou da regulagem do PWM. Assim, é dado início à modelagem matemática do circuito e seu modo de operação.

Modelagem analítica

A estratégia de modelagem utilizada no artigo *High-efficiency two-switch tri-state buck–boost power factor correction converter with fast dynamic response and low-inductor current ripple,* publicado em 2012, serviu de inspiração para elaborar um modelo analítico que possamos simular de forma eficiente. A estratégia adotada consiste em aproximar a corrente no indutor por trechos de reta e determinar a variação média de corrente ao longo de cada período de PWM, como função do ciclo ativo e da velocidade do motor.

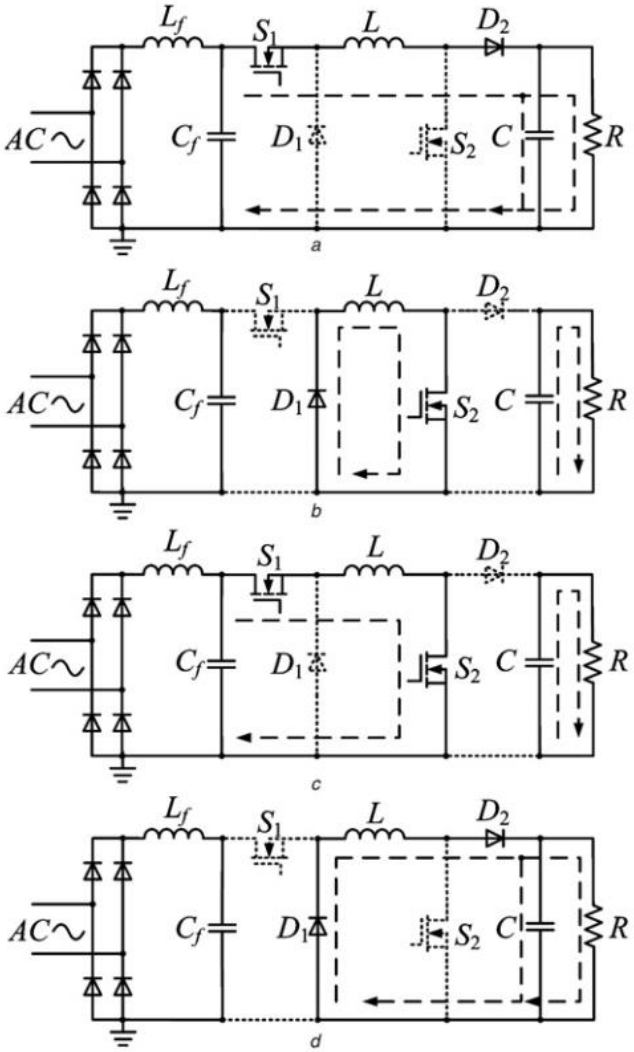

Figura 6 – Modos de operação do circuito buck chopper. (Fonte: Wang et al., 2022).

Para o controle da corrente no motor elétrico, é necessário modificar a tensão que atua sobre ele. Isso é possível utilizando a equação:

$$i(t) = \frac{1}{L}\int_{t_0}^{t} V_L(t) \cdot dt$$

Esta equação evidencia que a corrente no indutor depende da integral da tensão aplicada. Desta maneira, é possível utilizar o chaveamento dos transistores (controlado pelo PWM) para aplicar tensões diferentes no indutor, que variam entre valores máximos e mínimos.

Com isso em mente, na modelagem, o circuito terá 4 fases de funcionamento:

1. Etapa A, onde o transistor Q1 é ligado;

2. Etapa Ba, onde os transistores estão desligados e a corrente é maior que zero;
3. Etapa Bc, onde os transistores estão desligados e a corrente é menor que zero;
4. Etapa C, onde o transistor Q2 é ligado.

Ademais, é levado em consideração que as os dois transistores nunca devem estar conduzindo de forma simultânea.

Abaixo, há ilustração das diferentes etapas e fluxo de corrente destacado.

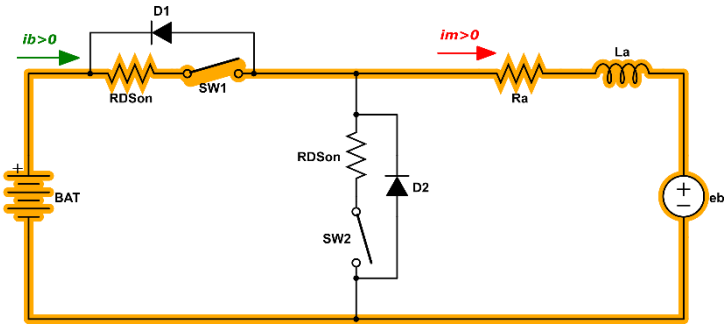

Figura 7 – Etapa A (bateria impulsiona o motor)

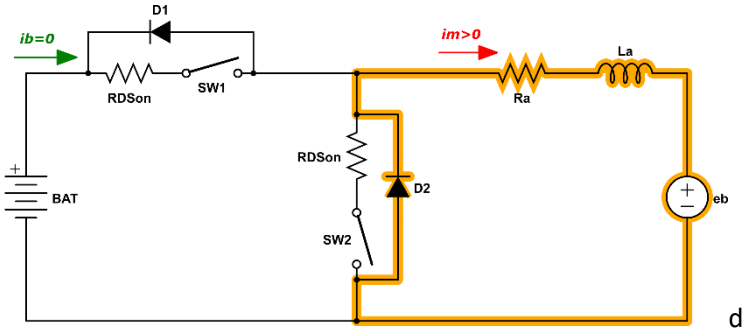

Figura 8 – Etapa Ba (transistores desligados, corrente mantida pelo diodo de corpo do transistor SW2)

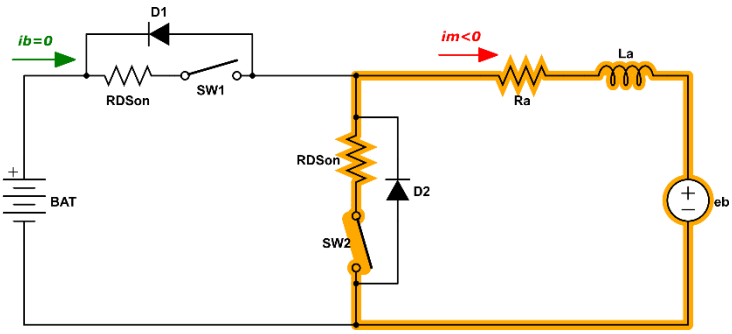

Figura 9 – Etapa C (fechamento do transistor SW2, tendo recirculação da corrente gerada pela tensão contraeletromotriz do motor. Corrente real negativa no motor, contrária à seta adotada na imagem)

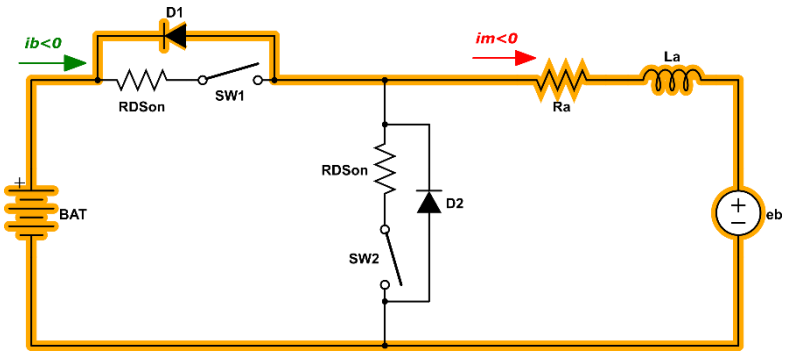

Figura 10 – Etapa Bc (corrente do motor flui para a bateria pelo diodo do transistor SW1, recuperando energia. Corrente real negativa no motor, contrária à seta adotada na imagem)

Mudança de escopo

Devido aos resultados obtidos, é notável que foram encontradas mais dificuldades que o previsto para a simulação e obtenção de resultados com o circuito *buck-boost.* Consequentemente, foi decidido que deve ser dedicado mais tempo e esforços nesta parte teórica do projeto. Desta forma, também é factível realizar a substituição da aplicação prática no veículo do Mileage com os testes de bancada. Ou seja, o foco desta iniciação deve se embasar na modelagem matemática e simulação, e os testes práticos ocupam posição secundária no escopo.

Além disso, é importante salientar o motivo de não estar sendo utilizado modelagens já prontas para a pesquisa. Isso acontece porque a grande maioria destes modelos utilizam um motor trifásico, o que seria uma barreira de entrada para o estudante em questão na iniciação. Um caso mais simples, com motor DC, permite um melhor ambiente de estudo e aplicação dos conceitos, sendo uma estrutura mais eficiente. Assim, acontece a necessidade das etapas de trabalho originais.

Frequência do PWM ou velocidade final ideal

Para descobrir se a frequência do PWM ou velocidade final de frenagem pode impactar na recuperação de energia, é possível realizar a simulação com diferentes valores destes parâmetros e comparar os resultados. A tabela 1 evidencia todas as simulações realizadas

Simulação	Velocidade final (rad/s)	Frequência do PWM (kHz)

1	0.02%	1
2	0.02%	5
3	0.02%	20
4	0.02%	100
5	50%	1
6	50%	5
7	50%	20
8	50%	100

Tabela 1 – Valores de frequência de PWM e velocidade final por simulação.

Os resultados destas simulações podem ser vistos na tabela 2.

Simulação	Tempo de frenagem (s)	Energia recuperada (%)
1	5.84	32.12
2	5.84	11.33
3	5.84	7.44
4	5.84	6.40
5	2.98	32.12
6	2.98	11.33
7	2.98	7.44
8	2.98	6.40

Tabela 2 – Resultados das simulações variando velocidade final e frequência do PWM.

Destes valores, são construídos os gráficos da figura 11, que mostra o tempo de frenagem, e a figura 12, que mostra a energia recuperada na escala logarítimica.

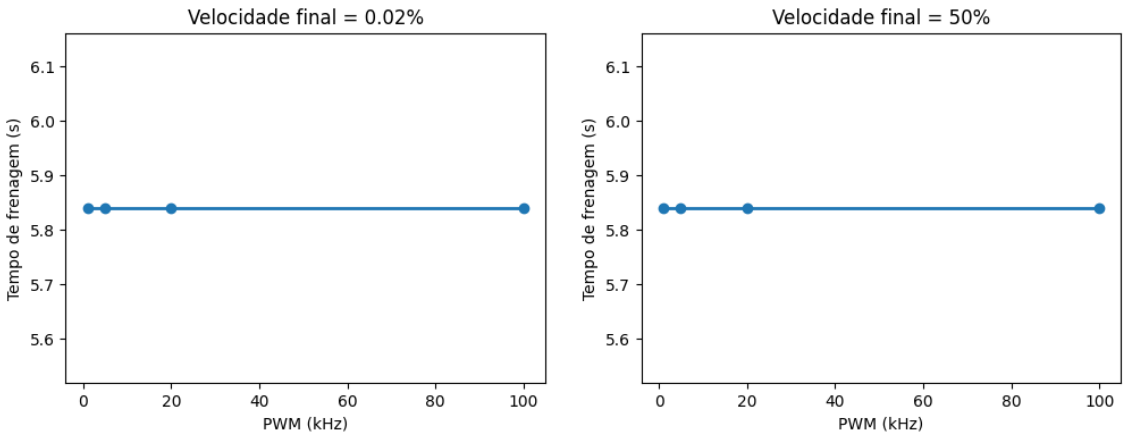

Figura 11 – Tempo de frenagem por velocidade final

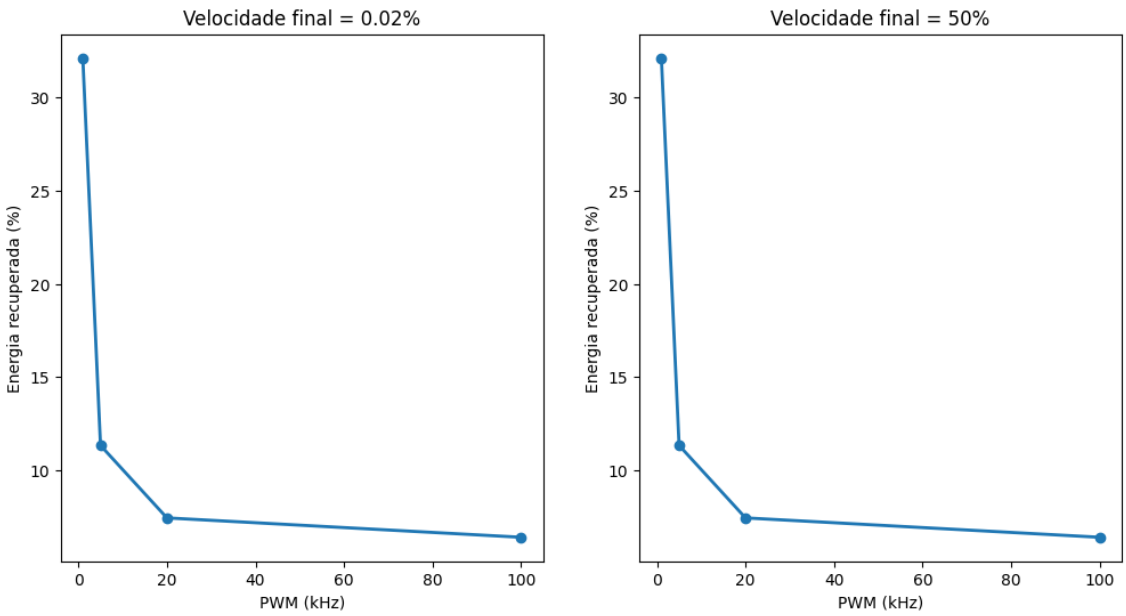

Figura 12 – Energia recuperada por velocidade final

Das tabelas 1 e 2 e gráficos 11 e 12, conclui-se que a velocidade final de frenagem não influencia na energia recuperada, apenas no tempo que demora para chegar da velocidade inicial à final. Também, quanto menor a frequência do PWM, mais energia é recuperada. É importante salientar que o grande percentual de energia recuperada nas frequências mais baixas de PWM pode ser resultado da aproximação da derivada da corrente para uma constante. Por isso, quanto maior a frequência, mais real é a simulação, e também o tempo para ser executada.

Nesta simulação anterior, o trabalho do PWM foi construído manualmente utilizando ferramentas do MATLAB. Como parte das melhorias implementadas, foi utilizado um bloco próprio de PWM, o que aprimorou o tempo de simulação, pois ele é otimizado pelo próprio software para realizar suas operações. Nas simulações de mesma velocidade inicial, foi aproveitado que a parte antes da frenagem é a mesma, e simulado apenas uma vez, e colocado como ponto de partida para as frenagens com diferentes correntes – assim, só é feita uma simulação de aceleração, como melhoria. Também, quando atingido a velocidade prevista pós frenagem, a simulação é interrompida.

Além disso, foi realizada uma nova modelagem que incluiu a adição da perda de energia de atrito do motor. Contudo, essa alteração resultou em uma recuperação de energia superior a 100%, o que viola a primeira lei da termodinâmica e indica a presença de alguma deficiência na modelagem ou na sua aplicação.

Assim, com estes resultados, foi feita a decisão de continuar o projeto utilizando uma abordagem diferente.

Pontos ótimos de operação

A recuperação de energia nas simulações depende de alguns diferentes parâmetros do próprio circuito, e também da operação. Nesta seção, será explorando como estas variáveis influenciam na recuperação.

As figuras mostradas neste tópico evidenciam a taxa de recuperação de energia. Os eixos *I braking* [A] e *Initial Speed* [rad/s] são constantes nas figura. O primeiro representa a corrente prevista a ser gerada no circuito a partir do motor como gerador, e o segundo é a velocidade inicial imediatamente antes da frenagem. Já o eixo vertical é diferente em cada figura, sendo evidenciado na respectiva descrição.

Dessas figuras, a 13 e 14 evidenciam como os valores da corrente de frenagem e a velocidade inicial influenciam na taxa de recuperação de energia. A primeira utiliza como referência a taxa de recuperação como energia recuperada dividida pela energia total disponível (cinética), representada pela equação:

$$E_{\text{cinética}} = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega^2$$

Onde J é a inércia e ω a velocidade angular. Já a segunda imagem faz uso da taxa de recuperação como energia recuperada dividida pela energia disponível, excluindo as perdas mecânicas:

$$E_{\text{viável}} = E_{\text{cinética}} - P_{\text{mecânica}}$$

Em linhas gerais, considerando as definições apresentadas para as duas taxas de recuperação, o gráfico da Figura 13 comunica mais sobre o rendimento geral de todo o sistema (mecânico e eletrônico), e o gráfico da Figura 14 permite avaliar melhor o rendimento apenas do sistema eletrônico.

A figura 13 demonstra um comportamento diferente para baixas e altas velocidades. Em baixas, a taxa de recuperação é menor, devido à dinâmica do circuito, que exige manter a chave Q4 com um duty cycle maior, o que reduz o tempo efetivo de recarga da bateria. Em altas, a taxa de recuperação é favorecida por maiores correntes de frenagem, o que realiza uma desaceleração mais abrupta e rápida, causando menos perdas mecânicas, como atrito, no processo.

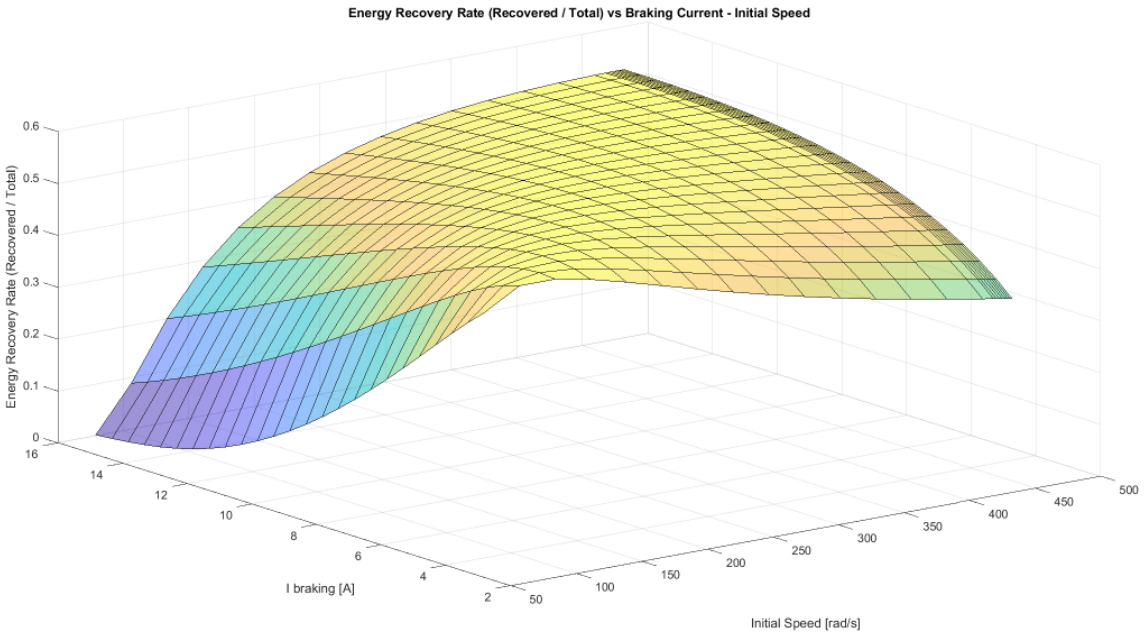

Figura 13 – Taxa: $\frac{E_{\text{recuperada}}}{E_{\text{total}}}$

O resultado da figura 13 sugere que há uma corrente ideal de frenagem em função da velocidade do motor. É possível notar que, ao operar com uma frenagem mais vigorosa (corrente de frenagem maior) quando a velocidade for mais elevada, e reduzindo essa corrente de frenagem à medida que a velocidade vai também diminuindo, pode-se maximizar o rendimento. Para isso, deve ser veficado antes se o comportamento desse perfil ideal de frenagem é compatível com o estilo de pilotagem e segurança na execução da prova.

A figura 14 mostra que quanto maior a velocidade inicial, maior a taxa. Isso acontece por causa de como a taxa é calculada. Como ela considera apenas a energia viável de ser recuperada, esclarece mais a relação diretamente proporcional da velocidade, e inversamente da corrente de frenagem, em relação à taxa de recuperação.

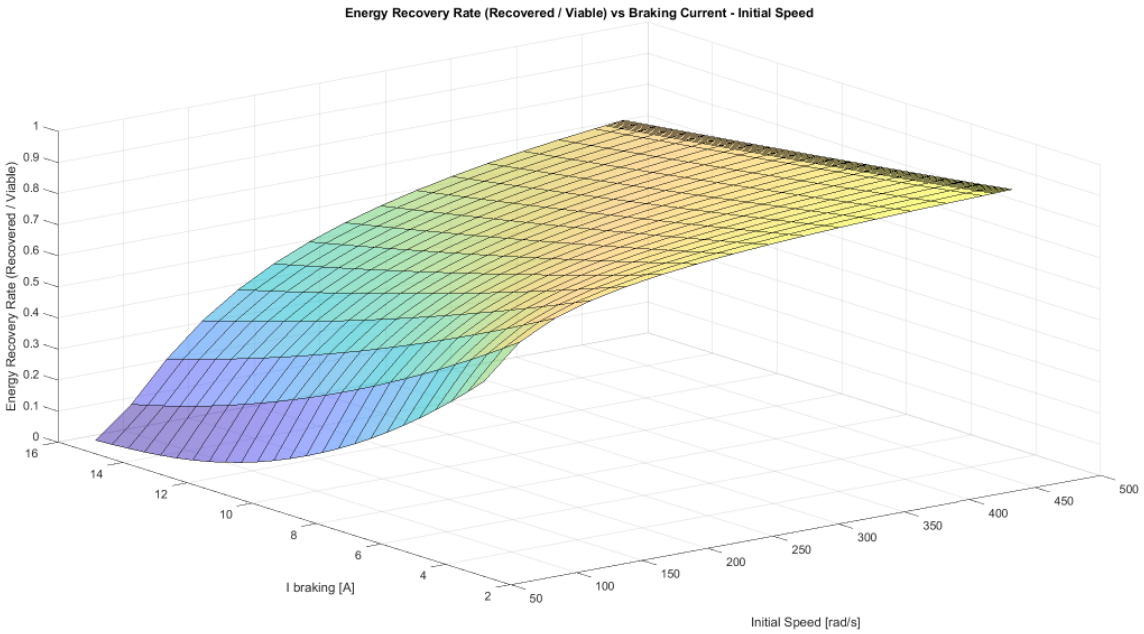

Figura 14 - Taxa: $\frac{E_{\text{recuperada}}}{E_{\text{Viável}}}$

O resultado da figura 14 permite inferir que o rendimento do circuito eletrônico é favorecido em correntes de frenagem menores. Possivelmente, isso ocorre porque o tempo em que é necessário manter o motor em curto-circuito (transistor Q4 fechado) é menor, sobrando mais tempo para que a corrente reversa na indutância do motor seja injetada na bateria.

A figura 15, devido ao seu eixo vertical representar a própria energia recuperada, em Joules, mostra que em maiores velocidades iniciais e maiores correntes de frenagem, há maior recuperação. Isso acontece porque em maiores velocidades, há mais energia cinética disponível a ser recuperada, e em maiores correntes de frenagem, porque a desaceleração é mais rápida, resultando em menos perdas por atrito e calor.

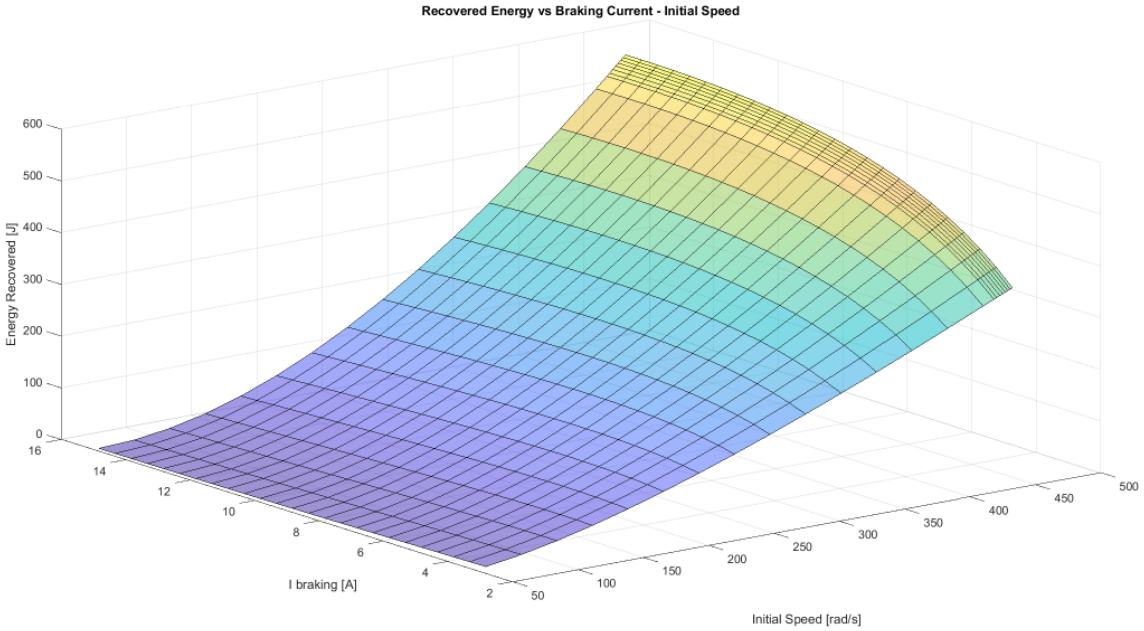

Figura 15 – Unidade: Energia recuperada [J]

A figura 16 aborda o tempo de frenagem, em segundos. A partir desta figura, conclui-se que quanto menor a corrente de frenagem, e maior a velocidade inicial, maior o tempo de frenagem – como discutido na figura anterior, o que pode ocasionar mais perdas de energia por atrito.

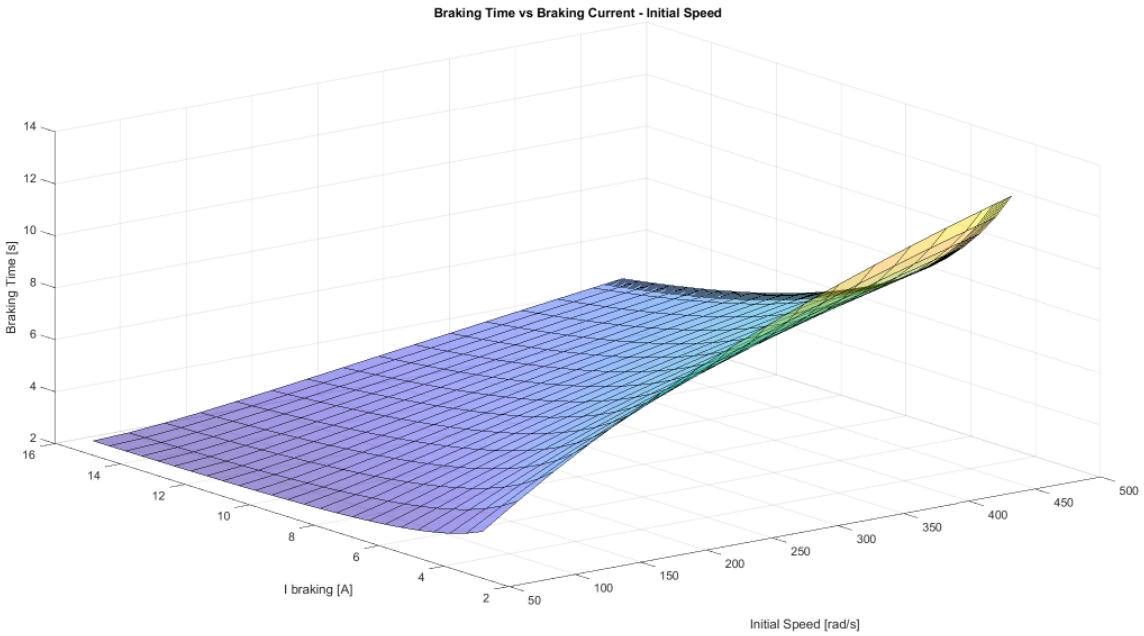

Figura 16 – Tempo de frenagem [s]

Conclusão

Esta pesquisa conclui que é possível recuperar a energia investida no movimento de um veículo ao freá-lo. Isso é possível devido aos métodos de elevação de tensão, para que a tensão que o motor gera seja maior que a da bateria. Havia o objetivo de encontrar um ponto ótimo para a medição. Porém, conforme o estudo avançou, se torna mais claro que os fatores externos à eletrônica são muito importantes para esta métrica. Não é possível ter controle desses parâmetros, como intensidade de frenagem que o piloto irá utilizar ou formato da pista. Assim, a dependência dessas situação exteriores é real, e a conciliação do projeto eletrônico com esses eventos não é clara.

Foi esperado concluir os ensaios e comparações com a segunda estratégia. Era objetivo como realizar este este experimento, mas não foi possível construir uma elaboração para conferir a recuperação. Há de haver mais aprofundamento para verificar o potencial desta técnica.

Também, percebe-se que a tensão mínima de operação dos circuitos *step up* é de cerca de 6 V. Os gráficos das figuras 13 a 16 mostram que existe uma velocidade mínima em que a taxa de recuperação entra em forte declíneo. Abaixo dessa velocidade, a tensão produzida é em torno de 6V ou menor – impossibilitando uma eficiente, ou até alguma, recuperação. Se, na segunda técnica, for produzido menos de 6 V no banco de capacitores, não é possível recuperar energia. Nesse caso, é necessário uma certa velocidade, ou armazenar algumas frenagens, para que a tensão seja elevada acima desta margem. Em suma, esse valor de 6 V é comum em ambas estratégias, e há a possibilidade de haver algum limite físico que a determina, ou a tecnologia utilizada, como os próprios capacitores.

Por último, recomenda-se a seguinte estratégia para comparar os resultados das técnicas. Uma simulação baseada na corrida da Shell-Eco Marathon, com 20 voltas na pista, com 2 frenagens por volta, até 50% da velocidade inicial. Para este cenário, a técnica que obter a mais taxa de recuperação de energia, será escolhida a mais eficiente. Nota: ferramentas de IA foram utilizadas para revisão do texto.

Referências

• M., Deepa U.; G., Bindu R.. A Novel Switching Scheme for Regenerative Braking and Battery Charging for BLDC motor Drive Used in Electric Vehicle. **IEEE International Power and Renewable Energy Conference**, p. 1-6, 2020.

• BHURSE, Sneha S.; BHOLE, A.A.. A Review of Regenerative Braking in Electric Vehicles. **International Conference on Computation of Power, Energy, Information and Communication (ICCPEIC)**, p. 363-367, 2018.

• BOBBA, Phaneendra Babu; RAJAGOPAL, K.R.. Compact Regenerative Braking Scheme for a PM BLDC Motor Driven Electric Two-Wheeler. **Joint International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems & Power,** India, p. 1-5, 2010.

• ABRAHAM, Peter K.; NAMMBOODIRY, Jayan; MARY, Dolly. Experimental Validation of a Constant Torque Variable Deceleration Regenerative Braking System for a Brushless DC Motor. **2nd International Conference on Power Electronics & IoT Applications in Renewable Energy and its Control (PARC)**, p. 1-6, 2022.

• BECERRA, Roger C.; EHSANI, Mehrdad.; JAHNS, Thomas. Four-Quadrant Brushless ECM Drive with Integrated Current Regulation. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v.28, n. 4, p. 833-841, 1992.

• FUSCO, André. **Eficiência Energética – Eficiência do Motor de Combustão Interna**. Linkedin, 2021. Disponível em: https://www.linkedin.com/pulse/eficiência-energética-do-motor-de-combustão-interna-andré-fusco/. Acesso em: 01 mar. 2024.

• HE, Mingzhi et al. High-efficiency two-switch tri-state buck–boost power factor correction converter with fast dynamic response and low-inductor current ripple. IET Power Electronics, 2012. Disponível em: https://doi.org/10.1049/iet-pel.public.0097. Acesso em: 20 ago. 2024.