v7.n10.2026

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

ANÁLISE DA FRENAGEM REGENERATIVA EM VEÍCULOS ELÉTRICOS POR MEIO DE MODELAGEM MATEMÁTICA

ANALYSIS OF REGENERATIVE BRAKING IN ELECTRIC VEHICLES THROUGH MATHEMATICAL MODELING

ANÁLISIS DEL FRENADO REGENERATIVO EN VEHÍCULOS ELÉCTRICOS MEDIANTE MODELADO MATEMÁTICO

Gabriel Sgarbi Torres[1], Ronaldo Gomes Figueira[2]

e7109247
https://doi.org/10.47820/recima21.v7i10.9247

PUBLICADO: 10/2026

RESUMO

Este trabalho analisa como a frenagem regenerativa pode contribuir para a eficiência energética dos veículos elétricos, com foco na recuperação de energia durante a desaceleração. Para fundamentar o estudo, realizou-se um levantamento bibliográfico sobre veículos elétricos, motores elétricos, baterias e eletrônica de potência. Por meio de uma modelagem matemática simplificada, foi analisada a relação entre a velocidade do veículo, a energia cinética disponível e a quantidade de energia potencialmente recuperada durante a frenagem. Considerando os parâmetros adotados no estudo, diferentes velocidades iniciais foram avaliadas, estimando-se, sob eficiência global teórica de 70%, aproximadamente 0,125 kWh potencialmente recuperáveis em uma frenagem iniciada a 100 km/h. Em um cenário hipotético de 30 frenagens nas mesmas condições, estimou-se uma recuperação acumulada de aproximadamente 3,75 kWh, equivalente a cerca de 6,20% da capacidade nominal de uma bateria de 60,48 kWh. Conclui-se que a frenagem regenerativa apresenta potencial para melhorar o aproveitamento energético dos veículos elétricos, reduzindo parte das perdas presentes na frenagem convencional.

PALAVRAS-CHAVE: Veículos Elétricos. Frenagem Regenerativa. Eficiência Energética. Energia Cinética. Baterias.

ABSTRACT

This study analyzes how regenerative braking can contribute to the energy efficiency of electric vehicles, focusing on energy recovery during deceleration. To support the study, a literature review was conducted on electric vehicles, electric motors, batteries, and power electronics. Through simplified mathematical modeling, the relationship between vehicle speed, available kinetic energy, and the amount of energy potentially recovered during braking was analyzed. Considering the parameters adopted in the study, different initial speeds were evaluated, estimating, under a theoretical global efficiency of 70%, approximately 0.125 kWh of potentially recoverable energy in a braking event starting at 100 km/h. In a hypothetical scenario of 30 braking events under the same conditions, an accumulated recovery of approximately 3.75 kWh was estimated, equivalent to about 6.20% of the nominal capacity of a 60.48 kWh battery. It is concluded that regenerative braking has the potential to improve the energy utilization of electric vehicles by reducing part of the losses present in conventional braking.

[1] Graduando em Engenharia Elétrica pela Universidade de Araraquara (UNIARA). Eletricista automotivo de veículos leves, em especialização em veículos híbridos e elétricos.
[2] Engenheiro Eletricista pela Universidade de Araraquara (UNIARA), especialista em Engenharia de Segurança do Trabalho, docente do curso de Engenharia Elétrica da Universidade de Araraquara, com atuação em sistemas de energia e eletrônica.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

KEYWORDS: *Electric Vehicles. Regenerative Braking. Energy Efficiency. Kinetic Energy. Batteries.*

RESUMEN

Este trabajo analiza cómo el frenado regenerativo puede contribuir a la eficiencia energética de los vehículos eléctricos, con énfasis en la recuperación de energía durante la desaceleración. Para fundamentar el estudio, se realizó una revisión bibliográfica sobre vehículos eléctricos, motores eléctricos, baterías y electrónica de potencia. Mediante un modelo matemático simplificado, se analizó la relación entre la velocidad del vehículo, la energía cinética disponible y la cantidad de energía potencialmente recuperada durante el frenado. Considerando los parámetros adoptados, se evaluaron diferentes velocidades iniciales y se estimó, con una eficiencia global teórica del 70%, aproximadamente 0,125 kWh de energía potencialmente recuperable en un frenado iniciado a 100 km/h. En un escenario hipotético de 30 frenados bajo las mismas condiciones, se estimó una recuperación acumulada de aproximadamente 3,75 kWh, equivalente a cerca del 6,20% de la capacidad nominal de una batería de 60,48 kWh. Se concluye que el frenado regenerativo presenta potencial para mejorar el aprovechamiento energético de los vehículos eléctricos, reduciendo parte de las pérdidas presentes en el frenado convencional.

PALABRAS CLAVE: *Vehículos Eléctricos. Frenado Regenerativo. Eficiencia Energética. Energía Cinética. Baterías.*

INTRODUÇÃO

A utilização de veículos elétricos tem aumentado o interesse por tecnologias capazes de melhorar o aproveitamento da energia armazenada e reduzir perdas durante a operação. Esses veículos utilizam motores elétricos alimentados por baterias e apresentam uma arquitetura que permite controlar o fluxo de energia entre o sistema de armazenamento e o sistema de propulsão. Além disso, a possibilidade de recuperar parte da energia durante a desaceleração constitui uma característica relevante dessa tecnologia.

Nesse contexto, a frenagem regenerativa permite que o motor elétrico opere como gerador durante a desaceleração, convertendo parte da energia associada ao movimento do veículo em energia elétrica. Essa energia pode ser direcionada novamente ao sistema de armazenamento, desde que as condições de operação permitam seu recebimento (EHSANI *et al.*, 2018; VAROCKY, 2011).

A importância do tema está relacionada ao melhor aproveitamento da energia disponível em veículos elétricos. A autonomia depende não apenas da capacidade nominal da bateria, mas também do consumo energético e das condições de utilização. Estratégias de recuperação de energia podem contribuir para melhorar o desempenho energético do sistema (EPE, 2021; EHSANI *et al.*, 2018).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

O objetivo geral deste trabalho é analisar o funcionamento da frenagem regenerativa aplicada a veículos elétricos e avaliar, por meio de modelagem matemática, seu potencial de recuperação de energia. Como objetivos específicos, pretende-se apresentar os princípios de funcionamento dos veículos elétricos e de suas baterias; descrever o funcionamento da frenagem regenerativa; apresentar o conceito de Estado de Carga (SOC); analisar a energia cinética disponível em diferentes velocidades; estimar a energia potencialmente recuperada; e discutir a possibilidade de utilização de supercapacitores como sistema auxiliar de armazenamento.

A questão de pesquisa é: em que medida a utilização da frenagem regenerativa pode contribuir para a recuperação de energia e para o aumento da eficiência energética de um veículo elétrico durante situações de desaceleração? Parte-se da hipótese de que a frenagem regenerativa permite recuperar parte da energia cinética do veículo durante a desaceleração, reduzindo as perdas energéticas e aumentando a quantidade de energia potencialmente disponível no sistema de armazenamento.

A contribuição do estudo está delimitada à análise matemática de um cenário simplificado, utilizando parâmetros de um veículo elétrico comercial como referência. Assim, os resultados devem ser interpretados como estimativas teóricas sob as premissas definidas, e não como medições realizadas diretamente no veículo.

1. REFERENCIAL TEÓRICO

1.1. Veículos elétricos

Os veículos elétricos utilizam motores elétricos alimentados por baterias para realizar sua propulsão. O desempenho desses veículos depende da integração entre o sistema de armazenamento, o motor elétrico, a eletrônica de potência e os sistemas de controle. A eficiência energética também é influenciada por fatores como massa, velocidade, aceleração e condições de condução (EHSANI *et al.*, 2018).

A arquitetura elétrica permite inverter o fluxo de energia durante a desaceleração. Em vez de somente receber energia da bateria para produzir movimento, o sistema pode operar no sentido contrário, possibilitando que o motor atue como gerador e que parte da energia mecânica seja convertida novamente em energia elétrica.

1.2. Eletrônica de potência

A eletrônica de potência é responsável pela conversão e pelo controle da energia utilizada pelo sistema de propulsão. Segundo Barbi (2013), os conversores eletrônicos são

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

fundamentais no condicionamento e no controle da energia em sistemas de acionamento elétrico. Nos veículos elétricos, esses dispositivos permitem adequar a energia fornecida pela bateria ao motor e participar do fluxo reverso associado à regeneração.

1.3. Baterias e armazenamento de energia

As baterias constituem o principal sistema de armazenamento de energia dos veículos elétricos. Entre as tecnologias utilizadas, destacam-se as baterias de íons de lítio por suas características de armazenamento e fornecimento de potência. A capacidade energética é normalmente expressa em quilowatt-hora (kWh), mas a autonomia real depende também do consumo do veículo e das condições de utilização (EHSANI *et al.*, 2018).

Durante a frenagem regenerativa, parte da energia elétrica produzida pelo motor pode retornar à bateria. A quantidade efetivamente absorvida depende das condições do sistema de armazenamento e dos limites de operação estabelecidos pelo gerenciamento da bateria.

1.4. Estado de carga (SOC) e BMS

O Estado de Carga, ou SOC (State of Charge), representa a condição de carga da bateria e é normalmente expresso em porcentagem. Esse parâmetro é importante para indicar a energia disponível e acompanhar os processos de carga e descarga. No contexto da frenagem regenerativa, o SOC pode limitar a aceitação de energia quando a bateria se encontra próxima de seu limite superior (HUSAIN, 2011).

O BMS (Battery Management System) monitora condições relevantes da bateria, como tensão, corrente e temperatura, contribuindo para o controle das condições de carga e descarga. Por isso, a energia teoricamente recuperável não deve ser considerada automaticamente como energia integralmente armazenada.

1.5. Frenagem regenerativa

A frenagem regenerativa permite recuperar parte da energia associada ao movimento do veículo durante a desaceleração. Nessa condição, o motor elétrico passa a operar como gerador, produzindo torque resistente e convertendo energia mecânica em energia elétrica. Essa energia pode ser direcionada ao sistema de armazenamento, respeitando as limitações dos componentes (VAROCKY, 2011).

O fluxo de energia pode ser representado de forma simplificada como: energia cinética do veículo → motor elétrico → eletrônica de potência → bateria. A energia efetivamente

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

recuperada é inferior à energia cinética inicial devido às perdas presentes no processo de conversão e às limitações do sistema.

1.6. Eficiência e limitações da regeneração

A quantidade de energia disponível para recuperação depende principalmente da massa do veículo e da velocidade. Contudo, a parcela efetivamente recuperada também depende das características do motor e do inversor, do estado de carga e da temperatura da bateria e da estratégia de controle. Em determinadas condições, a frenagem regenerativa pode atuar de forma complementar ao sistema mecânico para alcançar a desaceleração solicitada.

1.7. Supercapacitores

Os supercapacitores são dispositivos de armazenamento caracterizados pela capacidade de fornecer e absorver potência rapidamente. Essa característica pode ser interessante para aplicações que envolvem mudanças rápidas de potência, como eventos de frenagem regenerativa. Em uma arquitetura híbrida, eles podem atuar como complemento à bateria principal. Paredes, Pomilio e Mastelari (2012) destacam que, em sistemas de frenagem regenerativa, os supercapacitores podem atuar como elementos auxiliares para absorver picos de potência e que sua menor capacidade de armazenamento energético, em relação às baterias, favorece uma utilização complementar.

Apesar da elevada densidade de potência, os supercapacitores possuem menor capacidade de armazenamento energético quando comparados às baterias. Por isso, sua utilização deve ser definida por meio de uma arquitetura e de uma estratégia de controle específicas. Neste trabalho, os supercapacitores são tratados de forma complementar e conceitual, sem adoção de uma divisão arbitrária de energia entre os dispositivos.

1.8. Ciclos de condução e WLTP

O desempenho energético de um veículo depende das condições de condução, incluindo velocidade, aceleração e desaceleração. O WLTP (Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure) é um procedimento padronizado utilizado para avaliação de veículos leves e constitui uma referência para ensaios de consumo e autonomia (DEWETRON, 2023).

A consideração de ciclos de condução é importante para estudos de frenagem regenerativa porque, em condições reais, o veículo passa por diferentes velocidades e intensidades de desaceleração. Por essa razão, uma frenagem isolada não representa todo o comportamento energético de um percurso.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

2. METODOLOGIA

2.1. Caracterização da pesquisa

A pesquisa possui natureza aplicada, caráter exploratório e descritivo e abordagem quantitativa. O estudo foi desenvolvido por meio de pesquisa bibliográfica e documental, complementada por modelagem matemática simplificada. O objetivo é utilizar conceitos de Engenharia Elétrica para analisar quantitativamente o potencial de recuperação energética da frenagem regenerativa.

2.2. Veículo e parâmetros de referência

Para a análise, foi utilizado como caso de referência o BYD Dolphin Plus, sem a intenção de reproduzir integralmente o sistema proprietário do fabricante. Foram utilizados os parâmetros já adotados no estudo e atribuídos à referência da BYD. A eficiência global de 70% foi tratada separadamente como hipótese de modelagem.

Tabela 1. Parâmetros adotados na modelagem

Parâmetro	Valor	Origem no estudo
Modelo de referência	BYD Dolphin Plus	BYD Auto Brasil
Massa	1.658 kg	BYD Auto Brasil
Potência máxima	150 kW	BYD Auto Brasil
Torque máximo	310 N·m	BYD Auto Brasil
Capacidade da bateria	60,48 kWh	BYD Auto Brasil
Tensão nominal	400 V	BYD Auto Brasil
Autonomia informada no estudo	330 km	BYD Auto Brasil
Eficiência global de recuperação	70%	Parâmetro adotado no modelo

Fonte: Elaborado pelos autores (2026), com os parâmetros atribuídos às especificações utilizadas da BYD Auto Brasil.

2.3. Procedimento matemático

Considerou-se uma frenagem completa, isto é, uma redução da velocidade inicial até o repouso. A energia cinética disponível foi representada pela diferença entre a energia inicial e a energia final do veículo:

$$\Delta E_c = ½ \cdot m \cdot (v_i^2 - v_f^2)$$

em que ΔE_c é a variação da energia cinética; m é a massa do veículo; v_i é a velocidade inicial; e v_f é a velocidade final. No cenário principal, v_f = 0 km/h.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Após a determinação da energia cinética disponível, estimou-se a parcela potencialmente recuperada mediante a aplicação de uma eficiência global:

$$E_r = \Delta E_c \cdot \eta$$

em que E_r corresponde à energia potencialmente recuperada e η representa a eficiência global adotada no modelo.

O valor de 70% foi mantido como cenário de referência e sua influência foi avaliada por meio de análise de sensibilidade. Dessa forma, o parâmetro não é apresentado como eficiência real ou especificação oficial do veículo.

2.4. Cenários analisados

Foram consideradas cinco velocidades iniciais de frenagem: 40, 60, 80, 100 e 120 km/h, todas com velocidade final igual a zero. A análise permitiu observar a influência da velocidade sobre a energia disponível e sobre a energia potencialmente recuperada.

Além da análise individual, foi considerado um cenário hipotético de 30 frenagens por dia, mantendo a condição de referência de 100 km/h. Esse cenário é utilizado apenas para demonstrar o efeito acumulado da energia potencialmente recuperável e não representa um ciclo real de condução.

2.5. Tratamento e análise dos dados

Os resultados foram obtidos por meio de cálculos matemáticos e organizados em tabelas e gráficos. A análise considera a relação entre massa, velocidade e energia cinética, bem como a influência da eficiência adotada. O estudo não utiliza medições experimentais nem dados de corrente ou potência provenientes de um modelo elétrico completo do veículo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados correspondem à aplicação do modelo matemático às condições definidas na metodologia. A análise representa o potencial energético associado à desaceleração, considerando as premissas adotadas.

3.1. Energia cinética em função da velocidade

Para a massa de 1.658 kg, a energia cinética disponível foi calculada para cinco velocidades iniciais. Os resultados são apresentados na Tabela 2.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

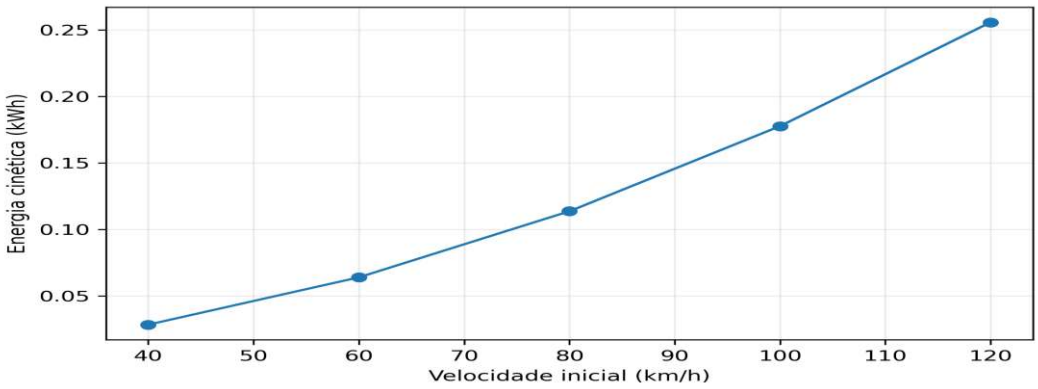
Tabela 2. Energia cinética e energia potencialmente recuperada em diferentes velocidades

Velocidade inicial	Energia cinética (kWh)	Energia potencialmente recuperada a 70% (kWh)
40 km/h	0,028	0,020
60 km/h	0,064	0,045
80 km/h	0,114	0,080
100 km/h	0,178	0,125
120 km/h	0,256	0,179

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

A energia cinética aumenta com a elevação da velocidade inicial porque a velocidade aparece elevada ao quadrado na expressão adotada. Na condição de 40 km/h, foram obtidos aproximadamente 0,028 kWh, enquanto a 120 km/h o valor chega a aproximadamente 0,256 kWh.

Figura 1. Energia cinética disponível em função da velocidade



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

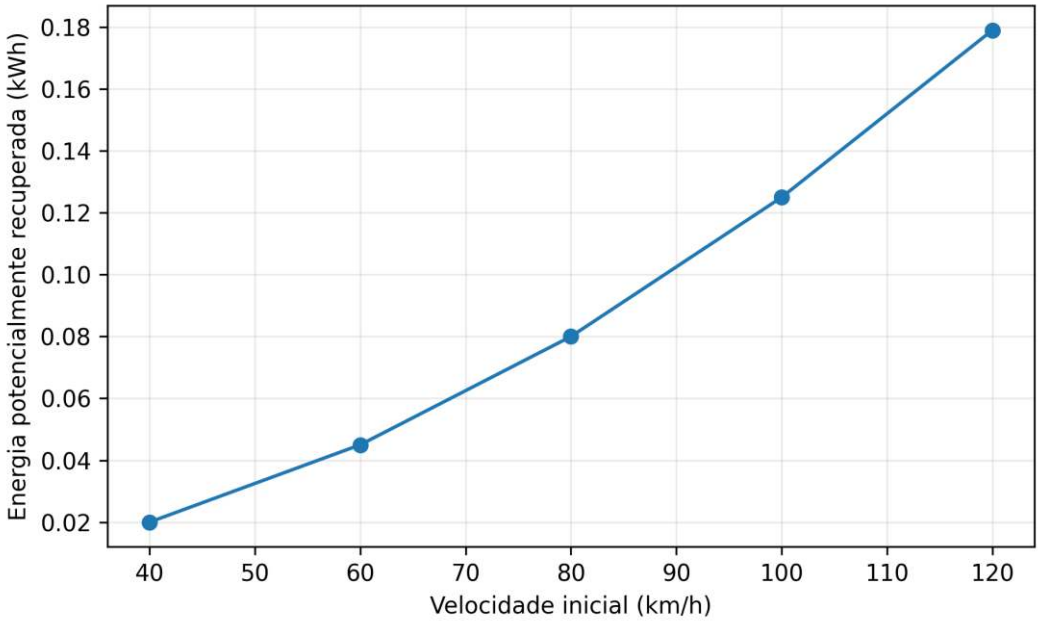
A Figura 1 evidencia uma relação não linear entre a velocidade inicial e a energia cinética disponível. Esse comportamento confirma que velocidades maiores possuem potencial energético significativamente superior durante a frenagem.

3.2. Energia potencialmente recuperada

Aplicando a eficiência global de 70% ao valor de energia cinética disponível, foi estimada a parcela potencialmente recuperável. Para 100 km/h, por exemplo, a energia cinética calculada é de aproximadamente 0,178 kWh e, conforme o valor adotado neste estudo, a energia potencialmente recuperável é de aproximadamente 0,125 kWh.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

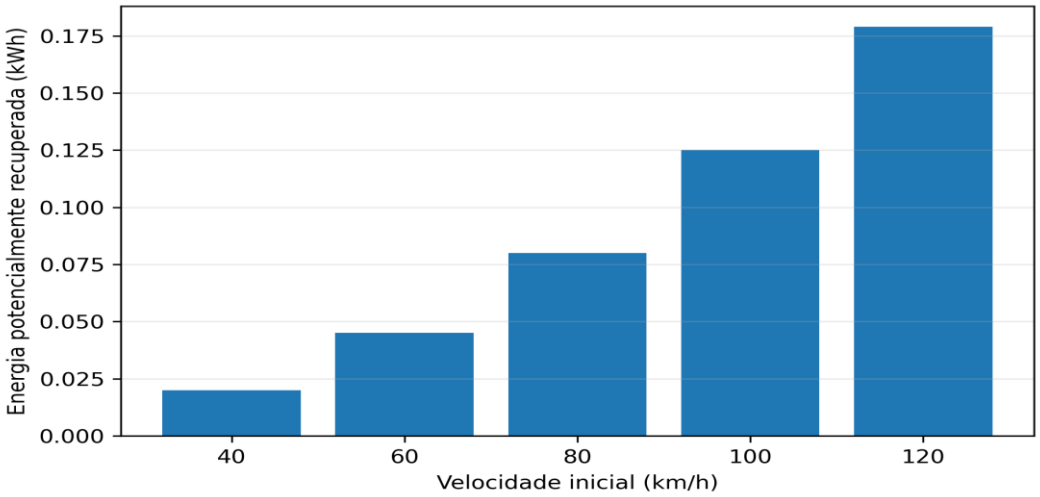
Figura 2. Energia potencialmente recuperada em função da velocidade



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

A Figura 2 mostra que o potencial de recuperação acompanha o crescimento da energia cinética. Assim, quanto maior a velocidade inicial, maior é a quantidade de energia que, sob a eficiência adotada, pode ser considerada potencialmente recuperável.

Figura 3. Comparação da energia potencialmente recuperada para diferentes velocidades



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

A comparação evidencia que a condição de 120 km/h apresenta o maior potencial de recuperação, enquanto a condição de 40 km/h apresenta o menor. Esses valores constituem estimativas do modelo e não representam energia medida diretamente no veículo.

3.3. Acúmulo de energia em 30 frenagens diárias

Para avaliar o efeito acumulado, foi considerado um cenário hipotético de 30 frenagens por dia, utilizando 0,125 kWh como energia potencialmente recuperável por frenagem na condição de referência de 100 km/h.

$$E_{total} = E_r \cdot n$$

em que E_{total} é a energia potencialmente recuperada acumulada, E_r é a energia potencialmente recuperada em uma frenagem e n é o número de frenagens. Assim:

$$E_{total} = 0{,}125 \times 30 = 3{,}75\ kWh$$

O valor de 3,75 kWh corresponde a aproximadamente 6,20% da capacidade nominal de 60,48 kWh considerada para a bateria de referência. Esse percentual não representa aumento direto de 6,20% da autonomia, pois o veículo consome energia durante o deslocamento entre as frenagens e o cenário utilizado não reproduz as condições de um ciclo real.

O resultado deve ser interpretado como uma ilustração do efeito acumulado da recuperação energética sob condições idealizadas. Em uso real, a energia recuperada em cada evento depende da velocidade, da intensidade da desaceleração e das condições do sistema de armazenamento.

3.4. Análise de sensibilidade da eficiência adotada

Para avaliar a influência do parâmetro de 70% sobre o resultado, foi realizada uma análise de sensibilidade mantendo a mesma massa e uma frenagem de 100 km/h até o repouso. Foram consideradas eficiências globais de 50%, 60%, 70%, 80% e 90%.

Tabela 3. Sensibilidade da energia recuperada em função da eficiência global adotada

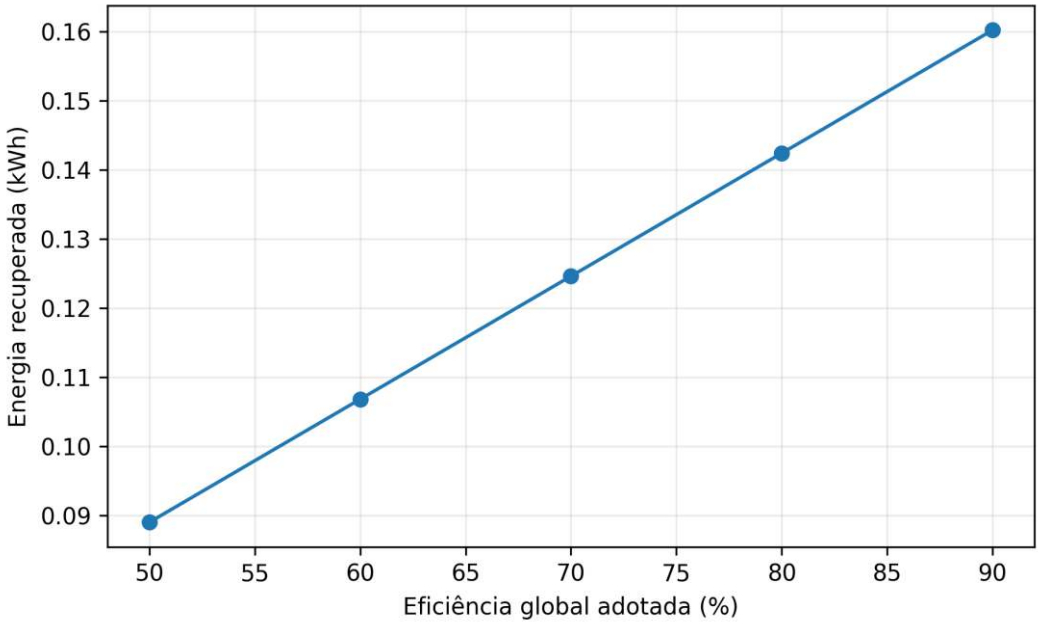
Eficiência global adotada	Energia recuperada a 100 km/h (kWh)
50%	0,089
60%	0,107
70%	0,125
80%	0,142
90%	0,160

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

A Tabela 3 demonstra que a eficiência adotada influencia diretamente a energia estimada como recuperável. Para 50% de eficiência, o resultado é de aproximadamente 0,089 kWh, enquanto para 90% chega a aproximadamente 0,160 kWh. No cenário de referência de 70%, o valor obtido é de aproximadamente 0,125 kWh.

Figura 4. Sensibilidade da energia recuperada em função da eficiência global adotada



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

A análise de sensibilidade evidencia que o resultado não deve ser associado a um único valor de eficiência como se fosse uma característica real e fixa do veículo. O valor de 70% representa o cenário de referência definido para o modelo, enquanto os demais cenários permitem observar a influência dessa premissa sobre a estimativa.

3.5. Relação entre a energia recuperada e a capacidade da bateria

Além da energia recuperada em uma única frenagem, é possível relacionar o resultado acumulado à capacidade nominal da bateria utilizada como referência. Considerando 30 frenagens e 0,125 kWh potencialmente recuperáveis por evento, obtém-se 3,75 kWh.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

$$3{,}75 / 60{,}48 \times 100 \approx 6{,}20\%$$

Essa relação permite dimensionar a ordem de grandeza da energia acumulada em relação ao armazenamento disponível. Entretanto, ela não representa um ganho direto de autonomia, pois o cálculo não considera o consumo do veículo entre as frenagens nem as limitações reais de aceitação de carga da bateria.

3.6. Estado de carga da bateria

O SOC representa a condição de carga da bateria e influencia a capacidade de recebimento da energia proveniente da regeneração. Quando o estado de carga se encontra próximo do limite superior, o sistema de gerenciamento pode restringir a aceitação de energia. Dessa forma, a energia potencialmente recuperada pelo modelo não deve ser automaticamente interpretada como energia efetivamente armazenada em qualquer condição de operação (HUSAIN, 2011).

No presente estudo, o SOC é tratado de forma conceitual e não é utilizado como variável dinâmica nos cálculos. Essa limitação é importante porque o modelo considera a energia potencialmente recuperável a partir da energia cinética e da eficiência adotada, sem representar a estratégia completa de controle da bateria.

3.7. Limitações da modelagem

A modelagem empregada possui como principal característica a simplicidade. A energia disponível é determinada a partir da variação da energia cinética, e a recuperação é estimada por meio de uma eficiência global. Dessa forma, o modelo não representa individualmente as perdas do motor, do inversor, da transmissão e da bateria. Também não são incorporados ao cálculo fatores como resistência aerodinâmica, resistência ao rolamento, energia rotacional dos componentes, inclinação da via ou uma estratégia detalhada de frenagem combinada.

Outra limitação está relacionada ao cenário das 30 frenagens diárias. As frenagens são tratadas como eventos com características iguais para permitir a análise acumulada. Em uma situação real, os eventos ocorreriam com diferentes velocidades iniciais e finais e diferentes intensidades de desaceleração. Por isso, o valor de 3,75 kWh deve ser entendido como uma estimativa obtida sob as condições estabelecidas no modelo.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

3.8. Discussão dos resultados à luz da literatura

O comportamento observado é consistente com os fundamentos discutidos no referencial teórico. Ehsani *et al.* (2018) relacionam o desempenho dos veículos elétricos à integração entre armazenamento, máquinas elétricas, eletrônica de potência e controle, enquanto Varocky (2011) descreve a conversão da energia mecânica em energia elétrica durante a operação regenerativa. No modelo desenvolvido, essa relação é representada de maneira simplificada por meio da energia cinética e de um fator global de recuperação. Paredes, Pomilio e Mastelari (2012) também mostram, em uma modelagem de veículo elétrico, que a energia recuperável depende das condições de frenagem e que o uso combinado dos freios elétrico e mecânico pode ser necessário para manter a desaceleração desejada, especialmente em baixas velocidades.

Como comparação qualitativa, Paredes, Pomilio e Mastelari (2012) apresentam resultados de modelagem em que a energia recuperada varia conforme as condições de operação e as perdas do sistema. Em uma de suas simulações, foram obtidos 25 kJ de energia recuperada a partir de 50 kJ fornecidos, enquanto em uma condição de menor velocidade foram obtidos 15 kJ de recuperação para 35 kJ fornecidos. Esses valores não são transferidos para o presente modelo, pois se referem a outra configuração de veículo, mas reforçam que a eficiência da regeneração é dependente das características do sistema e das condições de condução.

A análise de sensibilidade demonstra que a eficiência adotada possui influência direta sobre a estimativa. Para a frenagem a 100 km/h, o valor varia conforme a premissa utilizada, enquanto 70% constitui apenas o cenário de referência. Dessa forma, o modelo permite avaliar a influência da premissa sem apresentar o percentual como eficiência medida do veículo.

O tratamento do SOC também reforça essa delimitação. O parâmetro é importante para determinar a possibilidade de recebimento da energia regenerada, mas não foi utilizado como variável dinâmica no modelo. Assim, os resultados representam o potencial energético segundo as condições matemáticas adotadas, antes das limitações detalhadas de gerenciamento da bateria.

A discussão dos supercapacitores permanece conceitual. Sua capacidade de resposta rápida de potência pode ser interessante para a absorção de picos de energia, mas a determinação de sua contribuição quantitativa exigiria um modelo específico do dispositivo, do conversor e da estratégia de controle. A opção por não quantificar uma divisão arbitrária entre bateria e supercapacitor mantém o resultado limitado às condições que podem ser sustentadas pela modelagem desenvolvida.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

A comparação contribui para interpretar os resultados deste estudo porque demonstra que a recuperação energética não depende apenas da energia cinética inicial, mas também das características do sistema de acionamento, das perdas e das condições de frenagem. Paredes, Pomilio e Mastelari (2012) também destacam que, em velocidades mais baixas, a parcela de energia recuperada tende a ser menor, reforçando a necessidade de considerar o perfil de condução ao avaliar a eficiência da frenagem regenerativa. Assim, a análise apresentada neste trabalho deve ser entendida como uma estimativa matemática simplificada, útil para identificar tendências e a ordem de grandeza da energia potencialmente recuperada.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise realizada permitiu avaliar o potencial da frenagem regenerativa para o aproveitamento energético em veículos elétricos por meio de um modelo matemático simplificado. A relação entre velocidade e energia cinética mostrou que o aumento da velocidade inicial eleva significativamente a quantidade de energia disponível durante a desaceleração.

Considerando a massa de 1.658 kg adotada para o veículo de referência, uma frenagem completa iniciada a 100 km/h apresentou aproximadamente 0,178 kWh de energia cinética. Sob a eficiência global teórica de 70% utilizada como cenário de referência, estimou-se aproximadamente 0,125 kWh de energia potencialmente recuperável em cada evento.

No cenário hipotético de 30 frenagens nas mesmas condições, a energia potencialmente recuperável acumulada foi estimada em 3,75 kWh, valor equivalente a aproximadamente 6,20% da capacidade nominal de 60,48 kWh utilizada como referência. Esse resultado não representa um aumento direto da autonomia, uma vez que não foi realizado um balanço energético completo do deslocamento entre as frenagens.

A análise de sensibilidade mostrou que a escolha da eficiência global tem influência direta sobre a estimativa, reforçando que os 70% adotados constituem uma premissa de modelagem e não uma medição ou especificação oficial do veículo. Essa abordagem torna mais clara a natureza teórica dos resultados.

A pesquisa também evidenciou a importância do SOC e do gerenciamento da bateria, pois as condições do sistema de armazenamento podem limitar a aceitação da energia regenerada. Os supercapacitores foram discutidos como uma alternativa complementar para absorção e fornecimento rápido de potência, mas não foram quantificados por meio de uma divisão arbitrária de energia.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Dessa forma, os resultados são consistentes com a hipótese de que a frenagem regenerativa possui potencial para recuperar parte da energia cinética durante a desaceleração e melhorar o aproveitamento energético do veículo. Entretanto, o estudo não permite afirmar uma eficiência real ou um ganho fixo de autonomia para um veículo comercial, pois essas grandezas dependem das condições de operação e de um modelo físico mais completo.

Como continuidade, recomenda-se o desenvolvimento de modelos que incluam a dinâmica longitudinal detalhada, limites de potência do motor e do inversor, comportamento do SOC, condições térmicas da bateria, frenagem combinada e ciclos de condução normatizados, além de estudos específicos sobre arquiteturas híbridas com baterias e supercapacitores.

REFERÊNCIAS

BARBI, Ivo. *Eletrônica de potência*. 7. ed. Florianópolis: Edição do Autor, 2013. Disponível em: https://ivobarbi.com/livro-eletronica-de-potencia/. Acesso em: 22 mar. 2026.

BYD AUTO BRASIL. *Dolphin Plus*. [S. l.], [2026]. Disponível em: https://www.byd.com/br. Acesso em: 31 maio 2026.

DEWETRON. *What is WLTP (Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure)?* 2023. Disponível em: https://www.dewetron.com/news/what-is-wltp-worldwide-harmonized-light-duty-vehicles-test-procedure/. Acesso em: 23 maio 2026.

EHSANI, Mehrdad; GAO, Yimin; LONGO, Stefano; ERGATOUDIS, Konstantinos. *Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles*: fundamentals, theory, and design. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2018. Disponível em: https://www.routledge.com/Modern-Electric-Hybrid-Electric-and-Fuel-Cell-Vehicles/Ehsani-Gao-Longo-Ergatoudis/p/book/9781498761777. Acesso em: 19 set. 2026.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). *Veículos elétricos*: aspectos tecnológicos e impacto no consumo de energia. Rio de Janeiro: EPE, 2021. Disponível em: https://www.epe.gov.br. Acesso em: 22 mar. 2026.

HUSAIN, Iqbal. *Electric and hybrid vehicles*: design fundamentals. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2011. Disponível em: https://www.routledge.com/Electric-and-Hybrid-Vehicles-Design-Fundamentals/Husain/p/book/9781439811752. Acesso em: 19 set. 2026.

PAREDES, M. G. S. P.; POMILIO, J. A.; MASTELARI, N. Modelagem de frenagem regenerativa em veículo elétrico. [S. l.: s. n.], 2012.

VAROCKY, Bryan J. *Benchmarking of regenerative braking for a fully electric car*. 2011. 71 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – The Ohio State University, Columbus, 2011. Disponível em: https://etd.ohiolink.edu/apexprod/rws_etd/send_file/send?accession=osu1313422200&disposition=inline. Acesso em: 23 maio 2026.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.