

Estudo e simulação da frenagem regenerativa de um veículo em diversas condições de carga da bateria

Study and simulation of regenerative braking of a vehicle under various battery load conditions

Estudio y simulación del frenado regenerativo de un vehículo en diversas condiciones de carga de la batería

Vinícius de Freitas Leite¹

Julio Carlos Teixeira²

Resumo: Atualmente, buscam-se novas maneiras de reduzir o impacto ambiental causado pela queima de combustíveis fósseis em veículos automotores, o que impulsiona o uso de veículos elétricos. A frenagem regenerativa utiliza a energia cinética do veículo e a converte em energia elétrica, carregando a bateria. Este trabalho tem como objetivo estudar a frenagem regenerativa em diversas condições de carga da bateria, utilizando um motor de ímãs permanentes. Busca-se responder qual é o impacto da frenagem regenerativa na autonomia do veículo considerando diferentes níveis de carga da bateria. A metodologia se baseia na simulação do sistema de controle em ambiente MATLAB/Simulink, utilizando o ciclo de condução FTP-75, empregado na certificação de emissões e consumo de combustível de veículos leves nos Estados Unidos. Os resultados indicam que a estratégia pode dobrar o percurso do veículo com a mesma carga inicial da bateria, aumentando sua disponibilidade, sem dependência significativa dos parâmetros do controlador PID.

Palavras-chave: Frenagem regenerativa. Veículo elétrico. MATLAB/Simulink. Simulação computacional. Eficiência energética.

Abstract: Currently, new ways are being sought to reduce the environmental impact caused by the burning of fossil fuels in motor vehicles, which has driven the use of electric vehicles. Regenerative braking uses the vehicle's kinetic energy and converts it into electrical energy, charging the battery. This study aims to investigate regenerative braking under different battery charge conditions, using a permanent magnet motor. It seeks to determine the impact of regenerative braking on vehicle range, considering different battery charge levels. The methodology is based on the simulation of the control system in the MATLAB/Simulink environment, using the FTP-75 driving cycle, which is employed for the certification of emissions and fuel consumption of light-duty vehicles in the United States. The results indicate that this strategy can double the distance traveled by the vehicle with the same initial battery charge, increasing its availability, without significant dependence on the PID controller parameters.

Keywords: Regenerative braking. Electric vehicle. MATLAB/Simulink. Computational simulation. Energy efficiency.

¹ Bacharel em Engenharia de Instrumentação, Automação e Robótica. Universidade Federal do ABC. <https://orcid.org/0009-0008-6877-7154>. E-mail: vinicius.de.freitas@hotmail.com

² Doutor em Engenharia Elétrica. INPG Institut National Polytechnique de Grenoble – França. <https://orcid.org/0000-0002-1782-5231>. E-mail: julioCarlos.teixeira@ufabc.edu.br

Resumen: Actualmente, se buscan nuevas formas de reducir el impacto ambiental causado por la quema de combustibles fósiles en los vehículos automotores, lo que impulsa el uso de vehículos eléctricos. El frenado regenerativo utiliza la energía cinética del vehículo y la convierte en energía eléctrica, cargando la batería. Este trabajo tiene como objetivo estudiar el frenado regenerativo en diferentes condiciones de carga de la batería, utilizando un motor de imanes permanentes. Se busca determinar cuál es el impacto del frenado regenerativo en la autonomía del vehículo, considerando diferentes niveles de carga de la batería. La metodología se basa en la simulación del sistema de control en el entorno MATLAB/Simulink, utilizando el ciclo de conducción FTP-75, empleado en la certificación de emisiones y consumo de combustible de vehículos ligeros en los Estados Unidos. Los resultados indican que esta estrategia puede duplicar la distancia recorrida por el vehículo con la misma carga inicial de la batería, aumentando su disponibilidad, sin una dependencia significativa de los parámetros del controlador PID.

Palabras-clave: Frenado regenerativo. Vehículo eléctrico. MATLAB/Simulink. Simulación computacional. Eficiencia energética.

Submetido 27/02/2026

Aceito 06/08/2026

Publicado 09/10/2026

Considerações iniciais

O aumento do uso de automóveis tem trazido impactos ambientais graves para o meio ambiente, muito devido à queima de combustíveis fósseis. Cada vez mais, as fontes de energias alternativas são focos de pesquisas e investimentos, a fim de reduzir o dano que está sendo causado pelo uso dos veículos a combustão interna (Ehsani *et al.*, 2005).

A adoção de Veículos Elétricos (VEs) é uma ação crucial para atingir múltiplas questões globais urgentes, sendo algumas delas as alterações climáticas, poluição atmosférica e segurança energética. Como o uso de veículos de combustão interna é um contribuinte significativo para emissões de gases com efeito de estufa, a transição para VEs pode reduzir, substancialmente, as emissões dos gases desse setor (Shahrier; Habib, 2025).

Veículos Elétricos (VE) e Híbridos (VEH) têm crescido a cada dia no mercado de automóveis, trazendo benefícios ao meio ambiente. Com esse aumento, há, também, o avanço da tecnologia utilizada na autonomia das baterias, do desempenho, da eficiência dos motores e da frenagem regenerativa (Ehsani *et al.*, 2005).

Veículos elétricos podem ser classificados em veículos totalmente elétricos (BEV), híbridos convencionais (HEV), híbridos plug-in (PHEV) e veículos com célula de combustível (FCEV), cada um com diferentes arquiteturas de propulsão e fontes de energia. Estudos mostram que essa categorização é importante para comparar eficiência energética e emissões entre as tecnologias (Kusuma *et al.*, 2025).

A frenagem regenerativa é uma habilidade dos VE e VEH que permite recuperar uma parcela significativa da energia de frenagem. Os motores desses veículos podem operar como gerador para converter a energia cinética em energia elétrica, que pode ser armazenada e reutilizada (Ehsani *et al.*, 2005). A depender do ciclo de condução, esse tipo de frenagem pode economizar de 8% a 25% da autonomia total dos VE (Varocky, 2011).

Diferentemente dos motores elétricos industriais, os motores elétricos veiculares geralmente exigem partidas e paradas frequentes, altas taxas de aceleração/desaceleração, alto torque e baixa velocidade em subidas, baixo torque e alta velocidade de cruzeiro e uma ampla faixa de velocidade de operação (Ehsani *et al.*, 2005).

Os motores elétricos empregados em veículos elétricos apresentam características específicas para suportar partidas frequentes, variações de velocidade e altos níveis de torque. Esses motores podem ser classificados em diferentes tipos, dentre os quais se destacam os

motores de corrente contínua (DC), que podem possuir escovas ou serem sem escovas (brushless); os motores de indução; os motores síncronos de ímãs permanentes; e os motores de relutância variável. Em veículos, os motores DC oferecem controle de velocidade simples, porém apresentam eficiência inferior quando comparados a máquinas de corrente alternada. Os motores de indução e síncronos de ímãs permanentes são amplamente utilizados em veículos elétricos modernos devido à sua confiabilidade e desempenho. Os motores de relutância variável têm ganhado atenção por sua construção robusta e baixo custo (Monteiro; Motta, 2015).

Estudos comparativos entre motores de indução e motores síncronos de ímãs permanentes indicam que os motores de ímãs apresentam maior eficiência energética e densidade de potência para aplicações em veículos elétricos, devido à eliminação de perdas associadas à geração de campo magnético no rotor e à capacidade de produzir torque mais eficientemente para o mesmo tamanho (Pellegrino *et al.*, 2012).

O torque de frenagem regenerativa, isoladamente, não é capaz de garantir uma frenagem estável do veículo, razão pela qual é utilizado em conjunto com a frenagem hidráulica convencional. Além disso, o sistema regenerativo não pode ser utilizado em determinadas condições, em função do estado de carga da bateria (SOC) e de sua temperatura (Varocky, 2011).

O sistema de gerenciamento de bateria (BMS) é um componente de segurança presente dos veículos elétricos e híbridos. Ele é o intermédio entre a bateria e o veículo, de modo a exercer um papel vital na melhoria do desempenho da bateria e na otimização da operação do veículo de maneira segura e confiável. Por causa do rápido crescimento do mercado de veículos elétricos e híbridos, é necessário desenvolver um BMS abrangente e maduro (Xing *et al.*, 2011).

O objetivo desse sistema é garantir a operação segura e confiável da bateria. Os medidores do BMS devem mostrar o estado de segurança, uso, desempenho e longevidade dela (Xing *et al.*, 2011).

As baterias utilizadas em veículos elétricos não devem ser sobrecarregadas nem descarregadas excessivamente, pois essas condições podem causar danos, elevar sua temperatura e reduzir sua vida útil. O BMS também é utilizado para maximizar a autonomia do

veículo, por meio do gerenciamento adequado da quantidade de energia armazenada na bateria (Hariprasad *et al.*, 2020).

Uma das funções mais críticas do BMS é a medição do SOC, pois é esse parâmetro que estima a quantidade de energia restante na bateria, ou seja, por mais quanto tempo o veículo pode se locomover sem parar na estrada. Dessa forma, uma quantificação precisa do estado da bateria se tornou uma das tarefas mais críticas para o BMS (Ng *et al.*, 2009).

O SOC, além de indicar a quantidade de energia restante na bateria, ajuda a evitar que as baterias sejam sobrecarregadas e descarregadas excessivamente, o que pode causar danos permanentes à estrutura interna delas (Ng *et al.*, 2009).

A abordagem mais direta para a estimativa do SOC é a contagem de Coulomb, que caracteriza a energia de uma bateria em coulombs. Esse método calcula a capacidade de uma bateria integrando a corrente que está fluindo para dentro e para fora da bateria ao longo do tempo (Xing *et al.*, 2011).

Além da medição do SOC, o BMS realiza a medição do estado de saúde da bateria (SOH) e do estado de vida da bateria (SOL). O SOH e o SOL são utilizados para caracterizar, respectivamente, as condições atuais de saúde e a vida útil remanescente da bateria, contribuindo para garantir o funcionamento confiável do veículo e para programar a substituição da bateria (Xing *et al.*, 2011).

O SOH descreve a porcentagem de vida útil restante da bateria. É a estimativa do estado da bateria em relação à bateria recém-fabricada (Hariprasad *et al.*, 2020). Uma definição geral do SOH é que ele reflete a condição de saúde de uma bateria e a sua capacidade de fornecimento em comparação a uma bateria nova (Xing *et al.*, 2011).

O SOL também é conhecido como vida útil restante de uma bateria. Com as previsões do SOL, fica mais fácil a prevenção e manutenção de falhas para prolongar a vida útil das baterias (Xing *et al.*, 2011).

Quando o SOC está abaixo de 10%, a resistência interna das baterias tem um valor alto e, por causa disso, torna-se inadequado o carregamento; assim, a proporção da força da frenagem regenerativa deve ser mais baixa. Entre 10% e 90%, as baterias podem ser carregadas com uma grande corrente; logo, a proporção da força da frenagem também deve ser aumentada de forma equilibrada. Acima de 90%, a regeneração deve ser evitada, a fim de aumentar a vida

útil da bateria (Xu *et al.*, 2011). Em Varocky (2011), a regeneração é realizada quando a bateria está entre 80% e 30%.

Nesse contexto, este trabalho propõe estudar a frenagem regenerativa de um veículo elétrico utilizando um motor síncrono de ímãs permanentes, considerando o efeito do estado de carga da bateria na recuperação da energia de frenagem. Para isso, foi desenvolvido, por meio de simulações no ambiente MATLAB/Simulink, um modelo capaz de representar diferentes condições iniciais de carga da bateria e trajetórias típicas de condução. A partir desse modelo, foi implementado um sistema de controle com o objetivo de maximizar a energia recuperada durante a frenagem, respeitando as limitações operacionais da bateria e do sistema de gerenciamento de energia.

Metodologia

Este estudo se caracteriza como quantitativo, pois é baseado na análise de dados obtidos por meio de simulações. Quanto à natureza, trata-se de um estudo aplicado, uma vez que busca gerar conhecimento para aplicação prática na melhoria da eficiência energética de veículos elétricos. Em relação aos objetivos, classifica-se como explicativo, já que procura compreender o efeito da frenagem regenerativa na autonomia do veículo em diferentes condições de carga da bateria.

Quanto aos procedimentos, o estudo é bibliográfico e experimental. A bibliografia foi utilizada para fundamentação teórica sobre veículos elétricos, frenagem regenerativa e sistemas de controle. A partir dessa fundamentação, definiu-se qual o modelo do veículo utilizado, bem como o seu sistema de controle. Também foi escolhida a trajetória de velocidade do veículo a ser utilizada. Diante dessas definições, a etapa experimental foi realizada por meio de simulações no ambiente MATLAB/Simulink.

O modelo do veículo elétrico foi dividido em 2 modelos integrados: o modelo do torque mecânico e o modelo do torque eletromagnético.

O modelo mecânico proposto leva em consideração as equações dinâmicas do veículo de acordo com os dados dele e do local em que ele está se locomovendo (Varocky, 2011). A



equação elementar que descreve a dinâmica longitudinal de um veículo rodoviário tem a seguinte forma:

$$M \frac{dv(t)}{dt} = Ft - (Fa + Fr + Fg)$$

Sendo:

M = Massa do Veículo [kg],

v = Velocidade do Veículo [m/s],

Ft = Força de Tração [N],

Fa = Resistência Aerodinâmica [N],

Fr = Resistência de Rolamento [N],

Fg = Força causada pela gravidade ao dirigir em estradas não horizontais [N].

- Força por Resistência Aerodinâmica

$$Fa = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot Af \cdot Cd \cdot v^2$$

Em que:

ρ = Densidade do ar [kg/m³],

Af = Área Frontal do Veículo [m²],

Cd = Coeficiente de arrasto.

O coeficiente de arrasto está diretamente ligado ao formato da carroceria do veículo.

- Força por Resistência de Rolamento

$$Fr = Cr \cdot M \cdot g \cdot \cos(\alpha)$$

Em que:

Cr = Coeficiente de resistência de rolamento, que pode ser considerado constante,

g = Aceleração da gravidade [(m/s)²],

α = Ângulo de Inclinação [grau].

O fator que mais influencia nessa força é o coeficiente de resistência de rolamento. Ele é uma função do material, da estrutura, da temperatura e da pressão de enchimento do pneu, também da geometria do piso, da rugosidade da estrada, do material da estrada e da presença ou ausência de líquidos na estrada (Ehsani *et al.*, 2005).

- Força Gravitacional Induzida

Essa é a força quando o veículo está subindo ou descendo rampas.

$$Fg = M \cdot g \cdot \sin(\alpha)$$

- Força de tração

A força de tração é a força gerada pelo motor do veículo.

A partir dessa força de tração, é possível calcular o torque nas rodas (Tr) necessário para fazer o veículo se movimentar (Costa, 2009).

$$Tr = Fr \cdot r$$

Em que:

r = Raio da roda [m].

A seguir, está o modelo do motor elétrico.

O torque do motor elétrico (Tem) é associado ao torque que tracionará a roda, pois ele depende da relação de transmissão do sistema e das perdas (Costa, 2009).

$$Tem = \frac{Tr}{nt \cdot Rt}$$

Em que:

nt é o rendimento da transmissão,

Rt é a relação da transmissão,

Tr é o torque de tração.

Quando o torque de frenagem necessário por roda estiver acima do torque regenerativo máximo do gerador, a frenagem não pode ser totalmente regenerativa. Assim, a frenagem por atrito é aplicada em combinação com a regeneração.

O torque eletromagnético possui um modelo que depende do tipo de máquina elétrica escolhida.

De acordo com o levantamento apresentado por (Bazzi; Liu; Fay, 2018), os motores síncronos de ímãs permanentes são os mais utilizados em veículos elétricos. Por isso, esse foi o modelo escolhido.

Para essa máquina, o torque é dado por (Fitzgerald; Kingsley Junior; Umans, 2006):

$$Tem = \frac{3}{2} \cdot \frac{p}{2} [Iq \cdot \lambda p + (Lq - Ld) Iq \cdot Id]$$

Em que:

Ld é a indutância síncrona de eixo direto [H],

Lq é a indutância síncrona de eixo de quadratura [H],

λp é o fluxo dos ímãs permanentes [Wb],

I_q é a corrente de quadratura,

I_d é a corrente direta,

p é o número de polos do motor.

Sobre o modelo do veículo elétrico, se considerarmos o torque resultante que acelera o veículo, temos a equação a seguir.

$$Tr = J \frac{d\omega}{dt} + \omega \frac{dJ}{dt} + TL = Tem. nt. Rt$$

Em que:

J é o momento de inércia,

ω é a velocidade angular,

TL é o torque da carga.

O torque da carga é dependente das forças que se aplicam ao veículo:

$$TL = r. (Fa + Fr + Fg) = r. Ft$$

Dessa forma,

$$Ft = \frac{Tem. nt. Rt}{r}$$

A priori, vamos desprezar a mudança do momento de inércia com o tempo ($\omega \frac{dJ}{dt} \sim 0$). Esse termo é importante, particularmente, quando se considera a movimentação do centro de massa do veículo em relação ao ponto de contato das rodas com a pista (efeitos de curvas e oscilações).

No que tange ao modelo da frenagem regenerativa, o produto entre a velocidade e a força necessária para a tração do veículo nos dá a potência requisitada pelo mecanismo de tração (Pm) (Ferreira; Pomilio, 2007).

Sendo assim:

$$Pm = Ft. V$$

Dessa maneira, quando houver torques negativos, ou seja, o veículo estiver freando, a potência será negativa, indicando a potência regenerada.

Ao realizar a integração da potência, é obtida toda a energia envolvida no processo. Integrando somente a parte positiva dessa potência, o resultado é a energia consumida pelo

processo. Integrando a parte negativa, a energia recuperada é obtida, ou seja, a energia que foi regenerada (Ribeiro, 2017).

Isto é:

$$EnergiaConsumida = \int_0^t P_{consumida}.dt$$
$$EnergiaRegenerada = \int_0^t P_{regenerada}.dt$$

Concernente à medição do SOC, a integração da corrente atual em relação à capacidade nominal da bateria estima o SOC atual da bateria (Xing *et al.*, 2011).

Considera-se que a bateria esteja operando com 100% de sua capacidade nominal.

Ou seja:

$$SOC = 1 - \frac{\int i dt}{Cn}$$

Em que:

i é a corrente da bateria,

t é o tempo,

Cn é a capacidade nominal da bateria.

Por causa das reações químicas que acontecem na bateria e das diferentes cargas externas, a capacidade máxima da bateria diminui, gradualmente, ao longo do tempo (Xing *et al.*, 2011).

Sobre a sintonia do controlador do sistema, para que o veículo seja capaz de seguir, adequadamente, o ciclo de condução imposto, é necessário que o sistema de controle de velocidade apresente uma resposta estável e com desempenho aceitável. Para isso, foi empregado um controlador proporcional–integral (PI) na malha de controle de velocidade do veículo, que, a partir do erro calculado entre a velocidade de referência e a velocidade real do veículo, gera o I_q do motor.

A sintonia do controlador PI foi realizada por meio do método de Ziegler–Nichols do ganho crítico. A partir desse procedimento, os ganhos do PI foram ajustados considerando o comportamento do sistema modelado como um sistema de primeira ordem em malha fechada.

O método do ganho crítico, chamado, também, de método da resposta em frequência, consiste em aumentar somente o ganho proporcional (P) do PID, até que o sistema oscile com

uma amplitude constante. A partir dessa resposta, determina-se o ganho crítico (K_{cr}), que é o próprio valor de P , e o período de oscilação (P_{cr}), equivalendo ao período da oscilação (Ogata, 2010).

Por meio dos valores de K_{cr} e P_{cr} , é possível determinar os valores do controlador PI, já que, para o controlador proporcional, adotou-se $K_p = 0,5K_{cr}$, $T_i = \infty$ e $T_d = 0$. Para o controlador proporcional-integral, utilizou-se $K_p = 0,45K_{cr}$, $T_i = \frac{P_{cr}}{1,2}$ e $T_d = 0$. Para o controlador proporcional-integral-derivativo, foram adotados $K_p = 0,6K_{cr}$, $T_i = 0,5P_{cr}$ e $T_d = 0,125P_{cr}$ (Ogata, 2010).

Outro método que pode ser utilizado é o cálculo do controlador a partir do sistema de malha fechada de primeira ordem.

A partir da função de transferência do sistema, é possível realizar a sintonia do controlador PID.

A função de transferência do controlador PID é (Ogata, 2010):

$$G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = Kp(1 + \frac{1}{Tis} + Tds)$$

Em que Kp é o ganho proporcional, Ti é o tempo integrativo e Td é o tempo derivativo.

Dessa forma, PI é dado por:

$$G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = \frac{Kp}{Tis + 1}$$

Com isso, uma vez obtida a função de transferência do sistema, é possível obter os resultados de Kp e Ti .

Para as simulações do trajeto, careceu-se de terminar um ciclo de condução. Nos modelos publicados, em geral, nota-se que uma grande parte utiliza como referência de trajeto para as simulações os ciclos de condução empregados para teste de emissões em diversos países.

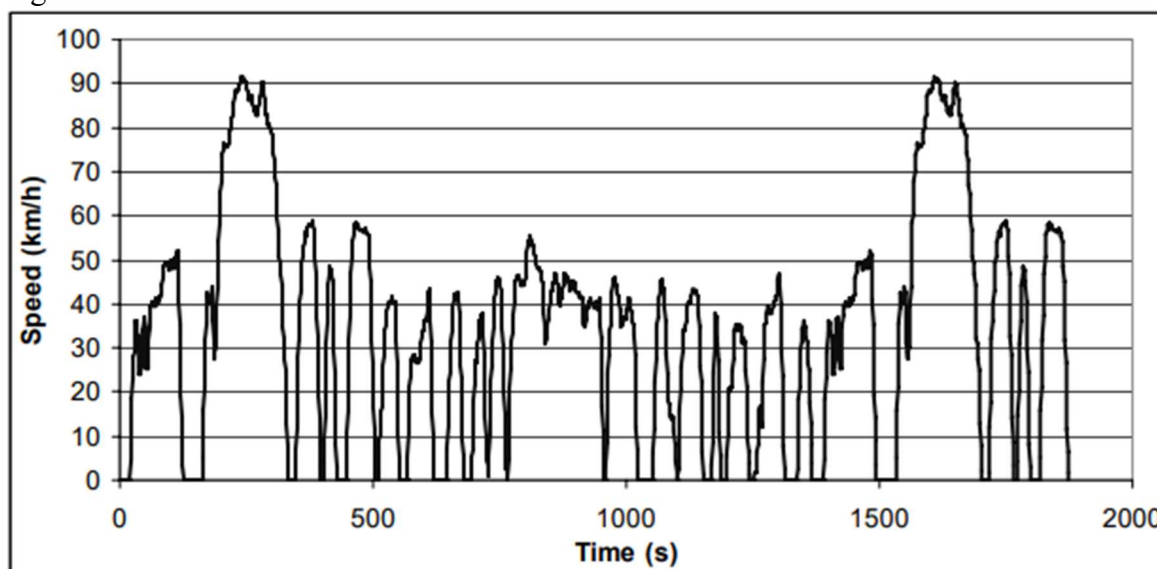
Um ciclo de condução é representado pela velocidade do veículo *versus* tempo e representa padrões típicos de direção. Os ciclos de condução têm sido usados, principalmente, para avaliar os gases emitidos dos veículos, as diferentes estratégias de controles para veículos,

o *design* e dimensionamento de veículos e componentes e o estudo de conceito (Nyberg; Frisk; Nielsen, 2017).

Os ciclos de condução são definidos por um conjunto de parâmetros que caracterizam o comportamento de um veículo ao longo de um trajeto, incluindo velocidade, aceleração e desaceleração, distância percorrida, duração do ciclo, tempo de condução, tempo de parada e frequência de partidas e paradas. Esses parâmetros são combinados de forma a representar, na medida do possível, o padrão de condução real, sendo utilizados em simulações e ensaios para avaliar o consumo de energia, emissões de poluentes e desempenho de veículos (Maciel Filho, 2013).

O FTP-75 (*Federal Test Procedure 75*) é um ciclo de condução utilizado para certificar as emissões e economia de combustível de veículos leves nos Estados Unidos. Esse mesmo ciclo é usado no Brasil para a análise de emissões. Os procedimentos exigidos para a realização desse ensaio de emissão estão prescritos na Norma Brasileira ABNT NBR 6601 (Sousa, 2024).

Figura 1 – Ciclo FTP-75



Fonte: Barlow *et al.* (2009).

Na Europa, são utilizados os ciclos NEDC (*New European Driving Cycle*) e WLTP (*Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure*). O ciclo NEDC foi introduzido, em 1992, sendo o procedimento utilizado para os testes padrão na Europa até setembro de 2018. Esse ciclo foi considerado desatualizado a partir do momento em que começou a ser constatado



que ele não estava mais refletindo, com precisão, as condições de condução do mundo real. Por causa disso, foi gradativamente alterado para o ciclo WLTP, que é mais exigente, com provas mais extensas e baseadas em condições reais de condução. É o ciclo que se encontra em vigor para os carros novos (Repsol Portugal, 2024).

A fim de realizar as simulações, foi escolhido o ciclo de condução FTP-75 indicado na Figura 1, uma vez que ele já é usado no Brasil para determinação de emissões de veículos leves.

Análise dos dados e resultados

Para desenvolver o modelo no MATLAB, escolheu-se o veículo elétrico BYD Dolphin 2024 (Byd Auto, 2024).

Tabela 1 – Dados do Veículo

Nomenclatura	Parâmetro	Valor
m	Massa do Veículo [kg]	1405
A_f	Área Frontal [m^2]	2,36
C_d	Coeficiente de Arrasto [-]	0,3
C_r	Coeficiente de resistência de rolamento [-]	0,013
r	Raio da roda [m]	0,406
R_t	Relação de transmissão [-]	4,87
η_t	Rendimento da transmissão [-]	0,96
g	Aceleração da gravidade [m/s^2]	9,81
α	Ângulo de Inclinação [grau]	0
ρ	Densidade do ar [kg/m^3]	1,2

Fonte: Adaptada de BYD (2024).

O motor elétrico usado como referência tem os seguintes parâmetros (Emrax, 2024):

Tabela 2 – Dados do Motor

Nomenclatura	Parâmetro	Valor
L_d	Indutância síncrona de eixo direto [H]	$0,292e^{-3}$



Lq	Indutância síncrona de eixo de quadratura [H]	$0,273e^{-3}$
λip	Fluxo dos ímãs permanentes [Wb]	0,0245
p	Número de Pólos [-]	20
J	Momento de Inércia [$kg.m^2$]	0,0922
Ra	Resistência de Armadura [Ω]	0,5
-	Corrente máxima do motor [A]	250

Fonte: Adaptada de Emrax (2024).

A bateria usada como referência tem os seguintes parâmetros (Byd Auto, 2024):

Tabela 3 – Dados da Bateria

Nomenclatura	Parâmetro	Valor
-	Capacidade [kWh]	44,9
Cn	Capacidade [Ah]	135
V	Tensão Nominal [V]	332,8

Fonte: Adaptada de BYD (2024).

Os modelos de motor elétrico e do controlador do modelo elétrico foram montados no MATLAB/Simulink, de acordo com as equações mencionadas anteriormente.

Para o cálculo do PI, através do método de sintonia de Ziegler Nichols do ganho crítico, foi utilizado como dado um degrau de velocidade de 90 km/h, que é, aproximadamente, a velocidade mais alta atingida pelo ciclo FTP 75.

Pelo método do ganho crítico, ao valor do PI para um degrau de velocidade de 90 km/h, foi necessário um Kcr de 2600, que gerou um Pcr de 2. Destarte, o resultado é obtido é de:

$$Kp=1170 \text{ V.h/km}$$

$$Ti=1,67 \text{ s}$$

Aplicando esses ganhos ao controlador PI, a velocidade requerida, de 90 km/h, foi atingida em, aproximadamente, 2 segundos.

Foram aplicados os mesmos ganhos, para o ciclo FTP 75.

A fim de verificar a eficiência da resposta, foi feito o cálculo do erro entre a velocidade requerida, que é a padrão do ciclo, e a velocidade que o veículo atingiu com o método de controle aplicado.

O erro máximo foi de, aproximadamente, 1,5% em diversos momentos do trajeto.

Além do método de Ziegler Nichols do ganho crítico, foi feita a sintonia do controlador pelo método do sistema de primeira ordem.

O sistema de malha fechada de primeira ordem, no caso do PI, informa que:

$$PI(s) = \frac{KpTis + Kp}{Tis}$$

Das equações dinâmicas do veículo, tem-se:

$$Kg = \frac{K_{ele} \cdot r}{2 \cdot K_v \cdot V_0}$$

$$\tau_c = \frac{M_{carro}}{2 \cdot K_v \cdot V_0}$$

Em que:

$$K_{ele} = \frac{3}{2} \cdot \frac{p}{2} \cdot \lambda_{ip}$$

$$K_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot Af \cdot Cd$$

Linearizando a dinâmica veicular, a função de transferência é:

$$G(s) = \frac{\Delta v(s)}{\Delta i(s)} = \frac{K_{ele} \cdot r}{M_{carro} \cdot s + 2 \cdot K_v \cdot V_0} = \frac{Kg}{\tau_c s + 1}$$

Dessa forma, para a função de transferência de malha fechada, tem-se:

$$FTMF = \frac{\frac{Kp \cdot Kg \cdot Kh}{Tis}}{1 + \frac{Kp \cdot Kg \cdot Kh}{Tis}} = \frac{1}{Tis + 1}$$

$$tmf = \frac{T}{Kp.Kg.Kh}$$

$$Kp = \frac{T}{tmf.Kg.Kh}$$

$$Ki = \frac{Kp}{Ti}$$

Em que:

$$Kh = 1$$

$$tmf = 0.5$$

$$T = \tau_c = Ti$$

Sendo assim, para uma velocidade de 25 m/s (aproximadamente a maior atingida), os ganhos do controlador foram:

$$Kp = 18,83.10^3$$

$$Ki = 284,7$$

Mediante o exposto, foram aplicados os ganhos e, com isso, para a resposta ao degrau de 90km/h, a velocidade foi atingida em, aproximadamente, 1,1 segundos. Mais rápido do que o primeiro método testado.

Foram aplicados os mesmos ganhos, mas para o ciclo FTP-75, e foi feito o cálculo do erro entre a velocidade requerida, que é a padrão do ciclo, e a velocidade que o veículo atingiu com o método de controle aplicado.

O erro máximo foi de, aproximadamente, 0,38%, por volta de 1250 segundos após o início do ciclo, apresentando um erro menor do que o método de sintonia de Ziegler Nichols do ganho crítico.

Ambos os métodos atingiram a velocidade requerida, mas o método de sintonia, a partir do sistema de primeira ordem, apresentou uma resposta mais rápida ao degrau e com um menor erro de velocidade, sendo, portanto, o método escolhido.

Após a sintonia do PID, foi feita a montagem da dinâmica veicular, do cálculo da energia regenerada e do cálculo do SOC no MATLAB/Simulink, de acordo com as informações apresentadas anteriormente.

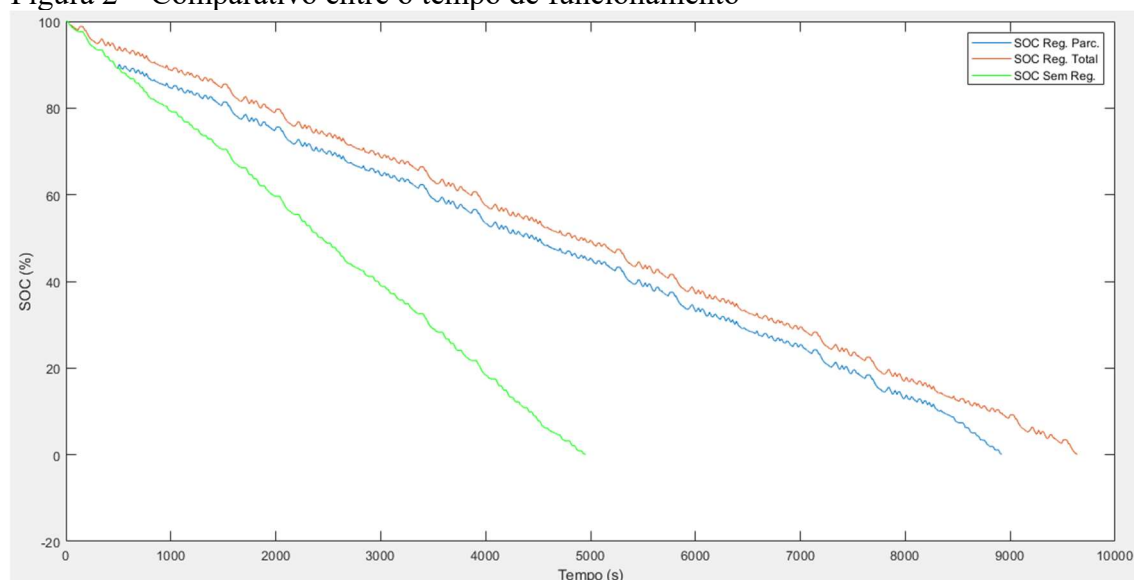
Para o cálculo do SOC da bateria, foram considerados 3 métodos. O método sem o armazenamento da energia regenerada, ou seja, a bateria não é recarregada em nenhum momento. Para isso, empregou-se, no cálculo do SOC, somente a parte positiva da corrente.

Foi considerado, também, o método que armazena a energia regenerada somente quando o SOC da bateria estiver entre 90% e 10%, que é o método de funcionamento ideal para a preservação da bateria, pois, acima de 90% e abaixo de 10%, a corrente deve ser diminuída, segundo Xu *et al.* (2011). Todavia, nesse caso, foi considerado que não haverá nenhuma regeneração. Por último, o método com o armazenamento total da energia: ou seja, desde o início até o fim do ciclo.

As simulações foram feitas até a bateria do veículo descarregar completamente, isto é, o SOC atingir 0%.

As respostas de tempo de funcionamento e distância percorrida foram:

Figura 2 – Comparativo entre o tempo de funcionamento

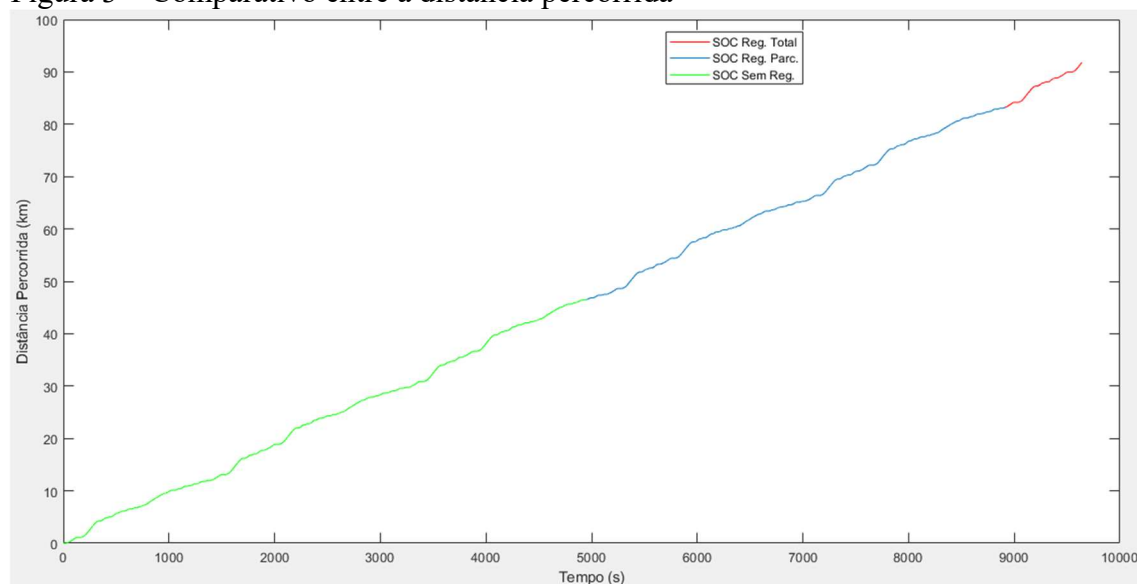


Fonte: Autores (2025).

Nota-se que, dado o método com a regeneração total, o tempo de funcionamento do veículo foi maior, seguido do método com regeneração parcial (entre 90% e 10%) e, por último, o método sem regeneração, que fez com que a bateria descarregasse antes. Considerando-se o método de regeneração parcial, a limitar o trajeto apenas até o momento do atingimento do valor de 10% de carga, observou-se um valor de cerca de 88% a mais de tempo de funcionamento. Esse valor é superior ao registrado por Varocky (2011), evidenciando ser fundamental considerar outros aspectos na modelagem da recarga, como o escorregamento dos pneus ou a vida útil da bateria (Kang; Liu; Liu, 2024).

Seguidamente, destaca-se o comparativo entre a distância percorrida nos 3 métodos.

Figura 3 – Comparativo entre a distância percorrida



Fonte: Autores (2025).

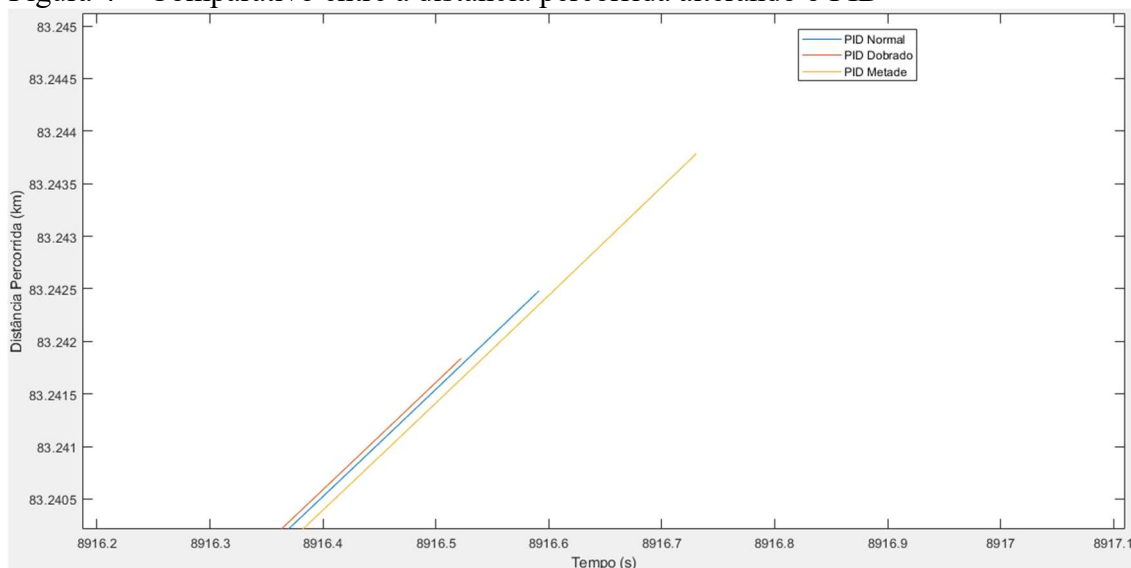
É possível notar que a lógica segue o mesmo princípio da simulação do tempo de funcionamento; com regeneração total, o veículo percorreu uma distância maior, seguido do método com a regeneração parcial e, por último, o método sem regeneração.

Como não foi estimada a vida útil da bateria, não foi possível determinar se a não utilização da regeneração quando está abaixo de 10% ou acima de 90% foi mais benéfica do que quando a corrente somente é diminuída nessas faixas. No entanto, a não utilização da regeneração nessas condições poderia contribuir para uma melhor preservação da bateria, uma vez que reduziria a ocorrência de sobrecargas e de ciclos de carga e descarga em níveis extremos de carga. Entretanto, isso somente poderia ser confirmado por meio de um modelo que incluísse mecanismos de degradação da bateria.

A fim de notar alguma alteração na distância percorrida de acordo com a mudança dos parâmetros do controlador do PID, para essa simulação, recorreu-se ao método de regeneração ideal (entre 90% e 10%), bem como aos parâmetros do PID (ganho proporcional e o ganho integral); eles foram dobrados e divididos pela metade.

A seguir, apresenta-se o comparativo entre a distância percorrida alterando o PID.

Figura 4 – Comparativo entre a distância percorrida alterando o PID



Fonte: Autores (2025).

Nota-se que a variação é menor que 0,1%, mas que, quanto menores forem os valores dos ganhos do controlador do PID, a distância percorrida tende a aumentar. Dessa forma, o foco do controlador não precisa ser a recuperação de mais energia, mas pode focar, por exemplo, na vida útil da bateria ou no escorregamento dos pneus.

Considerações finais

O trabalho desenvolveu modelos que permitiram avaliar, de maneira teórica, o efeito da escolha da forma de frenagem e do seu controle na autonomia do veículo. Nas simulações realizadas no MATLAB, foi possível comparar o efeito da frenagem regenerativa em determinadas condições de carga de bateria, em que foi feita a comparação da distância percorrida até a bateria do veículo descarregar completamente.

Após as simulações em diferentes condições de carga da bateria, é perceptível que, quanto maior for a recuperação da energia, a distância percorrida também será maior. No caso que é utilizada a regeneração durante todo o percurso, de 100% a 0% da bateria, a distância percorrida foi a maior. Em segundo caso, no qual o armazenamento da energia foi feito quando a bateria apresentava 90% de carga até 10% de carga, que é o ideal para a preservação da bateria,

a distância foi menor que o primeiro caso. Por último, sem armazenar a energia durante todo o trajeto, a distância foi bem menor, o que era o esperado.

O comparativo da distância percorrida foi realizado pela alteração dos valores dos ganhos do controlador PID, que foram dobrados e reduzidos pela metade em relação aos valores definidos no projeto clássico. Em nenhum dos casos, houve diferença considerável na distância percorrida, indicando que esse controlador pode ser desenvolvido com outros objetivos, além da preservação de energia, por exemplo, evitar o envelhecimento precoce da bateria ou o escorregamento excessivo dos pneus. Essas possibilidades serão investigadas em trabalhos futuros.

A frenagem regenerativa é uma tecnologia que promove a melhoria do rendimento dos veículos, permitindo que percorram distâncias maiores e reduzindo a necessidade de paradas inesperadas para recarga. Dessa forma, sua utilização também pode gerar impactos financeiros positivos, em razão da redução dos custos associados à recarga da bateria.

Este trabalho apresentou limitações durante a pesquisa: a falta de publicação de dados completos dos veículos por parte das montadoras, principalmente sobre os motores elétricos e baterias. Além disso, foram encontradas dificuldades relacionadas à modelagem do comportamento dos pneus, como o escorregamento, e à representação da dinâmica de degradação da bateria, uma vez que tais fenômenos envolvem variáveis complexas e dependentes de condições reais de operação.

Referências

BARLOW, Tim J. *et al.* **A reference book of driving cycles for use in the measurement of road vehicle emissions**. 3. ed. Wokingham: TRL Limited, 2009. E-book.

BAZZI, Ali M.; LIU, Yiqi; FAY, Daniel S. Electric machines and energy storage: over a century of technologies in electric and hybrid electric vehicles. **IEEE Electrification Magazine**, Piscataway, v. 6, n. 3, p. 49-53, 2018.

BYD AUTO. **BYD Dolphin**. 2024. Disponível em: <https://www.byd.com/br/car/dolphin>. Acesso em: 24 set. 2024.

COSTA, Washington. **Metodologia para conversão de veículos equipados com motores a combustão interna para tração elétrica**: aplicação de motor síncrono de ímã permanente com fluxo magnético radial a um furgão. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009. Disponível em: <https://www.bdt.d.uerj.br:8443/handle/1/11676>. Acesso em: 8 ago. 2024.

EHSANI, Mehrdad *et al.* **Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles: fundamentals, theory, and design**. Boca Raton: CRC Press, 2005.

EMRAX. **Emrax**. 2024. Disponível em: <https://emrax.com/>. Acesso em: 24 set. 2024.

FERREIRA, André Augusto; POMILIO, José Antenor. Metodologia para dimensionar múltiplas fontes de suprimento de energia de veículos elétricos. *In*: SEMINÁRIO E

EXPOSIÇÃO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS – VE2007, 5., 2007, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: ABVE, 2007. p. 1-14.

FITZGERALD, Arthur Eugene; KINGSLEY JUNIOR, Charles; UMANS, Stephen D. **Máquinas elétricas**: com introdução à eletrônica de potência. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

HARIPRASAD, A. *et al.* Battery management system in electric vehicles. **International Journal of Engineering Research & Technology**, v. 9, n. 5, 2020. DOI: 10.17577/IJERTV9IS050458

KANG, Kailei; LIU, Xingchen; LIU, Xinhong. Research on acceleration slip regulation for battery electric vehicle. **SAE Technical Paper**, Warrendale, n. 2024-01-3051, 2024. DOI: 10.4271/2024-01-3051

KUSUMA, Idris *et al.* Electric vehicle review: BEV, PHEV, HEV, or FCEV? **Jurnal Konversi Energi dan Manufaktur**, Jakarta, v. 10, n. 1, p. 70-83, 2025.

MACIEL FILHO, Francisco Fernando. **Construção de ciclos de condução para estimativa de emissões veiculares para ônibus urbanos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

MONTEIRO, Bruno Ribeiro; MOTTA, Lucas Pinheiro. **Frenagem regenerativa**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade de Brasília, Brasília, 2015. Disponível em:

https://bdm.unb.br/bitstream/10483/14667/1/2015_BrunoCarlosMonteiro_LucasMotta_tcc.pdf
f. Acesso em: 22 ago. 2024.

NG, Kong Soon *et al.* Enhanced coulomb counting method for estimating state-of-charge and state-of-health of lithium-ion batteries. **Applied Energy**, Oxford, v. 86, n. 9, p. 1506-1511, 2009.

NYBERG, Peter; FRISK, Erik; NIELSEN, Lars. Driving cycle equivalence and transformation. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, Piscataway, v. 66, n. 3, p. 1963-1974, 2017.

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de controle moderno**. 5. ed. São Paulo: Prentice Hall, 2010.

PELLEGRINO, Gianmario *et al.* Comparison of induction and PM synchronous motor drives for EV application including design examples. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 48, n. 6, p. 2322-2332, 2012.

REPSOL PORTUGAL. **WLTP ou NEDC dos automóveis: tudo o que precisa de saber**. 2024. Disponível em: <https://www.repsol.pt/profissionais/assessoramento/ciclos-wltp-ou-necd-tudo-o-que-precisa-de-saber/>. Acesso em: 3 out. 2024.

RIBEIRO, Alex do Nascimento. **Caracterização de frenagem regenerativa de veículo elétrico com motor de indução considerando marcha e tempo de desaceleração**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

SHAHRIER, Hasan; HABIB, Muhammad Ahsanul. Electric vehicle (EV) type choice model: latent class modelling (LCM) approach. **International Journal of Transportation Science and Technology**, v. 18, p. 315-329, 2025.

SOUSA, Renno de Holanda. **Modelagem de um veículo elétrico de alcance estendido (REEV) utilizando um motor de ignição por compressão de carga homogênea (HCCI) a**

etanol. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2024.

VAROCKY, Branislav J. **Benchmarking of regenerative braking for a fully electric car.** 2011. Dissertação (Master of Science in Automotive Technology) – Eindhoven University of Technology, Eindhoven, 2011.

XING, Yinjiao *et al.* Battery management systems in electric and hybrid vehicles. **Energies**, Basel, v. 4, n. 11, p. 1840-1857, 2011.

XU, Guoqing *et al.* An intelligent regenerative braking strategy for electric vehicles. **Energies**, Basel, v. 4, n. 9, p. 1461-1477, 2011.