Estratégia de Controle Adaptativo de Velocidade para Minimização de Transitórios de Corrente em Veículos Elétricos

Luciano Bittencourt de Abreu * **Thales Alexandre Carvalho Maia** ** **Max Mauro Dias Santos** ***

* *Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, (e-mail: lbitten@gmail.com.*
** *Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, (e-mail: thalesmaiaufmg@gmail.com)*
*** *Departamento de Engenharia Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, (e-mail: maxmaurodias@hotmail.com)*

Abstract: This study presents an adaptive speed control strategy based on fuzzy logic for an electric vehicle with a front-wheel drive permanent magnet synchronous motor (IPMSM). Using lithium-ion (Li-ion) batteries, the main objective was to minimize abrupt current transients. For validation, globally recognized driving cycles were adopted as references for energy management strategies. The computational simulations, conducted in MATLAB, focused on maintaining vehicle operation in high energy efficiency regions. The results indicate that the adaptive strategy was effective in reducing current transients and energy losses.

Resumo: Este estudo apresenta uma estratégia adaptativa de controle de velocidade baseado em lógica *fuzzy* para um veículo elétrico com motor de tração dianteira de ímã permanente (IPMSM). Utilizando baterias de íons de lítio (Li-ion), o objetivo principal foi minimizar os transitórios abruptos de corrente. Para validação, foram adotados ciclos de direção globalmente reconhecidos como referência para estratégias de gerenciamento de energia. As simulações computacionais, realizadas no MATLAB, focaram em manter a operação do veículo em regiões de alta eficiência energética. Os resultados indicam que a estratégia adaptativa foi eficaz na redução dos transitórios de corrente e perdas energéticas.

Keywords: Electric Vehicle (EV); Adaptive Speed Control; Permanent Magnet Motor (IPMSM); Energy Efficiency; Fuzzy Logic.

Palavras-chaves: Veículo Elétrico (VE); Controle Adaptativo de Velocidade; Motor de Ímã Permanente; Eficiência Energética; Lógica Fuzzy.

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de veículos elétricos (EVs) oferece uma solução promissora para os desafios ambientais dos veículos de combustão interna, especialmente na emissão de poluentes como CO e CO_2. Contudo, a transição para a mobilidade elétrica apresenta desafios na gestão de energia, particularmente na minimização dos transitórios de corrente que podem prejudicar a eficiência e a durabilidade dos sistemas de armazenamento de energia Ding et al. (2017); FUNDEP (2021).

No campo dos Veículos Híbridos Elétricos (HEVs), estudos significativos têm avançado a tecnologia e a gestão de potência. Chau and Wong (2002) categorizaram HEVs em quatro tipos e exploraram sua integração com outras tecnologias ecológicas. Lin et al. (2003) introduziram uma estratégia de controle adaptativo para caminhões HEVs paralelos, e Anderson and Shafiullah (2005) destacaram a importância do armazenamento de baterias na integração de energias renováveis.

O avanço dos HEVs tem sido impulsionado pelo uso de baterias de íon de lítio (Li-ion) e supercapacitores (Burke, 2007; Beher, 2009), além de estratégias de gerenciamento de energia *online* para otimizar a economia de combustível (Kessels et al., 2008). Pesquisas recentes incluem a otimização de sistemas híbridos de armazenamento combinando baterias e supercapacitores. Khayyam et al. (2010) apresentaram um sistema de gerenciamento de energia inteligente para HEVs, considerando variáveis ambientais e de condução, enquanto Thounthong et al. (2009) investigaram a integração de células de combustível com baterias e supercapacitores.

Sistemas adaptativos de gerenciamento de energia para Veículos Híbridos Plug-in (PHEVs) utilizando controladores neuro-fuzzy foram desenvolvidos por Khayyam and Bab-Hadiashar (2014) . Trovão et al. (2015) propuseram uma arquitetura em tempo real para gerenciamento de energia em pequenos veículos elétricos urbanos, enquanto Wang et al. (2019) introduziram uma estratégia baseada em aprendizado profundo para HEVs. Serpi and Porru

(2020) desenvolveram um sistema para veículos híbridos usando controle preditivo.

Pesquisas demonstram a eficácia dos controladores *fuzzy* em veículos, melhorando a eficiência do consumo de combustível em veículos híbridos Li (2019), aumentando a autonomia, estabilidade e segurança operacional Smith (2020); Kim (2021), e otimizando a gestão de baterias e supercapacitores Wang (2021); Zhou (2022).

Embora haja avanços na otimização dos sistemas de gestão de energia, ainda existem lacunas. A necessidade de maior cobertura tecnológica e testes práticos é apontada por Lázaro et al. (2023) e Katkar and Goswami (2020). Adaptação ao estado de saúde das células de combustível e otimização em condições variadas de carga continuam sendo desafios críticos . Kene and Olwal (2023) e Yadav et al. (2023) destacam a necessidade de soluções robustas e dinâmicas para gerenciar flutuações de carga e melhorar a integração dos EVs nas infraestruturas existentes.

2. DESCRIÇÃO DO SISTEMA E MODELAGEM MATEMÁTICA

Uma visão geral esquemática do veículo elétrico a bateria (BEV) utilizada é apresentada na Figura 1, bem como as equações consideradas para a representação. A bateria é enfatizada como o meio de armazenamento de energia, contudo, poderiam ser considerados múltiplos elementos de armazenamento para atender a demandas específicas, como os supercapacitores. Os principais parâmetros considerados para o veículo são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Principais parâmetros do veículo considerado.

Dispositivo	Item	Parâmetro
Veículo	Massa	1.200 kg
	Dimensões (C x L x A)	4.000 x 1.700 x 1.500 mm
	Área Frontal	2 m²
	Coeficiente de Arrasto Aerodinâmico	0.335
Bateria	Tipo	Li-ion
	Capacidade	25 Ah
	Tensão Nominal	308 V
	Taxa Máxima de Carga	2 C
	Taxa Máxima de Descarga	5 C
	Taxa Nominal de Carga/Descarga	0,5 C
	Faixa de Temperatura	22-40°C
Motor/ Controlador	Eficiência Máxima	> 93%
	Faixa de Velocidade	0-6000 RPM
	Faixa de Torque	0-160 N*m
	Fator de Sobretorque	30/25
	Corrente Máxima	270 A
	Tensão Mínima	130 V
	Massa	45 kg

2.1 Ciclo de Direção e Modelo do Condutor

O ciclo de condução é um padrão de aceleração, desaceleração e velocidades médias usado para simular condições reais de direção em testes de eficiência e consumo de combustível. Ele cobre trajetos urbanos, rodoviários e mistos, permitindo avaliar o consumo energético em diferentes estratégias de gerenciamento, essencial para testes de veículos elétricos.

O modelo do condutor simula o controle de velocidade de um motorista real, ajustando o pedal de aceleração para minimizar o erro $e(\tau)$. Implementado como um controlador (PI), utiliza K_p como ganho proporcional e T_i como tempo integral.

2.2 Motor/Controlador

O estudo analisou um motor síncrono de ímã permanente (PMSM) para veículos de passageiros, operando a 130 volts e fornecendo 25 kW de potência contínua, com eficiências acima de 93% em altas tensões. O motor funciona de 0 a 6.000 RPM com torque de 0 a 160 N·m. A análise mostrou que o controle preciso do torque melhora a eficiência energética, adaptando a potência às demandas operacionais e minimizando perdas.

O desenvolvimento do motor e controlador considerou perdas no motor, inversor de frequência e controlador, além da inércia do rotor e variações no torque. Uma tabela de pesquisa (*lookup table*) foi usada para gerenciar esses dados, regulando o torque máximo e limitando a corrente do controlador para desligar o motor quando inativo. Isso permite calcular o torque disponível a partir da potência, estabelecendo uma relação constante entre o torque do rotor e a potência de entrada, refletindo a eficiência do sistema.

2.3 Dinâmica Veicular

As equações da dinâmica longitudinal do veículo também são apresentadas na Figura 1 e as descrição dos parâmetros na Tabela 2. A Figura 3 representa a relação entre as variáveis e parâmetros das equações dinâmicas.

Tabela 2. Identificação das variáveis nas equações de dinâmica longitudinal de um veículo

Símbolo	Descrição	Unidade
m	Massa do veículo	kg
$\dot{v}_x$	Aceleração longitudinal do veículo	m/s^2
F_x	Força de tração total nas rodas	N
F_d	Força de arrasto devido ao vento e resistência do ar	N
g	Aceleração devido à gravidade	m/s^2
$\sin\beta$	Seno do ângulo da inclinação da estrada	-
n	Número de rodas motrizes	-
F_{xf}	Força de tração na roda frontal	N
F_{xr}	Força de tração na roda traseira	N
C_d	Coeficiente de arrasto	-
A	Área frontal do veículo	m^2
ρ	Densidade do ar	kg/m^3
V_x	Velocidade longitudinal do veículo	m/s
V_w	Velocidade do vento contra o veículo	m/s
h	Altura do centro de massa do veículo acima do solo	m
b	Distância entre o centro de massa e a roda traseira	m
a	Distância entre o centro de massa e a roda frontal	m
$\cos\beta$	Cosseno do ângulo de inclinação da estrada	-

Figura 1. Diagrama de blocos do veículo elétrico utilizado na simulação.

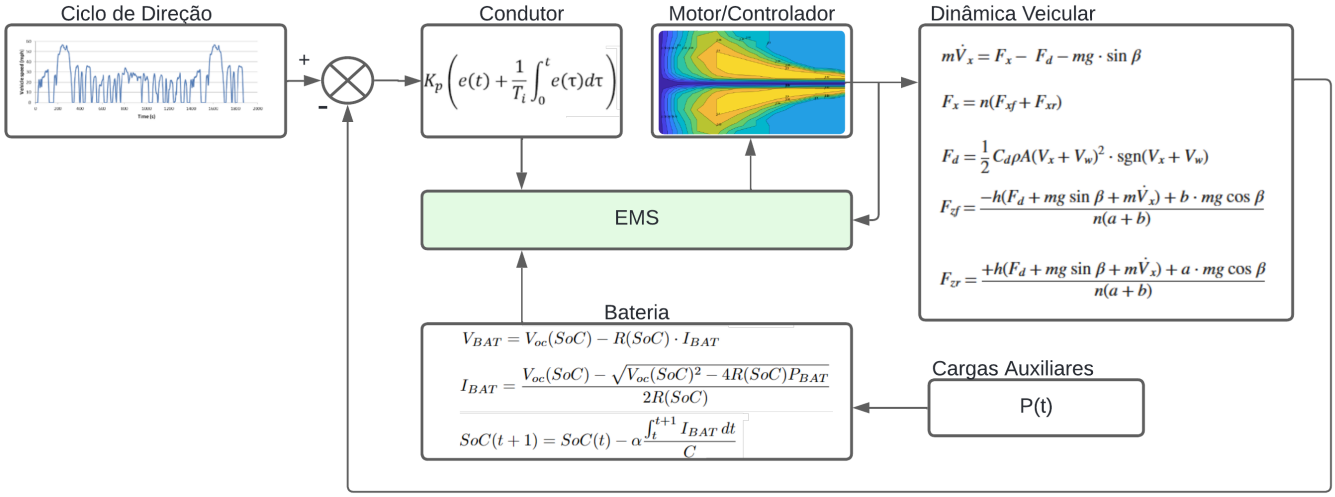


Figura 2. Mapa de eficiência do motor.

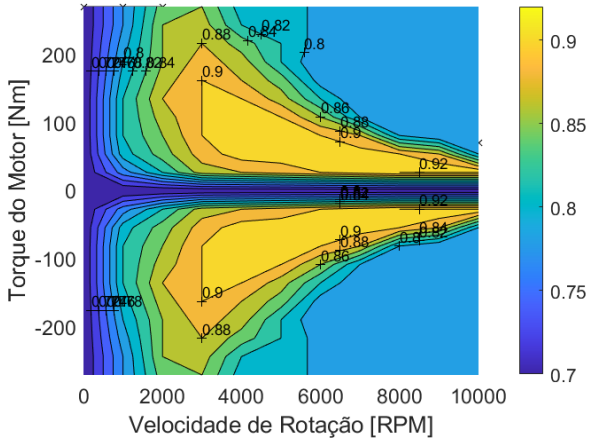
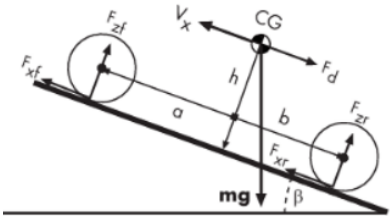


Figura 3. Dinâmica veicular e movimento.

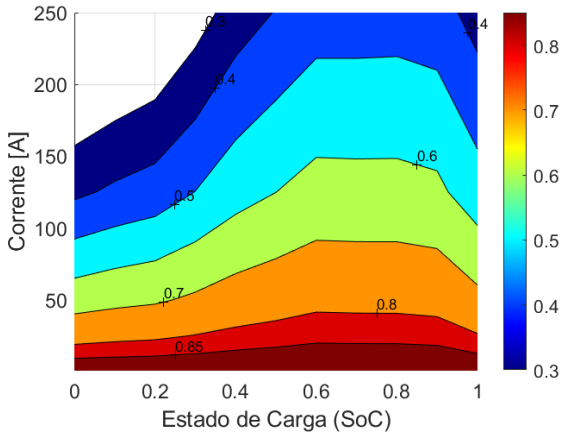


2.4 Armazenador de Energia

O banco de baterias de íon de lítio foi o armazenador de energia escolhido para os testes. A Figura 4 mostra a eficiência isoterma de ida e volta do banco, destacando sua capacidade de armazenar e recuperar energia em condições de temperatura constante. Esse indicador é crucial para avaliar o desempenho de sistemas de armazenamento de energia, pois mede a eficácia da energia carregada e posteriormente descarregada, mantendo a temperatura estável.

Uma alta eficiência isoterma de ida e volta indica mínimas perdas energéticas, seja em forma de calor ou outros mecanismos ineficazes. A análise da figura mostra que correntes de operação mais altas tendem a reduzir a eficiência, evidenciando a importância de otimizar essas variáveis para melhorar o desempenho do sistema.

Figura 4. Eficiência isoterma de ida e volta.



Devido à complexidade das reações eletroquímicas nas baterias, é desafiador desenvolver um modelo preciso e com complexidade computacional aceitável. Para a simulação, foi considerado o modelo de resistência interna, que representa a bateria como uma fonte de tensão ideal em série com uma resistência interna, devido à sua simplicidade e menor necessidade de cálculos.

As equações para a tensão terminal V_{BAT} e a corrente terminal I_{BAT} estão na Figura 1, com C sendo a capacidade máxima da bateria e α denotando o interruptor de carregamento ($\alpha = 1$) e descarregamento ($\alpha = -1$).

2.5 Cargas Auxiliares

O Sistema de Gerenciamento de Energia (EMS) em veículos elétricos é crucial para otimizar o consumo de energia. Parte essencial dessa gestão envolve o controle inteligente das cargas auxiliares, como iluminação, climatização, entretenimento e assistência ao condutor. O EMS adota uma abordagem estratégica para gerenciar essas cargas, priorizando algumas em diferentes cenários operacionais para otimizar o uso de energia. Neste estudo, as cargas

auxiliares foram consideradas constantes, com potência de $800W$.

Tabela 3. Identificação das variáveis nas equações de dinâmica longitudinal de um veículo

Símbolo	Descrição	Unidade
m	Massa do veículo	kg
$\dot{v}_x$	Aceleração longitudinal do veículo	m/s^2
F_x	Força de tração total nas rodas	N
F_d	Força de arrasto devido ao vento e resistência do ar	N
g	Aceleração devido à gravidade	m/s^2
$\sin\beta$	Seno do ângulo da inclinação da estrada	-
n	Número de rodas motrizes	-
F_{xf}	Força de tração na roda frontal	N
F_{xr}	Força de tração na roda traseira	N
C_d	Coeficiente de arrasto	-
A	Área frontal do veículo	m^2
ρ	Densidade do ar	kg/m^3
V_x	Velocidade longitudinal do veículo	m/s
V_w	Velocidade do vento contra o veículo	m/s
h	Altura do centro de massa do veículo acima do solo	m
b	Distância entre o centro de massa e a roda traseira	m
a	Distância entre o centro de massa e a roda frontal	m
$\cos\beta$	Cosseno do ângulo de inclinação da estrada	-

2.6 Sistema de Gerenciamento de Energia com Controle Fuzzy

O Sistema de Gerenciamento de Energia (EMS) distribui a energia armazenada entre os componentes do veículo, otimizando o uso de energia com base na carga da bateria e na proximidade de pontos de carregamento. Um controlador baseado em lógica *fuzzy* ajusta o perfil de resposta do veículo considerando o estado de carga da bateria, a velocidade desejada e a potência atual. As variáveis de entrada incluem o estado de carga (SoC) da bateria e o erro de velocidade, enquanto a saída ajusta a potência conforme necessário.

Duas variáveis de entrada foram definidas: o estado de carga (SoC) da bateria e o erro de velocidade. O SoC possui duas funções de pertinência (baixo e alto), enquanto o erro de velocidade tem quatro funções (eN1, eZ, eP1, eP2). A saída possui quatro funções de pertinência, ajustando a potência conforme necessário $P_{N1}, P_Z, P_{P1}, P_{P2}$.

As regras para o controlador *fuzzy* estão na Tabela 4.

O conjunto de regras apresentado na tabela 4 foi realizado baseando-se: (i) No mapa de eficiência do motor e (ii) na curva de eficiência isotérmica do sistema de armazenamento de energia (Figura 4). Esta última, indica:

- **Região de Alta Eficiência**: A região vermelha indica que a bateria opera com alta eficiência isotérmica (0.85) em estados de carga mais altos e correntes mais baixas.

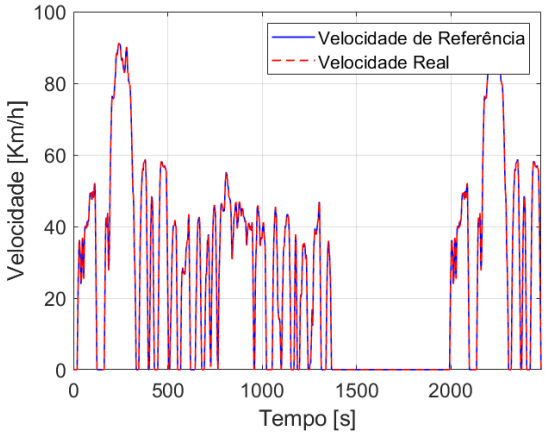
Tabela 4. Regras do Controlador Baseado em Lógica Difusa

Regra	Condição	Consequência
1	Se SOC é Baixo e Erro é Zero	Então Pot é P_Z
2	Se SOC é Alto e Erro é Zero	Então Pot é P_Z
3	Se SOC é Baixo e Erro é Positivo Baixo	Então Pot é P_P1
4	Se SOC é Alto e Erro é Positivo Baixo	Então Pot é P_P1
5	Se SOC é Baixo e Erro é Positivo Alto	Então Pot é P_P1
6	Se SOC é Alto e Erro é Positivo Alto	Então Pot é P_P2
7	Se Erro é Negativo Alto	Então Pot é P_N1

- **Região de Baixa Eficiência**: A região azul escura indica baixa eficiência isotérmica (0.3), geralmente observada em estados de carga mais baixos e correntes mais altas.
- **Transição de Eficiência**: A mudança de cores de azul para vermelho com o aumento do SoC e a variação da corrente mostra como a eficiência isotérmica melhora à medida que a bateria é carregada e a corrente diminui.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Figura 5. Resposta de velocidade do sistema



A Figura 5 ilustra a resposta dinâmica de velocidade do sistema equipado com controle adaptativo de velocidade, indicando que o implemento da lógica *fuzzy* não impediu que o comportamento em termos de velocidade do sistema fosse comprometido. Ao final do ciclo FTP obteve-se uma melhora de, aproximadamente, 10% na eficiência do sistema.

A tabela 5 mostra a eficiência do sistema com e sem a ação do sistema de gerenciamento de energia para diferentes ciclos de direção. Observa-se que a consideração da melhor eficiência do sistema na estratégia de controle de velocidade proporcionou resultados favoráveis para diferentes ciclos de direção sem que houvesse comprometimento da resposta da dinâmica veicular.

Tabela 5. Comparativo da eficiência global do sistema para diferentes ciclos de direção.

Ciclo de Direção	Sem ação do EMS	Com ação do EMS
FTP	0,68	0,78
UDDS	0,68	0,75
WVUCITY	0,59	0,74
WVUSUB	0,68	0,73
WVUINTER	0,71	0,75

Figura 6. Eficiência do motor/controlador durante o ciclo de direção FTP.

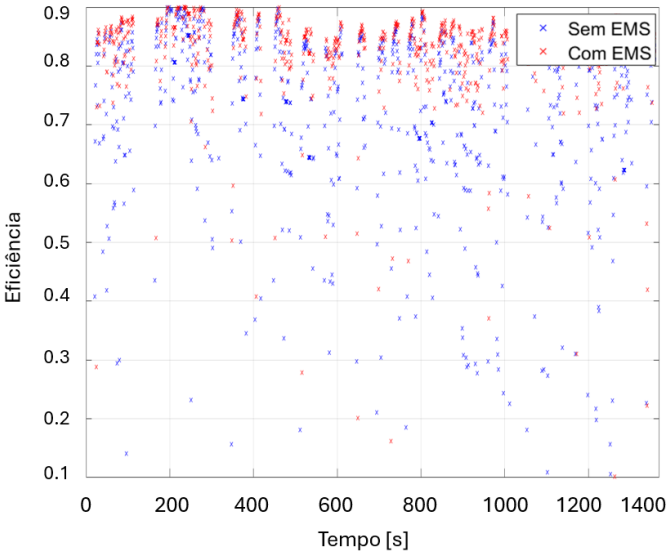
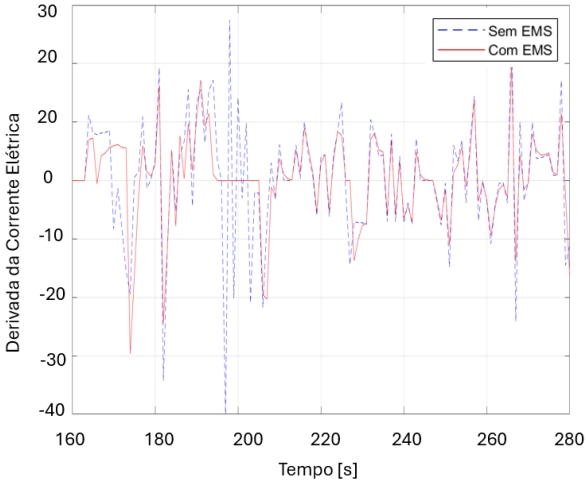


Figura 7. Eficiência do motor/controlador durante o ciclo de direção FTP.



A Figura 6 mostra que o motor e o controlador operaram em uma região de eficiência otimizada devido às restrições do sistema de controle. A eficiência econômica do veículo está ligada à redução das variações abruptas de corrente exigidas pela bateria, minimizando perdas energéticas e prolongando a vida útil dos componentes.

A análise da derivada da corrente elétrica avalia o impacto das restrições impostas ao sistema de inferência *fuzzy*. A Figura 7 mostra que as flutuações mais significativas ocorrem sem o controle de velocidade, indicando que o controle minimiza variações abruptas de corrente.

A Figura 8 demonstra que o controlador minimizou as variações de corrente durante os testes dinâmicos, acompanhando satisfatoriamente a referência de velocidade estabelecida pelo condutor (Figura 5).

4. CONCLUSÕES

Este estudo avaliou os impactos do controle adaptativo de velocidade na eficiência dos veículos elétricos. Observou-se que o veículo respondeu eficientemente às variações de velocidade, atendendo aos requisitos do sistema sem prejuízos. A análise incluiu a minimização de transitórios de corrente provocados por demandas abruptas de potência.

O sistema ajusta corrente e torque no motor para responder a essas demandas, melhorando a performance, mas impondo desafios à gestão de energia e podendo reduzir a eficiência de componentes críticos como sistemas de armazenamento de energia e conversores de potência. Tais operações podem também reduzir a vida útil desses componentes. Portanto, o controle adaptativo não só eleva a eficiência operacional como também pode prolongar a vida útil dos componentes críticos.

Além disso, fatores térmicos devem ser considerados para estabelecer regras *fuzzy* e melhorar os resultados, dado que as baterias tendem a se degradar mais em condições desfavoráveis de temperatura. Incorporar variáveis térmicas nas regras *fuzzy* pode otimizar o desempenho e estender a vida útil dos sistemas de armazenamento de energia, especialmente em ambientes com grandes variações de temperatura.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

Anderson, M. and Shafiullah, G. (2005). Battery energy storage technology for power systems—an overview. *Electric Power Systems Research*, 79(4), 511–520.

Beher, U. (2009). Energy management for electric and hybrid vehicles. *ATZelektronik worldwide*, 4, 4–7. doi: 10.1007/BF03242202.

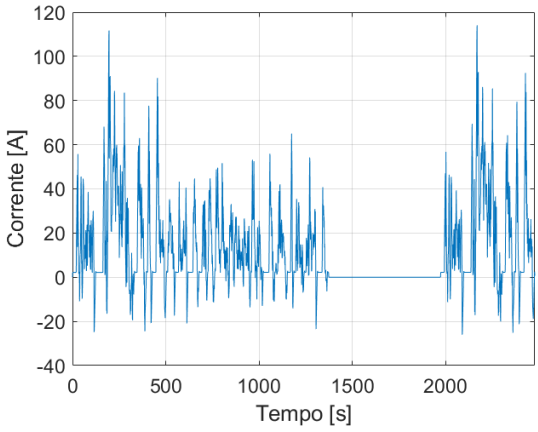
Burke, A. (2007). Batteries and ultracapacitors for electric, hybrid, and fuel cell vehicles. *Proceedings of the IEEE*, 95(4), 806–820.

Chau, K. and Wong, Y. (2002). Overview of power management in hybrid electric vehicles. *Energy Conversion and Management*, 43, 1953–1968. doi:10.1016/S0196-8904(01)00148-0.

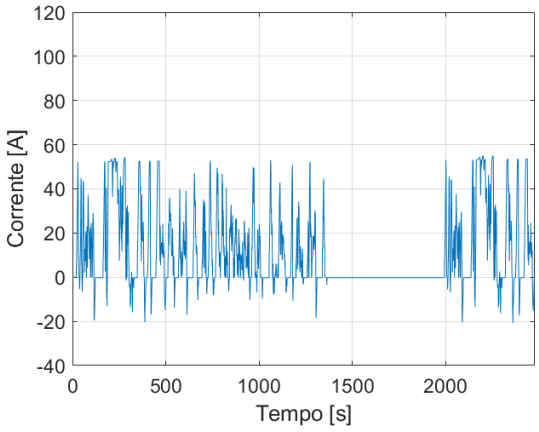
Ding, N., Prasad, K., and Lie, T.T. (2017). The electric vehicle: A review. *International Journal of Electric and Hybrid Vehicles*, 9, 49. doi:10.1504/IJEHV.2017.082816.

Eckert, J.J., de Alkmin e Silva, L.C., Santiciolli, F.M., Costa, E.S., Corrêa, F.C., and Dedini, F.G. (2018). Energy storage and control optimization for an electric vehicle. *International Journal of Energy Research*, 42, 3506 – 3523. doi:10.1002/er.4089.

(a) Variações da corrente elétrica no sistema.



(b) Sem ação do controlador *fuzzy*.



(c) Com ação do controlador *fuzzy*.

Figura 8. Comparação das variações da corrente elétrica: (a) sem ação do controlador *fuzzy* e (b) com ação do controlador *fuzzy*.

FUNDEP (2021). Rota 2030. URL `https://rota2030.fundep.ufmg.br/`.

Gauthami, R., Nair, V.V., Sathish, A., Soureesh, K.V., Karuppasamy, I., Sreelekshmi, R., Ilangovan, S., and Sujatha, S. (2020). Design and implementation of efficient energy management system in electric vehicles. 543–559. doi:10.1007/978-981-15-2256-7_49.

Kandidayeni, M., Macías, A., Boulon, L., and Kelouwani, S. (2020). Investigating the impact of ageing and thermal management of a fuel cell system on energy management strategies. *Applied Energy*. doi:10.1016/j.apenergy.2020.115293.

Katkar, V.A. and Goswami, P. (2020). Review on energy management systems for hybrid e vehicles. In *2020 International Conference on Power, Energy, Control and Transmission Systems (ICPECTS)*, 1–6. doi:10.1109/ICPECTS49113.2020.9336977.

Kene, R.O. and Olwal, T. (2023). Energy management and optimization of large-scale electric vehicle charging on the grid. *World Electric Vehicle Journal*. doi:10.3390/wevj14040095.

Kessels, J., Koot, M., Bosch, P.V.D., and Kok, D. (2008). Online energy management for hybrid electric vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 57, 3428–3440. doi:10.1109/TVT.2008.919988.

Khayyam, H. and Bab-Hadiashar, A. (2014). Adaptive intelligent energy management system of plug-in hybrid electric vehicle. *Energy*, 69, 319–335. doi:10.1016/J.ENERGY.2014.03.020.

Khayyam, H., Kouzani, A., Nahavandi, S., Marano, V., and Rizzoni, G. (2010). Intelligent energy management in hybrid electric vehicles. doi:10.5772/39530.

Kim, S., P.Y..C.S. (2021). Robust fuzzy control for energy optimization in autonomous electric vehicles. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*.

Li, J., W.Y..W.Z. (2019). A fuzzy logic-based energy management strategy for hybrid electric vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*.

Lin, C., Peng, H., Grizzle, J., and Kang, J. (2003). Power management strategy for a parallel hybrid electric truck. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 11(6), 839–849.

Lázaro, J.G.M., Quintero, A.D.R., Silva, G.G., and Zequera, R.A.G. (2023). Vehicle energy management system: a survey. In *2023 IEEE 17th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG)*, 1–7. doi:10.1109/CPE-POWERENG58103.2023.10227455.

Serpi, A. and Porru, M. (2020). An mpc-based energy management system for a hybrid electric vehicle. *2020 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, 1–6. doi:10.1109/VPPC49601.2020.9330919.

Smith, A., L.H..C.J. (2020). Adaptive fuzzy logic control for energy management in plug-in hybrid electric vehicles. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*.

Thounthong, P., Raël, S., and Davat, B. (2009). Energy management of fuel cell/battery/supercapacitor hybrid power sources for vehicle applications. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 58(6), 2679–2691.

Trovão, J., Santos, V., Antunes, C.H., Pereirinha, P., and Jorge, H. (2015). A real-time energy management architecture for multisource electric vehicles. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62, 3223–3233. doi:10.1109/TIE.2014.2376883.

Wang, J., Yuan, X., Jin, B., and Laird, I. (2019). Closed-loop dc-link voltage balancing algorithm for a four-level -type converter. In *Proc. IEEE Ind. Electron. Soc.*, 3529–3534.

Wang, X., Z.Q..S.Y. (2021). Integrated fuzzy logic control for battery and ultracapacitor management in electric vehicles. *IEEE Transactions on Power Electronics*.

Yadav, P., Vikas, Saini, V., Al-Sumaiti, A., and Kumar, R. (2023). Intelligent energy management strategies for hybrid electric transportation. In *2023 IEEE IAS Global Conference on Renewable Energy and Hydrogen Technologies (GlobConHT)*, 1–7. doi:10.1109/GlobConHT56829.2023.10087631.

Zhou, L., W.M..Y.T. (2022). Fuzzy logic-based predictive control for electric vehicle energy management. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*.