

JULIANA LOPES

**ANÁLISES SOBRE A VIDA ÚTIL DA BATERIA EM VEH NO CONTEXTO DE
GERENCIAMENTO DE POTÊNCIA E CONDIÇÕES DE DIRIGIBILIDADE**

Relatório de Pós-doutorado realizado
na Universidade Estadual Paulista
(UNESP), Faculdade de Engenharia
de São João da Boa Vista.

Supervisor: Prof. Dr.
Jozue Vieira Filho

São João da Boa Vista
2026

Resumo

Este trabalho investiga a influência das condições de operação na vida útil de baterias de íon de lítio aplicadas a veículos elétricos. A abordagem adotada estabelece uma relação direta entre parâmetros de dirigibilidade — como velocidade, inclinação do pavimento e resistência ao rolamento —, a demanda de potência e os regimes de corrente impostos ao sistema. Para isso, utilizou-se um modelo de bateria do tipo *table-based* no ambiente MATLAB/Simulink, construído a partir de dados de células comerciais e capaz de incorporar efeitos de degradação ao longo da operação. Essa abordagem permitiu a realização de análises quantitativas de vida útil em condições de uso realistas. Os resultados mostram que a durabilidade da bateria é fortemente influenciada pela severidade elétrica associada à operação, podendo variar significativamente em função das condições de dirigibilidade. Verifica-se que diferentes cenários podem resultar em níveis semelhantes de degradação quando associados a regimes de corrente equivalentes. Como desdobramento, foram investigadas estratégias de gerenciamento de potência baseadas em lógica fuzzy e o uso de supercapacitores em regimes transitórios, ampliando a análise para sistemas híbridos e condições dinâmicas. De modo geral, o trabalho contribui para a compreensão do impacto das condições reais de operação sobre a degradação de baterias e o desempenho de veículos elétricos.

Palavras-chave: Veículos elétricos; Baterias de íon de lítio; Vida útil da bateria; Degradação da bateria; Gerenciamento de potência; Sistemas de inferência fuzzy; Supercapacitores.

1. Introdução

O crescente interesse por veículos elétricos tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias voltadas ao armazenamento e ao gerenciamento de energia, sendo a bateria o principal elemento responsável pela autonomia e pelo desempenho desses sistemas [1], [2]. Nesse contexto, a durabilidade das baterias de íon de lítio torna-se um fator crítico, influenciando diretamente a viabilidade técnica e econômica desses veículos.

A degradação da bateria está associada a diversos fatores, dentre os quais se destacam os regimes de corrente impostos ao sistema ao longo da operação. Abordagens tradicionais frequentemente baseiam-se em análises simplificadas, nas quais a degradação é inferida a partir de variáveis como o estado de carga, sem considerar explicitamente as condições reais de uso do veículo [3], [4].

Entretanto, parâmetros de dirigibilidade, como velocidade, inclinação do pavimento e resistência ao rolamento, influenciam diretamente a demanda de potência e, consequentemente, os níveis de corrente solicitados à bateria [5]. A não consideração desses fatores pode levar a avaliações imprecisas da vida útil e do desempenho do sistema.

Diante desse cenário, este trabalho propõe a análise do comportamento e da vida útil de baterias aplicadas a veículos elétricos, com base na consideração explícita das condições operacionais. Para isso, adotou-se uma abordagem baseada em modelagem computacional, o que permitiu estabelecer relações entre a demanda de potência, os regimes de corrente e a degradação da bateria [6]. Adicionalmente, são exploradas estratégias de gerenciamento de potência e configurações híbridas, ampliando a análise para diferentes cenários de operação.

2. Objetivos

2.1 Objetivo Geral

Desenvolver e analisar estratégias de gerenciamento de potência aplicadas a veículos elétricos, com ênfase na avaliação do impacto das condições operacionais no comportamento e na vida útil das baterias.

2.2 Objetivos Específicos

- Modelar o sistema de propulsão elétrica e as fontes de energia associadas;
- Desenvolver e avaliar estratégias de gerenciamento de potência baseadas em lógica fuzzy;
- Investigar a influência das condições de dirigibilidade na demanda de potência do veículo;
- Analisar o comportamento do estado de carga da bateria sob diferentes condições de operação;
- Avaliar, de forma quantitativa, o impacto das condições operacionais na degradação e na vida útil da bateria.

3. Projeto de Pesquisa Proposto

O projeto de pesquisa proposto teve como objetivo o desenvolvimento e a análise de estratégias de gerenciamento de potência aplicadas a veículos elétricos, com ênfase na integração de múltiplas fontes de energia, incluindo a bateria, o supercapacitor e a fonte de autonomia [7], [8].

A proposta previa a modelagem do sistema de propulsão elétrica e das fontes de energia associadas, bem como o desenvolvimento de estratégias de gerenciamento baseadas em sistemas de inferência fuzzy, com o objetivo de otimizar a distribuição de potência entre as fontes [9], [10]. Nesse contexto, buscava-se avaliar o impacto das diferentes estratégias de controle sobre o desempenho do sistema e o comportamento do estado de carga da bateria.

Adicionalmente, o projeto contemplava a análise da influência das condições de dirigibilidade — como velocidade, inclinação do pavimento e resistência ao rolamento — na demanda de potência do veículo e, consequentemente, no desempenho energético do sistema.

De forma geral, o projeto foi estruturado com foco na compreensão das relações entre a demanda de potência, as estratégias de gerenciamento e o comportamento das fontes de energia, com especial atenção aos efeitos associados ao uso e à preservação da bateria (*battery care*).

4. Metodologia Desenvolvida

4.1 Modelagem da Bateria

O modelo de bateria inicialmente proposto no projeto de pesquisa, baseado em formulações analíticas do tipo circuito equivalente, foi substituído por uma abordagem *table-based*, disponível no ambiente MATLAB/Simulink [6].

Sua implementação foi realizada por meio do aplicativo *Battery Builder*, o que permitiu a construção de *packs* a partir de células comerciais reais. A principal motivação para essa substituição foi a possibilidade de:

- Utilizar dados reais de células comercializáveis;
- Incorporar modelos de degradação baseados em ciclagem;
- Avaliar diretamente a perda de capacidade ao longo do tempo sem necessidade de desenvolvimento adicional de modelos de envelhecimento.

Com essa abordagem, tornou-se possível realizar análises quantitativas do tempo de vida do pack, mantendo a consistência física e a viabilidade computacional para simulações de longo prazo.

4.2 Redefinição do Sistema de Estudo

Em contraste com a proposta original, que previa um sistema híbrido de fontes de energia composto por bateria, supercapacitor e fonte de autonomia, o estudo foi redirecionado para um veículo elétrico puramente a bateria (BEV) [7], [11].

Essa decisão foi motivada pelas capacidades do toolbox adotado, que permite:

- Avaliação direta de degradação dependente de corrente;

- Simulação consistente de ciclos completos de carga/descarga;
- Análise isolada do impacto das condições operacionais no envelhecimento da bateria.

Com isso, o trabalho foi direcionado à análise da vida útil do *pack* sob diferentes condições de operação, como etapa prévia à investigação de sistemas híbridos, o que permitiu isolar os efeitos associados à bateria.

4.3 Análise de Vida Útil sob Condições de Dirigibilidade

Com base nessa reformulação, foi desenvolvido um estudo focado na influência das condições de dirigibilidade sobre a vida útil da bateria, que está consolidado no artigo em desenvolvimento.

A proposta central consiste em estabelecer uma relação direta entre:

- Demanda de potência do veículo, determinada por parâmetros físicos (velocidade, inclinação e resistência ao rolamento) [1], [12];
- Regimes de corrente impostos à bateria; e
- Degradação ao longo do tempo.

Os resultados obtidos permitiram determinar limites quantitativos de durabilidade do *pack*, evidenciando a forte dependência das condições operacionais.

Como exemplo, observou-se que, em condições moderadas (≈ 40 km/h, $C_{rr} = 0,015$), a vida útil da bateria se manteve em níveis elevados. Em contrapartida, sob condições mais severas (≈ 80 km/h, inclinação de 8% e $C_{rr} \approx 0,13$), verificou-se uma redução expressiva da vida útil, associada à operação em regimes de alta corrente.

Esses resultados demonstram que a degradação é governada predominantemente pela severidade elétrica imposta ao sistema, e não apenas pelo número de ciclos, conforme discutido no artigo.

5. Resultados

5.1 Estrutura da Análise

Os resultados apresentados nesta seção referem-se ao estudo de um veículo elétrico do tipo SUV cuja fonte de energia para tração é exclusivamente um banco de baterias. Foram investigados cenários definidos por diferentes combinações de velocidade constante, coeficiente de resistência ao rolamento e inclinação do pavimento. Esse estudo permitiu estabelecer uma relação direta entre as condições operacionais, a demanda de potência e a severidade elétrica imposta ao sistema.

No contexto da proposta inicial do projeto, desdobramentos envolvendo estratégias de gerenciamento de potência em sistemas híbridos, desenvolvidos no âmbito das iniciações científicas associadas a este trabalho, são apresentados na Seção 8.

5.2 Influência das Condições Operacionais na Vida Útil da Bateria

Os resultados obtidos evidenciam que a vida útil da bateria é fortemente influenciada pelas condições de operação do veículo, sendo governada principalmente pela intensidade da corrente associada à demanda de potência, e não apenas pelo número de ciclos.

Inicialmente, analisou-se a influência do coeficiente de resistência ao rolamento para uma velocidade constante de 40 km/h. Observa-se que pequenas variações em C_{rr} , dentro de faixas típicas de pavimento, resultam em reduções significativas na vida útil da bateria [3]. Esse comportamento revela uma alta sensibilidade do sistema em regimes de baixa e média severidade, nos quais incrementos na demanda de potência se traduzem diretamente em aumento da corrente e aceleração da degradação.

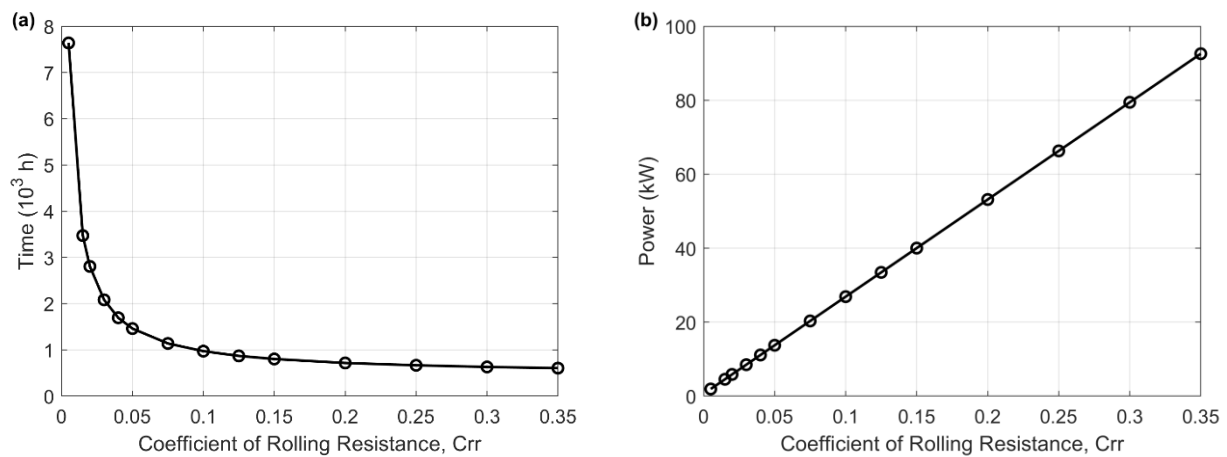


Figure 1 – Battery pack lifespan (a) and required power (b) as a function of C_{rr} , considering the operation of the vehicle at a constant speed of 40 km/h.

À medida que o coeficiente de resistência ao rolamento assume valores mais elevados, a redução da vida útil passa a ocorrer de forma menos acentuada, caracterizando um regime de saturação, no qual a bateria já opera sob condições de alta corrente, tornando-se menos sensível a aumentos adicionais na severidade operacional.

A análise conjunta dos efeitos da velocidade e da inclinação do pavimento reforça esse comportamento. Para valores baixos de inclinação, o aumento da velocidade resulta em crescimento gradual da demanda de potência e consequente redução significativa da vida útil da bateria. No entanto, para inclinações mais elevadas, o sistema passa a operar predominantemente em regimes de alta corrente, nos quais a vida útil é menos sensível a variações adicionais de velocidade.

Esse efeito é ainda mais evidente ao se analisar a influência da inclinação em diferentes velocidades. Em baixas velocidades, a vida útil da bateria diminui acentuadamente à medida que a inclinação aumenta. Já em velocidades mais elevadas, observa-se uma redução global da vida útil e uma diminuição da sensibilidade do sistema à variação da inclinação, indicando que o ponto de operação já se encontra em uma região dominada por efeitos de alta severidade elétrica.

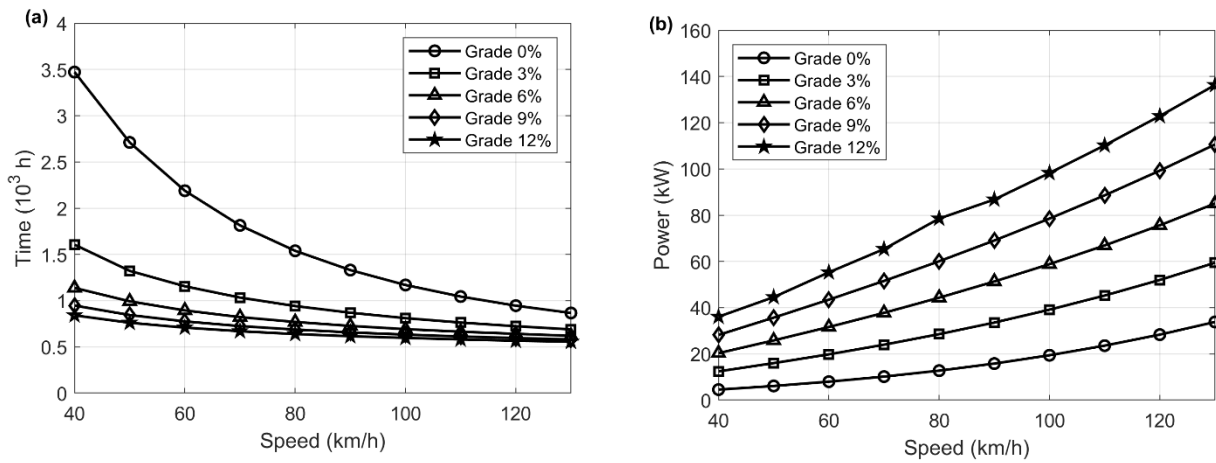


Figure 2 – Battery pack lifespan (a) and required power (b) as a function of vehicle speed, for different G values, considering $C_{rr} = 0.015$.

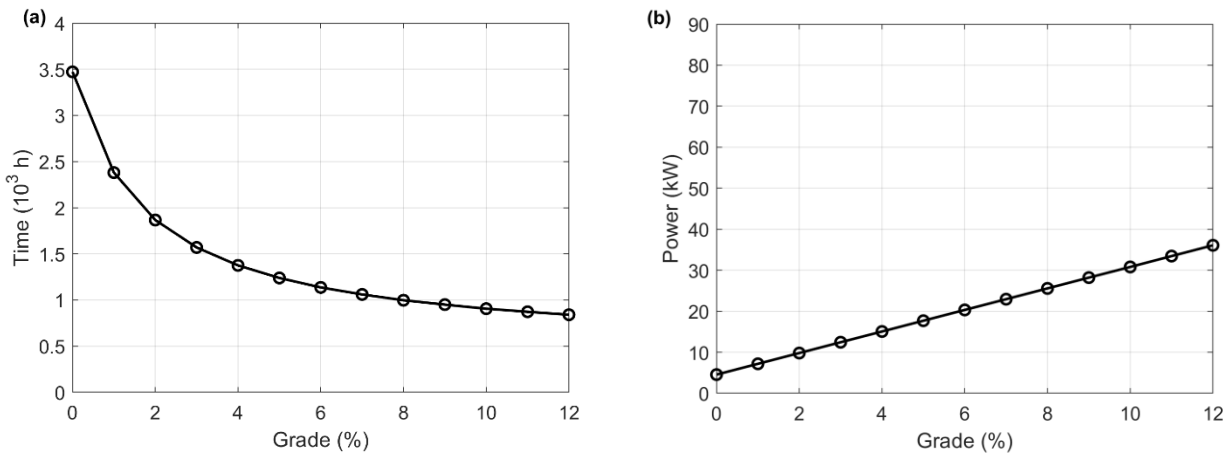


Figure 3 - Battery pack lifespan (a) and required power (b) as a function of pavement grade, at a constant speed of 40 km/h ($C_{rr} = 0.015$).

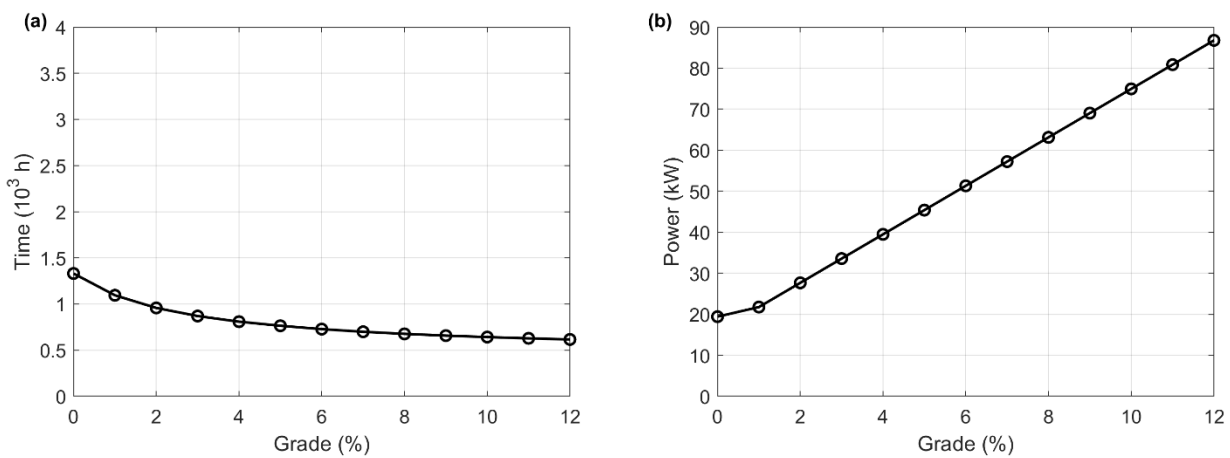


Figure 4 - Battery pack lifespan (a) and required power (b) as a function of pavement grade, at a constant speed of 90 km/h ($C_{rr} = 0.015$).

De forma geral, os resultados demonstram que diferentes combinações de parâmetros operacionais podem levar a níveis semelhantes de degradação, desde que resultem em regimes de corrente equivalentes. Esse comportamento reforça a ideia de que a degradação da bateria é governada pela severidade elétrica acumulada ao longo do tempo, e não por variáveis isoladas [3], [5].

No intervalo de operação analisado, verificou-se que a vida útil da bateria pode variar em mais de uma ordem de grandeza, de condições favoráveis de operação a cenários severos, caracterizados por altas demandas de potência. Esse resultado evidencia a importância da consideração explícita das condições reais de uso no dimensionamento e na análise de sistemas de armazenamento de energia para veículos elétricos.

6. Aderência ao Projeto Original

6.1 Atividades Desenvolvidas Conforme Planejado

Diversos elementos centrais do projeto original foram efetivamente desenvolvidos durante o período de pós-doutorado.

Destacam-se:

- O estudo de estratégias de gerenciamento de potência, com ênfase em sistemas baseados em lógica fuzzy [9];
- A análise da influência das condições de dirigibilidade na demanda de potência e no comportamento energético do sistema;
- A investigação da dinâmica do estado de carga das baterias (SoC) como variável-chave para avaliação de desempenho e degradação;
- A formação de recursos humanos, com desenvolvimento de projetos de iniciação científica diretamente vinculados ao tema.

Além disso, a proposta de utilização de ferramentas computacionais para simulação (Matlab/Simulink) foi integralmente mantida, com ampliação significativa do nível de fidelidade dos modelos empregados.

6.2 Modificações Realizadas

Embora os objetivos gerais tenham sido mantidos, houve uma reformulação metodológica relevante em relação ao projeto original. A principal modificação foi a substituição do modelo analítico de bateria por uma abordagem do tipo *table-based* do MATLAB [6].

Essa abordagem possibilitou o uso de dados reais de células comerciais, a incorporação direta de modelos de degradação por ciclagem e a avaliação quantitativa do tempo de vida da bateria, sem necessidade de modelagem adicional.

Como consequência, o foco do estudo foi parcialmente redirecionado de um sistema híbrido completo (bateria, supercapacitor e fonte de autonomia) para uma análise aprofundada de um veículo puramente elétrico, com ênfase na degradação da bateria sob condições reais de operação.

Essa mudança permitiu a transição de uma análise predominantemente qualitativa (SoC e distribuição de potência) para uma avaliação quantitativa da vida útil do sistema, alinhada a problemas reais de engenharia.

6.3 Justificativa Técnica das Modificações

As modificações implementadas não representam um afastamento do escopo original, mas sim um aprofundamento técnico dos objetivos propostos. No projeto original, a preocupação com a bateria (*battery care*) já era central, e a abordagem adotada no pós-doutorado permitiu tratar diretamente os problemas de degradação e de vida útil, que constituem a consequência final do gerenciamento de potência [7], [8]. Além disso, possibilitou o estabelecimento de uma relação física consistente entre condições de dirigibilidade, demanda de potência, corrente e degradação, eliminando a necessidade de inferências indiretas baseadas exclusivamente no estado de carga (SoC).

Adicionalmente, os estudos desenvolvidos no contexto das iniciações científicas mantiveram a investigação de estratégias fuzzy em sistemas híbridos, conforme proposto, ao mesmo tempo em que ampliaram sua aplicação a diferentes escalas, como no caso do micro-ônibus. Esses trabalhos também complementaram a análise ao incorporar o uso de supercapacitores em regimes transitórios, não contemplados pela abordagem em regime permanente adotada no estudo principal.

Dessa forma, o conjunto dos trabalhos realizados abrange, de maneira integrada, tanto regimes estacionários, no contexto do pós-doutorado, quanto regimes transitórios, explorados nas iniciações científicas, além de contemplar sistemas puramente elétricos e híbridos.

6.4 Atividades Não Executadas

No escopo principal do pós-doutorado, não foi implementada uma estratégia completa de gerenciamento de potência que envolva simultaneamente a bateria, o supercapacitor e a fonte de autonomia.

Entretanto, esse objetivo foi parcialmente atendido por meio dos trabalhos de iniciação científica, nos quais:

- Foram desenvolvidas e avaliadas estratégias fuzzy para sistemas híbridos;
- Foram investigadas arquiteturas alternativas e os efeitos de diferentes fontes de energia.

Assim, ainda que não concentrado em um único modelo integrado, o objetivo foi distribuído e explorado de forma complementar, o que resultou em maior abrangência temática.

7. Produção Acadêmica e Atividades Desenvolvidas

7.1 Formação de Recursos Humanos

A formação de alunos de graduação constituiu um dos eixos centrais deste projeto de pós-doutorado, conforme previsto na proposta original. Estão em desenvolvimento três projetos de iniciação científica diretamente relacionados ao gerenciamento e ao uso de energia em veículos elétricos.

7.1.1 Aluno Caio Carneiro de Menezes, RA 231490241 (PIBIC)

O trabalho do aluno está em desenvolvimento e tem como foco a implementação de uma estratégia de gerenciamento de potência baseada em sistemas de inferência fuzzy, aplicada a um sistema híbrido composto por uma bateria e uma fonte de autonomia [9], [13].

Destaca-se o cuidado metodológico adotado na formação e condução do trabalho. Inicialmente, foi realizada uma introdução estruturada aos sistemas de inferência fuzzy, organizada na forma de uma disciplina, com abordagem de fundamentos teóricos, variáveis linguísticas, funções de pertinência e regras. Em seguida, foram desenvolvidos exemplos didáticos e realizadas implementações no *Fuzzy Logic Toolbox* do MATLAB, culminando na estruturação progressiva do controlador, desde casos simplificados até sua aplicação ao sistema completo.

Têm sido realizadas avaliações de desempenho sob diferentes condições iniciais, com ênfase em variações no estado de carga da bateria, visando analisar a capacidade de estabilização do controle. A Figura 5 foi obtida a partir dessas simulações, permitindo avaliar a dinâmica de distribuição de potência entre a bateria e a fonte de autonomia.

Observa-se que o controlador responde adequadamente às variações da potência requerida, promovendo uma divisão coerente entre as fontes de energia. Destaca-se, ainda, a manutenção do estado de carga da bateria dentro de uma faixa operacional estável ao longo da simulação, sem conduzir o sistema a condições de saturação ou depleção.

Esse conjunto de resultados evidencia a consistência da estratégia desenvolvida e sua capacidade de garantir o equilíbrio energético do sistema sob diferentes condições de operação.

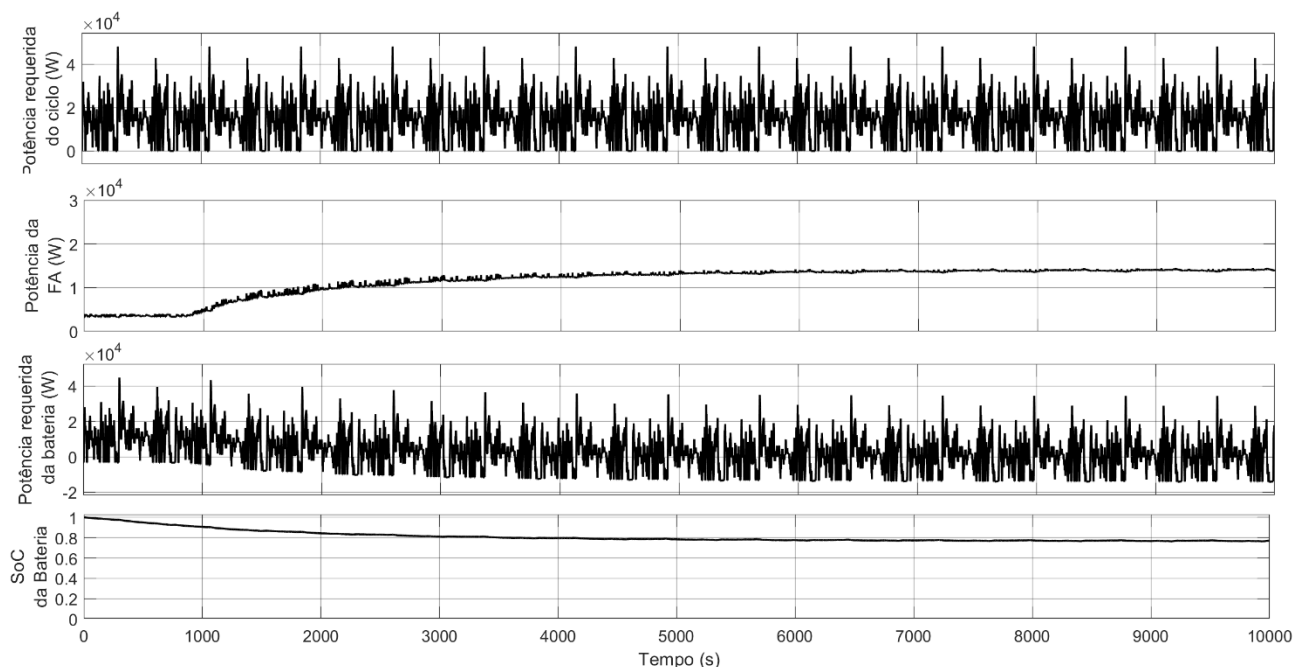


Figura 5 – Evolução temporal do sistema de fontes de energia com estratégia de gerenciamento de potência baseada em sistema de inferência fuzzy. De cima para baixo: potência requerida pelo ciclo, potência fornecida pela fonte de autonomia, potência requerida da bateria e evolução do estado de carga (SoC) ao longo do tempo.

7.1.2 Aluna Raila Emily Maia, RA 231491069 (FAPESP)

O projeto de iniciação científica da aluna consiste no desenvolvimento de uma estratégia de gerenciamento de potência fuzzy aplicada a um sistema híbrido semelhante (bateria + fonte de autonomia), porém voltado à configuração de micro-ônibus elétrico [9], [10].

O principal ponto de contribuição deste trabalho é a investigação da robustez de controladores fuzzy frente a diferentes escalas de sistema, evidenciando que:

- Um controlador fuzzy bem estruturado pode operar de forma eficiente em sistemas de mesma arquitetura, ainda que com dimensionamentos distintos;
- A diferença significativa entre os sistemas analisados (SUV vs. micro-ônibus) não inviabiliza a aplicação da mesma lógica de controle;
- Ainda que controladores fuzzy não sejam intrinsecamente adaptativos, é possível obter bom desempenho em condições operacionais distintas por meio de um projeto criterioso das regras e das funções de pertinência.

Esse resultado dialoga diretamente com uma limitação frequentemente apontada na literatura, contribuindo com uma abordagem prática para superá-la.

7.1.3 Aluno Robert Nicolas Giusti de Oliveira, RA 231490976 (IC voluntária – UNESP)

O trabalho desenvolvido com o aluno tem como foco um sistema puramente elétrico baseado em bateria, incluindo análises que consideram a inserção de supercapacitores [14] – [16].

O objetivo central é avaliar, de forma quantitativa, o impacto do uso de supercapacitores na vida útil da bateria, com ênfase em regimes de alta demanda de potência, especialmente durante fases de aceleração. Para isso, o estudo envolve a modelagem da demanda de potência em regimes transitórios e a análise do impacto dos picos de potência na degradação da bateria, incluindo comparações entre a operação com e sem supercapacitores.

Do ponto de vista metodológico, um dos principais desafios consistiu no desenvolvimento de um modelo em Simulink capaz de representar adequadamente os ciclos de carga e descarga ao longo do tempo. Diferentemente de abordagens com ciclos fixos, a descarga é iniciada imediatamente após a bateria atingir seu limite máximo de carga, sendo esse limite progressivamente reduzido a cada ciclo devido à degradação. Isso elimina a imposição de ciclos pré-definidos e permite que a dinâmica seja governada pelo estado de carga da bateria, evitando períodos ociosos e proporcionando uma representação mais consistente do envelhecimento.

Atualmente, investiga-se a sensibilidade do modelo *battery table-based* a regimes de pico de potência. Caso essa sensibilidade não seja adequadamente capturada, está prevista a incorporação de um mecanismo adicional de penalização da capacidade, com o objetivo de representar os efeitos de correntes elevadas na degradação.

A Figura 6 foi obtida a partir da simulação do comportamento da bateria ao longo do tempo sob essa estratégia de controle. Observa-se, ao longo dos ciclos, uma evolução clara do sistema, evidenciada pela redução progressiva da tensão e da eficiência, além do acúmulo dos efeitos de degradação da capacidade.

Esse estudo complementa diretamente o trabalho desenvolvido no pós-doutorado, centrado em condições de velocidade constante, ao estender a análise a regimes dinâmicos e mais severos de operação.

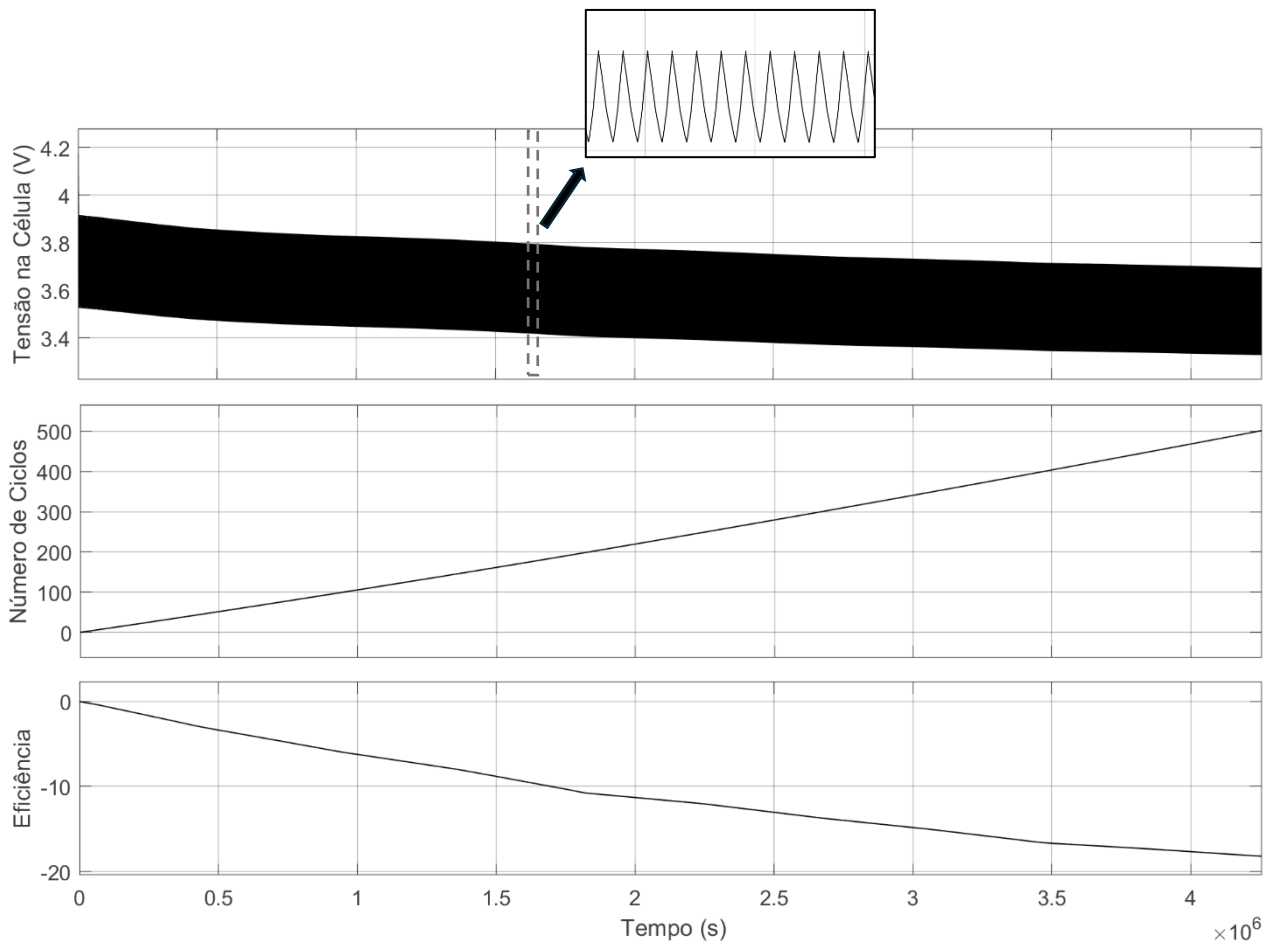


Figura 6 – Evolução temporal da tensão da célula, do número de ciclos acumulados e da eficiência ao longo da operação, considerando ciclos de carga e descarga não periódicos.

6. Discussão e Conclusões

Os resultados obtidos evidenciam a forte influência das condições operacionais sobre a degradação e a vida útil de baterias aplicadas a veículos elétricos. A análise em regime permanente permitiu estabelecer uma relação consistente entre a velocidade, a inclinação, a resistência ao rolamento, a demanda de potência e os regimes de corrente impostos ao sistema.

Verifica-se que diferentes combinações dessas variáveis podem levar a níveis semelhantes de degradação, desde que resultem em solicitações elétricas equivalentes. Esse comportamento indica que a vida útil da bateria é determinada pela severidade elétrica imposta ao sistema ao longo do tempo, e não por parâmetros operacionais isolados.

A adoção de um modelo de bateria do tipo *table-based*, baseado em dados reais e com representação direta da degradação, mostrou-se adequada para a realização de análises quantitativas de vida útil, permitindo relacionar de forma consistente o uso do sistema ao envelhecimento da bateria.

Do ponto de vista metodológico, a análise inicial em um sistema puramente elétrico permitiu compreender, de forma isolada, os fenômenos associados à bateria, evitando interferências de múltiplas fontes e estabelecendo uma base consistente para estudos mais complexos. Os trabalhos desenvolvidos nas iniciações científicas complementam essa abordagem ao incorporar estratégias de gerenciamento de potência e a análise de regimes transitórios, ampliando o escopo da investigação.

Como limitação, destaca-se que a análise principal foi conduzida em regime permanente, o que não contempla diretamente efeitos transitórios rápidos. Adicionalmente, a representação da degradação depende da sensibilidade do modelo adotado a regimes de alta corrente, aspecto ainda em investigação.

De forma geral, o trabalho contribui para a compreensão do impacto das condições reais de operação sobre a durabilidade de sistemas de armazenamento de energia, fornecendo subsídios para o desenvolvimento de estratégias de gerenciamento e para o dimensionamento mais eficiente de veículos elétricos [3], [5].

Referências

- [1] J. Larminie and J. Lowry, *Electric Vehicle Technology Explained*, 2nd ed. Chichester, U.K.: Wiley, 2012.
- [2] M. Ehsani, Y. Gao, S. Longo and K. Ebrahimi, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles*, 2nd ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2009.
- [3] J. S. Edge et al., “Lithium ion battery degradation: what you need to know,” *Physical Chemistry Chemical Physics*, vol. 23, pp. 8200–8221, 2021, doi: 10.1039/D1CP00359C.
- [4] C. R. Birkl et al., “Degradation diagnostics for lithium ion cells,” *Journal of Power Sources*, vol. 341, pp. 373–386, 2017, doi: 10.1016/j.jpowsour.2016.12.011.
- [5] P. Keil and A. Jossen, “Charging protocols for lithium-ion batteries and their impact on cycle life—An experimental study with different 18650 high-power cells,” *Journal of Energy Storage*, vol. 6, pp. 125–141, 2016, doi: 10.1016/j.est.2016.04.003.
- [6] G. L. Plett, *Battery Management Systems, Volume I: Battery Modeling*. Boston, MA, USA: Artech House, 2015.
- [7] S. Onori, M. Serra and G. Rizzoni, *Hybrid Electric Vehicles: Energy Management Strategies*. London, U.K.: Springer, 2016, doi: 10.1007/978-1-4471-6781-5.
- [8] C. Zhang et al., “A review of energy management strategies for hybrid electric vehicles,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 67, no. 12, pp. 11020–11036, 2018, doi: 10.1109/TVT.2018.2876939.
- [9] T. J. Ross, *Fuzzy Logic with Engineering Applications*, 3rd ed. Chichester, U.K.: Wiley, 2010.
- [10] F. R. Salmasi, “Control strategies for hybrid electric vehicles: Evolution, classification, comparison, and future trends,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 56, no. 5, pp. 2393–2404, 2007, doi: 10.1109/TVT.2007.899933.
- [11] S. Onori, L. Serrao e G. Rizzoni, *Hybrid Electric Vehicles: Energy Management Strategies*. Springer, 2016.

- [12] L. Guzzella and A. Sciarretta, *Vehicle Propulsion Systems: Introduction to Modeling and Optimization*, 2nd ed. Berlin, Germany: Springer, 2007, doi: 10.1007/978-3-540-74696-1.
- [13] S. Li et al., “Fuzzy logic-based energy management strategy for hybrid electric vehicles,” *Applied Energy*, vol. 262, 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.114379.
- [14] A. Burke, “Ultracapacitors: Why, how, and where is the technology,” *Journal of Power Sources*, vol. 91, no. 1, pp. 37–50, 2000, doi: 10.1016/S0378-7753(00)00485-7.
- [15] P. Simon and Y. Gogotsi, “Materials for electrochemical capacitors,” *Nature Materials*, vol. 7, pp. 845–854, 2008, doi: 10.1038/nmat2297.
- [16] J. M. Miller and A. F. Burke, “Electrochemical capacitors: Challenges and opportunities for real-world applications,” *The Electrochemical Society Interface*, vol. 17, no. 1, pp. 53–57, 2008.