

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**ADRIELE ORTIZ GOMES**

**SISTEMAS HÍBRIDOS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA  
APLICADOS À VEÍCULOS ELÉTRICOS: UMA REVISÃO DA  
LITERATURA**

**PONTA GROSSA**

**2025**

**ADRIELE ORTIZ GOMES**

**SISTEMAS HÍBRIDOS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA  
APLICADOS À VEÍCULOS ELÉTRICOS: UMA REVISÃO DA  
LITERATURA**

**Hybrid energy storage systems  
applied to electric vehicles: A literature review**

Trabalho de conclusão de curso de graduação  
apresentado como requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientadora: Prof<sup>a</sup> Dra. Fernanda Cristina Correa

**PONTA GROSSA**

**2025**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**ADRIELE ORTIZ GOMES**

**SISTEMAS HÍBRIDOS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA  
APLICADOS À VEÍCULOS ELÉTRICOS: UMA REVISÃO DA  
LITERATURA**

Trabalho de conclusão de curso de graduação  
apresentado como requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 09/dezembro/2025

---

Fernanda Cristina Correa  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Marcella Scoczynski Ribeiro Martins  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

José Rodolfo Galvão  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**PONTA GROSSA**

**2025**

## RESUMO

Este trabalho tem como objetivo organizar e analisar a literatura sobre sistemas híbridos de armazenamento de energia (HESS) composto por baterias e supercapacitores aplicados a veículos elétricos. Metodologicamente, realizou-se uma revisão sistemática (2020–2025) nas bases ScienceDirect, Scopus e Web of Science, com acesso via CAPES. Empregaram-se o *Methodi Ordinati* para ranqueamento (peso temporal  $\alpha = 10$ ) e o fluxograma PRISMA para triagem. A busca inicial retornou 176 registros; após remoção de duplicidades e filtros de escopo, 33 artigos compuseram a análise qualitativa. Os resultados e a discussão indicam que: (i) modelos de circuito equivalente para baterias e modelos RC para supercapacitores são predominantes e suficientes para estudos de energia/envelhecimento; (ii) topologias semi-ativas e totalmente ativas superaram a passiva em eficiência e mitigação de estresse na bateria; (iii) estratégias baseadas em modelos de controle preditivo, previsão de demanda e aprendizado (p. ex., *deep* e *reinforcement learning*) tendem a superar abordagens heurísticas por reduzir perdas, atenuar picos de corrente e estabilizar o barramento CC; e (iv) validações em ciclos padronizados e *hardware-in-the-loop* reforçam ganhos de eficiência e prolongamento de vida útil. Conclui-se que a combinação de modelagem adequada, escolha topológica e do modelo de controle preditivo é determinante para elevar desempenho e durabilidade do armazenamento em veículos elétricos, ao mesmo tempo em que se identificam lacunas em testes de campo prolongados, integração térmica e avaliação do custo-benefício entre topologias.

**Palavras-chaves:** veículos elétricos; baterias de íon-lítio; HESS; supercapacitores; gerenciamento de energia; MPC.

## ABSTRACT

This work aims to organize and analyze the literature on hybrid energy storage systems (HESS) composed of batteries and supercapacitors applied to electric vehicles. Methodologically, a systematic review (2020–2025) was conducted in the ScienceDirect, Scopus, and Web of Science databases, with access via CAPES. The *Methodi Ordinati* was employed for article ranking (temporal weight  $\alpha = 10$ ), and the PRISMA flowchart was used for screening. The initial search returned 176 records; after duplicate removal and scope filtering, 33 articles were included in the qualitative analysis. The results and discussion indicate that: (i) equivalent circuit models for batteries and RC models for supercapacitors are predominant and sufficient for energy and aging studies; (ii) semi-active and fully active topologies outperform passive ones in terms of efficiency and battery stress mitigation; (iii) strategies based on predictive control models, demand forecasting, and learning-based approaches (e.g., *deep* and *reinforcement learning*) tend to outperform heuristic methods by reducing losses, attenuating current peaks, and stabilizing the DC bus; and (iv) validations using standardized driving cycles and *hardware-in-the-loop* setups reinforce efficiency gains and lifetime extension. It is concluded that the combination of appropriate modeling, topological selection, and predictive control strategies is decisive for enhancing performance and durability of energy storage in electric vehicles, while research gaps remain in long-term field testing, thermal integration, and cost–benefit evaluation among different topologies.

**Keywords:** electric vehicles; lithium-ion batteries; HESS; supercapacitors; energy management; MPC.

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

VE	Veículos elétricos
BMS	Sistema de Gerenciamento de Baterias
HESS	Sistemas Híbridos de Armazenamento de Energia
EMS	Estratégias de Gerenciamento de Energia
MPC	Controle Preditivo de Modelo
BESS	Sistema de Armazenamento de Energia em Bateria
SoC	Estado de carga
DoD	Profundidade de Descarga
SoH	Estado de Saúde
NEDC	Novo Ciclo de Condução Europeu
WLTP	<i>Worldwide Harmonised Light Vehicles Test Procedure</i>
BS-HESS	Sistema Híbrido de Armazenamento de Energia com Baterias e Supercapacitores
ECM	Modelo de Circuito Equivalente
UDDS	<i>Urban Dynamometer Driving Schedule</i>
HPPS	<i>Hybrid Pulse Power Characterization</i>
NMPC	Controle Preditivo de Modelo Não Linear
LPV-MPC	Controle Preditivo de Modelo Linear com Parâmetros Variantes no tempo
PID	Controle Proporcional-Integral-Derivativo
DNN	Redes Neurais Profundas
ADALINE	Rede Neural Linear Adaptativa
LPF	<i>Low-Pass Filter</i>
iPMCS	<i>Intelligent Power Management Control System</i>
LIB	Baterias de Íons de Lítio
VRB	Baterias Redox de Vanádio

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>6</b>
<b>1.1 OBJETIVOS</b> .....	<b>7</b>
1.1.1 Objetivo geral .....	7
1.1.2 Objetivos específicos .....	7
<b>1.2 JUSTIFICATIVA</b> .....	<b>7</b>
<b>1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO</b> .....	<b>8</b>
<b>2 METODOLOGIA</b> .....	<b>9</b>
<b>2.1 BASES DE DADOS CONSULTADAS</b> .....	<b>9</b>
<b>2.2 ETAPAS DO PROCESSO DE SELEÇÃO</b> .....	<b>9</b>
<b>2.3 EQUAÇÃO DO <i>METHODI ORDINATI</i></b> .....	<b>10</b>
<b>2.4 FERRAMENTAS DE APOIO</b> .....	<b>10</b>
<b>2.5 ANÁLISE DOS ARTIGOS SELECIONADOS</b> .....	<b>10</b>
<b>2.6 RESULTADOS E DISCUSSÕES DAS ANÁLISES EFETUADAS</b> .....	<b>11</b>
2.6.1 Sistema de Armazenamento de Energia em Bateria (BESS) .....	16
<b>2.7 SISTEMAS HÍBRIDOS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA (HESS)</b> .....	<b>17</b>
2.7.1 Modelagem Matemática de Sistemas Híbridos de Armazenamento de Energia ....	23
2.7.2 Impacto da Topologia de HESS na Eficiência Energética e na Vida Útil das Baterias	25
2.7.3 Estratégias de Gerenciamento de Energia .....	26
<b>2.8 CICLO DE VIDA, PROFUNDIDADE DE DESCARGA E IMPLICAÇÕES PARA HESS</b> .....	<b>32</b>
<b>3 DA MODELAGEM ÀS EVIDÊNCIAS: ANÁLISE DOS RESULTADOS</b> .....	<b>34</b>
<b>4 CONCLUSÃO</b> .....	<b>37</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por soluções de mobilidade elétrica tem colocado os veículos elétricos como alternativa central para a redução da dependência de combustíveis fósseis e mitigação das emissões de gases de efeito estufa. A transição para a mobilidade elétrica representa uma das principais estratégias globais de enfrentamento às mudanças climáticas e de promoção de eficiência energética no setor de transportes. Veículos elétricos (VEs) utilizam tipicamente baterias de íon-lítio, conversores CC-CC e motores de tração como elementos centrais para a transmissão de potência (THANGAVEL *et al.*, 2023). Projeções indicam que, em um futuro próximo, esses veículos poderão superar os automóveis a combustão em termos de custo e desempenho, consolidando-se como alternativa economicamente viável e ambientalmente necessária (VEZA *et al.*, 2023; LIU *et al.*, 2021).

Apesar das vantagens, persistem limitações críticas. As baterias de íon-lítio apresentam desempenho insatisfatório em baixas temperaturas, com degradação acelerada que compromete a utilização em países de clima frio (JAGUEMONT; BOULON; DUBÉ, 2016). Além disso, aspectos relacionados à segurança, durabilidade, uniformidade e custo reforçam a necessidade de sistemas de gerenciamento de baterias (BMS) mais sofisticados (LU *et al.*, 2013). O envelhecimento é agravado por condições reais de operação: condução agressiva, perfis de recarga intensivos e serviços de carregamento bidirecional podem reduzir a vida útil das células (JAFARI *et al.*, 2018). Estudos recentes reforçam esse panorama ao mostrar que o consumo energético e a degradação variam conforme o clima e a estação do ano, sendo mais intensos no inverno, com perdas de capacidade superiores a 7% em simulações decenais (BAMDEZH; MOLAEIMANESH, 2024). Estratégias de otimização multiobjetivo, por sua vez, demonstraram ser capazes de reduzir a degradação em até 15,8%, mantendo diferenciais de custo reduzidos em relação a abordagens tradicionais (HU *et al.*, 2024).

Nesse cenário, os sistemas híbridos de armazenamento de energia (HESS), que combinam baterias e supercapacitores, emergem como uma opção. A literatura especializada sistematiza contribuições em quatro eixos principais: (i) modelagem eletrotérmica e de circuito equivalente para capturar as dinâmicas da bateria e do supercapacitor; (ii) análise e comparação de topologias (passivas, semiativas e ativas); (iii) estratégias de gerenciamento de energia (EMS), desde heurísticas baseadas em regras até abordagens avançadas como controle preditivo de modelo (MPC) e aprendizado por reforço; e (iv) resultados de simulações e validações experimentais em plataformas *hardware-in-the-loop*, ciclos de condução padronizados e veículos comerciais (CHEN *et al.*, 2022; CHEN *et al.*, 2023; MAGHFIROH; WAHYUNGGORO; CAHYADI, 2024; MARIASIU; KELEMEN, 2023; MALLON; ASSADIAN, 2022). A integração dessas linhas de pesquisa evidencia que o HESS não apenas mitiga picos de corrente e prolonga a vida útil das baterias, mas também melhora a eficiência energética e a autonomia veicular.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

Organizar e analisar a literatura sobre HESS aplicados a veículos elétricos.

### 1.1.2 Objetivos específicos

1. Mapear os modelos de baterias de íon-lítio e supercapacitores empregados em HESS.
2. Classificar e comparar as principais topologias de HESS.
3. Levantar, descrever e contrastar estratégias de gerenciamento de energia.
4. Sintetizar evidências de resultados experimentais e de simulação.
5. Identificar lacunas de pesquisa e oportunidades.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Estudos demonstram que a integração de supercapacitores permite absorver picos de corrente e atender demandas transitórias de potência, protegendo a bateria contra variações bruscas de carga e prolongando sua durabilidade (CHEN *et al.*, 2022; CHEN *et al.*, 2023; MAGH-FIROH; WAHYUNGGORO; CAHYADI, 2024; MARIASIU; KELEMEN, 2023; MALLON; ASSADIAN, 2022). Além disso, diferentes topologias de HESS — passivas, semi-ativas e totalmente ativas — oferecem variados níveis de desempenho, custo e controle, sendo as topologias semi-ativas e ativas destacadas por seu maior potencial de prolongar a vida útil das baterias e otimizar a distribuição de energia (WILBERFORCE *et al.*, 2023; REZAEI *et al.*, 2022).

Paralelamente, estratégias de gerenciamento de energia (EMS) baseadas em lógica de controle, filtragem, técnicas preditivas e aprendizado de máquina têm mostrado avanços na otimização do desempenho dos HESS. Abordagens como o controle preditivo de modelo (MPC) e algoritmos de aprendizado profundo demonstram ganhos relevantes na redução das perdas de energia, na estabilidade do barramento DC e na preservação da saúde das baterias (ASENSIO *et al.*, 2022; PISAL; VIDYARTHI, 2022; MA; GUO; LI, 2023; YANG *et al.*, 2022).

Assim, justifica-se a realização desta revisão de literatura pelo papel dos HESS no avanço da mobilidade elétrica, ao oferecer soluções que aliam sustentabilidade, eficiência e maior vida útil dos sistemas de armazenamento. O levantamento e análise das contribuições

recentes fornecem subsídios para a consolidação de práticas de modelagem, topologia e gerenciamento aplicáveis ao contexto real dos veículos elétricos, apontando lacunas de pesquisa e caminhos para inovações futuras.

### 1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

No Capítulo 1, apresenta-se a contextualização da pesquisa, destacando os desafios dos sistemas de armazenamento de energia em veículos elétricos, os objetivos do estudo e a justificativa para a realização da revisão sistemática.

O Capítulo 2 descreve a metodologia adotada, detalhando as bases de dados consultadas, as etapas do processo de seleção dos artigos, os critérios utilizados no método *Methodi Ordinati* para ranqueamento das publicações e o uso do fluxograma PRISMA 2020 para organização e triagem dos estudos. Também são apresentados os procedimentos empregados na análise qualitativa do conjunto final de artigos selecionados.

O Capítulo 3 reúne os resultados e a discussão, organizados em eixos temáticos que incluem: modelagem matemática e elétrica das baterias e supercapacitores, análise das diferentes topologias de HESS, estratégias de gerenciamento de energia e implicações dessas tecnologias para eficiência, autonomia e vida útil dos veículos elétricos. Este capítulo integra evidências numéricas, simulações e contribuições experimentais reportadas nos artigos.

Por fim, o Capítulo 4 apresenta as conclusões do estudo, destacando as principais contribuições identificadas, limitações da literatura atual e sugestões para trabalhos futuros no contexto de sistemas híbridos de armazenamento de energia aplicados à mobilidade elétrica.

## 2 METODOLOGIA

O presente trabalho parte da seguinte questão-problema: como a escolha da modelagem, da topologia e das estratégias de gerenciamento de sistemas híbridos de armazenamento de energia, baseados em baterias de íon-lítio, pode contribuir para melhorar a eficiência, a vida útil e a confiabilidade dos veículos elétricos?

A partir desta questão, esta revisão de literatura foi elaborada com o objetivo de identificar, selecionar e analisar publicações que tratam do tema *Sistemas Híbridos de Armazenamento de Energia Aplicados a Veículos Elétricos*, considerando a associação das palavras-chave ("hybrid energy storage system") AND ("management") AND ("vehicles") AND ("modeling"). O recorte temporal definido para esta pesquisa compreendeu o período de 2020 a 2025.

### 2.1 BASES DE DADOS CONSULTADAS

As buscas foram realizadas nas bases de dados *Science Direct*, *Scopus* e *Web of Science*. O acesso aos artigos foi efetuado por meio da Plataforma de Periódicos CAPES, utilizando o acesso institucional da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Foram considerados exclusivamente artigos publicados em periódicos científicos, sendo esta a principal limitação estabelecida na pesquisa.

### 2.2 ETAPAS DO PROCESSO DE SELEÇÃO

Para a condução da seleção e análise dos artigos, utilizou-se o método *Methodi Ordinati*, proposto por [Pagani, Kovaleski e Resende \(2015\)](#), o qual estabelece um processo de classificação qualitativa de publicações científicas. O processo foi organizado em nove etapas:

1. Definição da intenção de pesquisa.
2. Realização de pesquisa exploratória inicial com palavras-chave.
3. Definição e combinação final das palavras-chave.
4. Pesquisa definitiva nas bases de dados.
5. Filtragem inicial dos resultados conforme título, resumo e palavras-chave.
6. Levantamento de fator de impacto, ano de publicação e número de citações.
7. Ordenação dos artigos segundo o *InOrdinatio*, por meio de planilha própria do *Methodi Ordinati*.

8. Obtenção dos textos completos dos artigos classificados.
9. Leitura integral e análise qualitativa dos artigos selecionados.

### 2.3 EQUAÇÃO DO *METHODI ORDINATI*

A classificação dos artigos foi realizado por meio da equação do *InOrdinatio*, representada pela equação (2.1):

$$InOrdinatio = (FI1000) + (\alpha \times (10 - (Ano_{atual} - Ano_{publicacao}))) + (N_{citacoes}) \quad (2.1)$$

em que *FI* representa o fator de impacto da revista em que o artigo foi publicado,  $\alpha$  é o peso atribuído ao ano de publicação, *Ano<sub>atual</sub>* é o ano de realização da pesquisa, *Ano<sub>publicacao</sub>* refere-se ao ano de publicação do artigo, e *N<sub>citacoes</sub>* corresponde ao número de citações obtidas pelo artigo até o momento da coleta dos dados.

Nesta pesquisa, definiu-se  $\alpha = 10$ , de forma a priorizar artigos mais recentes dentro do recorte temporal estabelecido. Esse ajuste permitiu valorizar publicações que refletem os avanços atuais no campo de gerenciamento e modelagem de sistemas de armazenamento de energia em veículos, sem desconsiderar a relevância de fatores como impacto do periódico e citações recebidas.

### 2.4 FERRAMENTAS DE APOIO

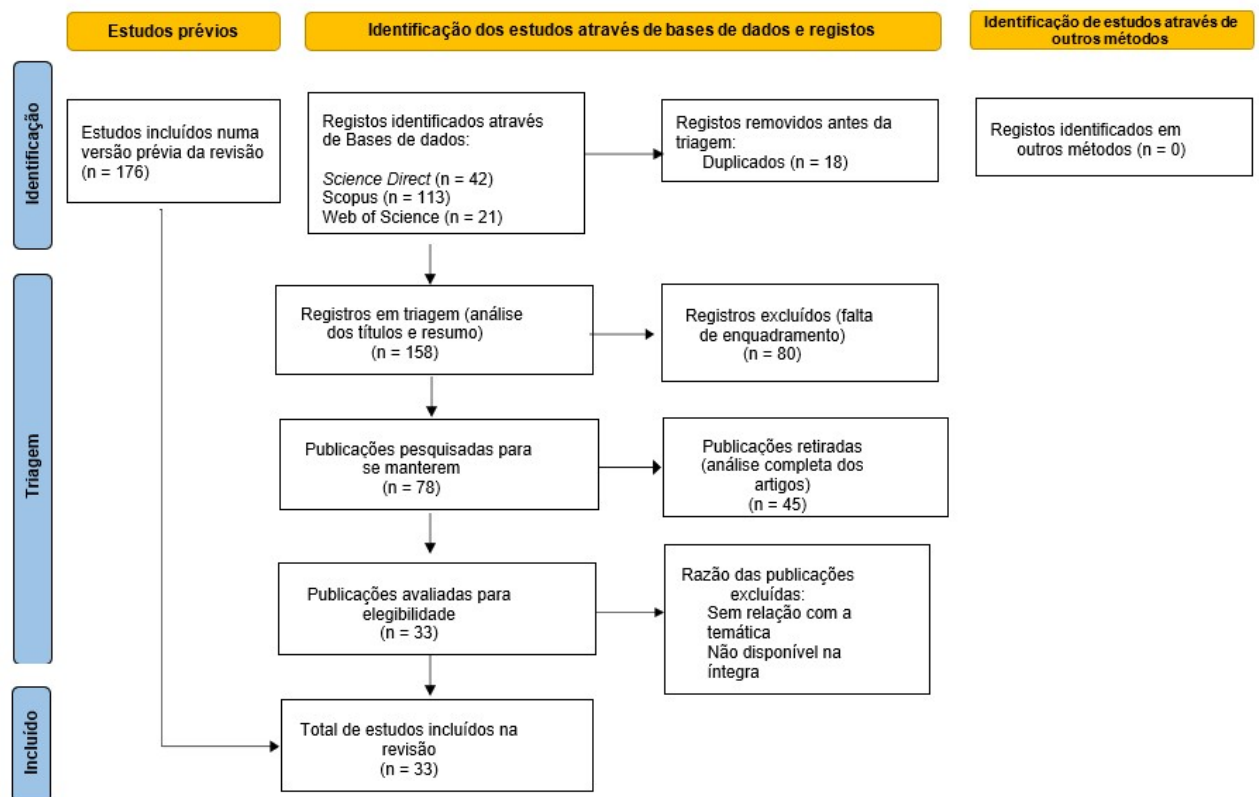
Para a gestão dos artigos e extração das características necessárias para a análise, foram utilizados os softwares *JabRef* e *Mendeley*. A exportação da planilha gerada pelo *Methodi Ordinati* foi realizada com o auxílio do software *Mendeley*.

De maneira complementar, aplicou-se o método *PRISMA 2020* (PAGE *et al.*, 2021), baseado no fluxograma (Figura 1) de identificação, triagem e inclusão de estudos a partir de registros de bases de dados. O uso deste método permitiu uma organização sistemática do processo de seleção final dos artigos incluídos na revisão.

### 2.5 ANÁLISE DOS ARTIGOS SELECIONADOS

Os artigos selecionados, após a aplicação combinada do *InOrdinatio* e do método *PRISMA*, foram submetidos a uma análise qualitativa por meio de fichamentos individuais, elaborados a partir da leitura completa de cada publicação. A análise buscou identificar contribuições rela-

**Figura 1 – Fluxograma PRISMA 2020 adaptado para o processo de seleção de artigos desta revisão.**



cionadas ao gerenciamento e à modelagem de sistemas de baterias de íon-lítio no contexto de veículos elétricos.

A busca inicial resultou em um total de 176 artigos, distribuídos entre as bases de dados da seguinte forma: 42 artigos na *Science Direct*, 113 artigos na *Scopus* e 21 artigos na *Web of Science*. Na etapa de verificação de duplicidade, foram removidos 18 artigos, restando 158 publicações únicas. Em seguida, procedeu-se à triagem inicial, na qual 80 artigos foram excluídos por não apresentarem alinhamento com a temática, resultando em 78 trabalhos elegíveis para análise detalhada.

## 2.6 RESULTADOS E DISCUSSÕES DAS ANÁLISES EFETUADAS

Os 78 artigos foram submetidos à classificação pelo *InOrdinatio*, sendo desconsideradas publicações que apresentaram fatores negativos. Durante a leitura de títulos, resumos e posterior análise da pertinência ao tema de gerenciamento e modelagem de sistemas de baterias em veículos, 45 artigos adicionais foram excluídos por não se enquadrarem no escopo estabelecido. Como resultado final, 33 artigos foram incluídos para análise qualitativa, compondo o conjunto utilizado nesta revisão de literatura.

A Figura 1 apresenta o fluxograma PRISMA 2020 com as etapas de identificação, triagem e inclusão dos artigos. Na etapa de identificação são listados todos os registros encontrados em cada base de dados. Na triagem, após a remoção dos artigos duplicados, é feita uma seleção inicial ampla, com base no resumo dos artigos, e em seguida são avaliados os textos na íntegra. A etapa da inclusão representa o conjunto final de artigos que fundamentam os resultados e a discussão.

Após a etapa de triagem e filtragem inicial, os 76 artigos elegíveis foram organizados e avaliados por meio do método *Methodi Ordinati*. O ranqueamento considerou o fator de impacto da revista (FI), o ano de publicação e o número de citações, com peso  $\alpha = 10$  para priorização de artigos mais recentes. A Tabela 1 gerada forneceu o índice *InOrdinatio*, a partir do qual foi possível estabelecer a relevância relativa de cada publicação. Os artigos com o índice *InOrdinatio* negativo foram removidos da análise.

**Tabela 1 – Ranking de artigos sobre *Hybrid Energy Storage Systems* (HESS) para veículos elétricos segundo o método *InOrdinatio*.**

Ranking	Autores	Título	Journal	FI	Ano	Ci	InOrdinatio
1	Jia, C., Cui, J., Qiao, W. and Qu, L.	Real-Time Model Predictive Control for Battery-Supercapacitor Hybrid Energy Storage Systems Using Linear Parameter-Varying Models	IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics	4,472	2023	130	240,004472
2	Yang, B., Wang, J., Zhang, X., Wang, J., Shu, H., Li, S., He, T., Lan, C. and Yu, T.	Applications of battery/supercapacitor hybrid energy storage systems for electric vehicles using perturbation observer based robust control	Journal of Power Sources	9,127	2020	148	228,009127
3	Zhang, Q., Wang, L., Li, G. and Liu, Y.	A real-time energy management control strategy for battery and supercapacitor hybrid energy storage systems of pure electric vehicles	Journal of Energy Storage	6,583	2020	139	219,006583
4	Mesbahi, T., Bartholomeus, P., Rizoug, N., Sadoun, R., Khenfri, F. and Moigne, P.L.	Advanced Model of Hybrid Energy Storage System Integrating Lithium-Ion Battery and Supercapacitor for Electric Vehicle Applications	IEEE Transactions on Industrial Electronics	8,236	2021	84	174,008236
5	Yang, Y., Xu, Y., Zhang, H., Yang, F., Ren, J., Wang, X., Jin, P. and Huang, D.	Research on the energy management strategy of extended range electric vehicles based on a hybrid energy storage system	Energy Reports	6,87	2022	46	146,00687

Ranking	Autores	Artigo	Journal	FI	Ano	Ci	InOrdinatio
6	Liu, R., Wang, C., Tang, A., Zhang, Y. and Yu, Q.	A twin delayed deep deterministic policy gradient-based energy management strategy for a battery-ultracapacitor electric vehicle considering driving condition recognition with learning vector quantization neural network	Journal of Energy Storage	6,583	2023	33	143,006583
7	Ma, B., Guo, X. and Li, P.	Adaptive energy management strategy based on a model predictive control with real-time tuning weight for hybrid energy storage system	Energy	7,147	2023	29	139,007147
8	Wilberforce, T., Anser, A., Swamy, J.A. and Opoku, R.	An investigation into hybrid energy storage system control and power distribution for hybrid electric vehicles	Energy	7,147	2023	22	132,007147
9	Chen, X., Yang, Y., Song, J., Wang, J. and He, G.	Hybrid Energy Storage System Optimization With Battery Charging and Swapping Coordination	IEEE Transactions on Automation Science and Engineering	-	2023	21	131
10	Larijani, M.R., Kia, S.H., Zolghadri, M., Hajjaji, A.E. and Taghavi-pour, A.	Linear Parameter-Varying Model Predictive Control for Intelligent Energy Management in Battery/Supercapacitor Electric Vehicles	IEEE ACCESS	3,367	2024	10	130,003367
11	Asensio, E.M., Magallán, G.A., Pérez, L. and Angelo, C.H.D.	Short-term power demand prediction for energy management of an electric vehicle based on batteries and ultracapacitors	Energy	7,147	2022	27	127,007147
12	Maghfiroh, H., Wahyunggoro, O. and Cahyadi, A.I.	Novel iterative Ragone plot-based optimization of low pass filter for hybrid power sources electric vehicles	e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy	-	2024	6	126
13	Wang, L., Li, M. and Chen, Z.	An Energy Management Strategy for Hybrid Energy Storage Systems coordinate with state of thermal and power	Control Engineering Practice	3,475	2022	25	125,003475
14	Wang, L., Li, M. and Chen, Z.	An Energy Management Strategy for Hybrid Energy Storage Systems coordinate with state of thermal and power	Control Engineering Practice	3,475	2022	25	125,003475
15	Wang, Y., Li, W., Liu, Z. and Li, L.	An Energy Management Strategy for Hybrid Energy Storage System Based on Reinforcement Learning	World Electric Vehicle Journal	2,2	2023	13	123,0022

Ranking	Autores	Artigo	Journal	FI	Ano	Ci	InOrdinatio
16	Mariasiu, F. and Kelemen, E.A.	Analysis of the Energy Efficiency of a Hybrid Energy Storage System for an Electric Vehicle	BATTERIES-BASEL	–	2023	13	123
17	Pisal, P.S. and Vidyarthi, D.A.	An optimal control for power management in super capacitors/battery of electric vehicles using Deep Neural Network	Journal of Power Sources	9,127	2022	22	122,009127
19	Chen, F., Ge, C., Tang, D., Ding, S. and Gong, X.	Energy management and nonlinear control strategy of hybrid energy storage system for electric vehicle	Energy Reports	6,87	2022	17	117,00687
20	Huang, W., Lu, Z., Cao, X. and Hou, Y.	Hierarchical Coordinated Energy Management Strategy for Hybrid Energy Storage System in Electric Vehicles Considering the Battery's SOC	Systems	0,6	2023	6	116,0006
21	Mallon, K. and Assadian, F.	A Study of Control Methodologies for the Trade-Off between Battery Aging and Energy Consumption on Electric Vehicles with Hybrid Energy Storage Systems	ENERGIES	3,004	2022	15	115,003004
22	Mossadak, M.-A., Chebak, A. and Elmahjoub, A.A.	Intelligent Power Management Control System Modelling for Battery/Supercapacitor Electric Vehicles Using MBSE and SysML	International Conference on Mechatronics and Electrical Engineering (MEEE)	–	2023	2	112
23	Larijani, M.R., Kia, S.H., Zolghadri, M., Hajjaji, A.E. and Taghavi-pour, A.	Modeling and Controller Design of Battery/SC Electric Vehicles for Real-time Energy Management	IEEE Vehicular Technology Conference	1,9	2023	1	111,0019
24	Ishaque, M.R., Khan, M.A., Afzal, M.M., Wadood, A., Oh, S.-R., Talha, M. and Rhee, S.-B.	Fuzzy logic-based duty cycle controller for the energy management system of hybrid electric vehicles with hybrid energy storage system	Applied Sciences (Switzerland)	3	2021	17	107,003
25	Zhang, Q., Chen, X. and Liao, S.	Energy Management Control Strategy for Hybrid Energy Storage Systems in Electric Vehicles	International Journal of Electrochemical Science	1,765	2022	7	107,001765

Ranking	Autores	Artigo	Journal	FI	Ano	Ci	InOrdinatio
26	Kubendran, V., Shuaib, Y.M. and Roselyn, J.P.	Modelling of Vehicle Dynamics and Determination of Energy Demand for Electric Vehicle	Journal of Physics: Conference Series	0,7	2022	3	103,0007
27	Raikar, S.B., Saha, A. and Vittal, K.P.	Frequency Filtering in Ultracapacitor-Battery Energy Storage System in Electric Vehicles	IEEE North Karnataka Subsection Flagship International Conference (NKCon)	–	2022	2	102
28	Wei, M.	Modeling and Fuzzy Control Study on Hybrid Energy Storage System for Pure Electric Vehicles	International Conference on Electronic Materials and Information Engineering (EMIE)	–	2022	0	100
29	Subramanian, G. and Peter, J.	Integrated Li-Ion Battery and Super Capacitor based Hybrid Energy Storage System for Electric Vehicles	CONECCT 2020 - 6th IEEE International Conference on Electronics, Computing and Communication Technologies	–	2020	18	98,00000002
30	Haskara, I., Hegde, B. and Chang, C.-F.	Reinforcement Learning Based Energy Management of Hybrid Energy Storage Systems in Electric Vehicles	SAE Technical Papers	–	2021	4	94,00000001
31	Jia, C., Cui, J., Qiao, W. and Qu, L.	A Real-Time, Linear, Parameter-Varying, Model Predictive Control Strategy for a Battery-Supercapacitor Hybrid Energy Storage System	IEEE PEDG Symposium	–	2021	2	92,00000001
32	Manoj, G.A., Mohan, G.T., Vaishnavie, S., Joy, N. and Sam, C.A.	Energy Management and Hybridization of Nissan Leaf using Switched Capacitor Converter and Ultra-Capacitor	IEEE IPRECON Conference	–	2021	1	91,00000001
33	Katuri, R. and Gorantla, S.	Modeling and analysis of hybrid controller by combining MFB with FLC implemented to ultracapacitor-based electric vehicle	WSEAS Transactions on Power Systems	0,7	2020	7	87,00070002

Fonte: Autoria Própria (2025).

Os resultados mostraram que os artigos com maiores valores de *InOrdinatio* pertencem majoritariamente a periódicos de alto impacto, como *Journal of Power Sources*, *Journal of Energy Storage*, *Energy*, *IEEE Transactions on Industrial Electronics* e *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*.

O artigo com maior ranqueamento foi o de [Jia et al. \(2023\)](#), publicado no *IEEE Journal*

of *Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, com valor de  $InOrdinatio = 240,004$ , destacando-se pelo equilíbrio entre fator de impacto ( $FI = 4,472$ ), ano de publicação recente (2023) e elevado número de citações (130). Em segundo lugar, figurou [Yang et al. \(2020\)](#), no *Journal of Power Sources*, com  $InOrdinatio = 228,009$ , seguido por [Zhang et al. \(2020\)](#), publicado no *Journal of Energy Storage*, com  $InOrdinatio = 219,006$ .

No conjunto dos 33 artigos selecionados para análise qualitativa, observou-se que:

- A maioria das publicações situa-se entre 2020 e 2023, refletindo o recorte temporal adotado.
- Há predominância de estudos em periódicos especializados em energia e sistemas de potência, evidenciando a relevância do tema no contexto de armazenamento híbrido e gerenciamento em veículos elétricos.
- Os valores de  $InOrdinatio$  variaram de 240 até 87, demonstrando heterogeneidade quanto à visibilidade, fator de impacto e atualidade dos artigos.

Assim, o *Methodi Ordinati* permitiu estabelecer uma hierarquia clara dos estudos mais relevantes para esta revisão, direcionando a análise qualitativa para os trabalhos de maior contribuição científica no tema investigado.

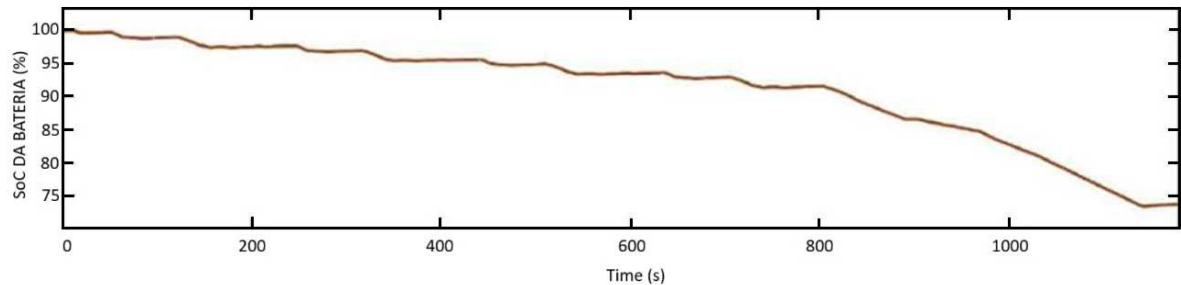
A partir da seleção final, essa revisão da literatura será discutida em três eixos principais: (i) a modelagem matemática e elétrica de HESS, com ênfase nas representações de baterias e supercapacitores; (ii) a influência das diferentes topologias de HESS na eficiência energética e na longevidade das baterias; e (iii) as estratégias de gerenciamento de energia, que incluem desde abordagens baseadas em regras até métodos avançados como controle preditivo de modelo e algoritmos de aprendizado de máquina. Esses pontos norteiam a análise qualitativa desenvolvida nos capítulos seguintes, permitindo compreender como a integração entre modelagem, gerenciamento e topologia contribui para a evolução dos veículos elétricos e para a consolidação de soluções sustentáveis em mobilidade.

### 2.6.1 Sistema de Armazenamento de Energia em Bateria (BESS)

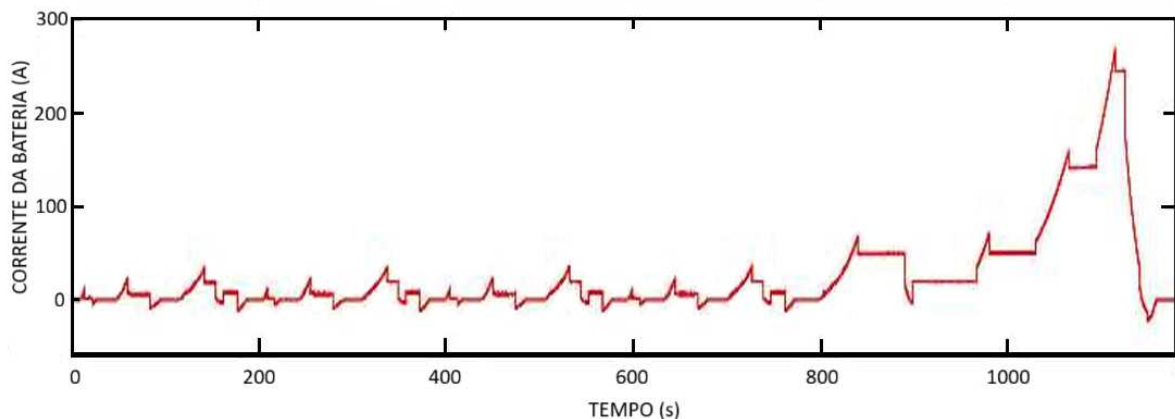
Em sua maioria, os VEs possuem apenas baterias como sistema de armazenamento de energia (BESS). Embora esse sistema apresente alta densidade energética, a ausência de uma estratégia de divisão de potência resulta em maior estresse eletroquímico e aceleração da degradação do estado de saúde (SoH). Segundo [Raikar, Saha e Vittal \(2022\)](#), esse comportamento acelera a redução da vida útil, também associada ao aumento da temperatura do módulo.

As Figuras [2a](#) e [2b](#) apresentam os resultados de simulação para um ciclo de condução NEDC (Novo Ciclo de Condução Europeu), mostrando a evolução do SoC e da corrente da bateria, respectivamente em um sistema BESS.

**Figura 2 – Resultados da simulação para o BESS sem estratégia de divisão de potência: (a) degradação do SoC até 75,6%; (b) corrente variando de –23,08 A até picos de 270,8 A.**



**(a) Variação do SoC em um ciclo NEDC (BESS).**



**(b) Corrente da bateria em um ciclo NEDC (BESS).**

Fonte: [Raikar, Saha e Vittal \(2022\)](#).

No cenário analisado, o SoC inicial de 100% reduziu-se para 75,6% ao final do ciclo NEDC. A corrente máxima atingiu 270,8 A, quase o dobro da capacidade nominal da célula, enquanto a corrente mínima foi de –23,08 A. O consumo total de energia do *pack* foi de 1,658 kJ. Esses resultados fornecem a referência de comparação para as estratégias híbridas discutidas nas seções subsequentes.

## 2.7 SISTEMAS HÍBRIDOS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA (HESS)

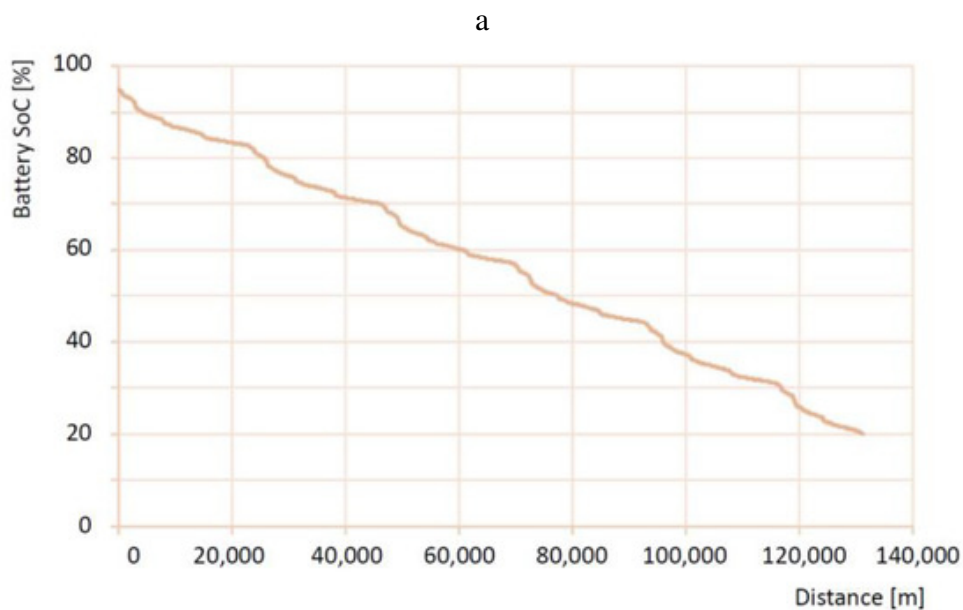
HESS têm sido empregados para otimizar o desempenho e a eficiência de veículos elétricos. Essa abordagem envolve a combinação estratégica de baterias e supercapacitores, aproveitando as características complementares de cada um desses componentes. É possível criar um sistema que responda de maneira eficiente às variadas demandas de energia durante a operação do veículo ([WANG \*et al.\*, 2023](#); [CHEN \*et al.\*, 2023](#); [KUBENDRAN; SHUAIB; ROSELYN, 2022](#); [MANOJ \*et al.\*, 2021](#); [MESBAHI \*et al.\*, 2021](#)).

Com base nas simulações realizadas em modelo numérico validado, [Mariasiu e Kele-](#)

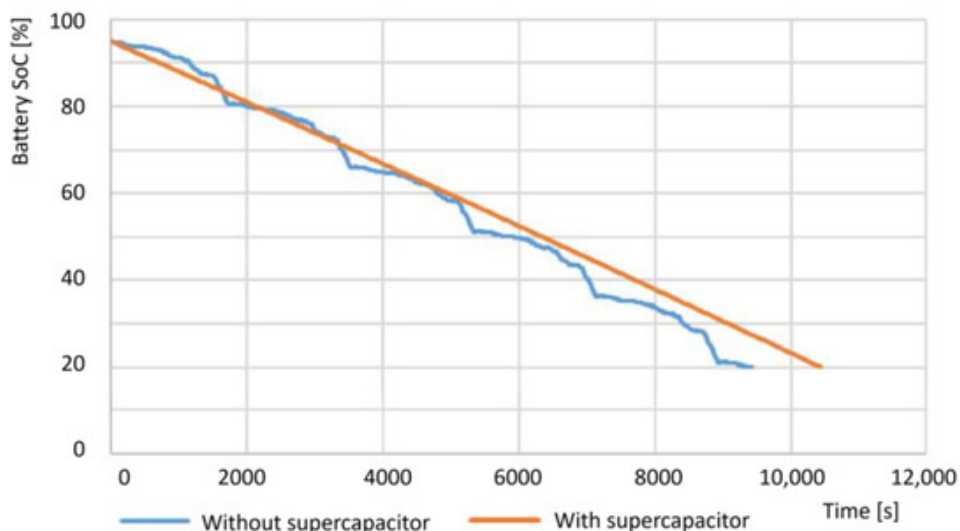
men (2023) avaliaram o desempenho do VW e-Golf considerando tanto a configuração convencional (apenas bateria), em relação à configuração híbrida (bateria + supercapacitor). O indicador de comparação foi a autonomia no ciclo de testes WLTP (*Worldwide Harmonised Light Vehicles Test Procedure*).

A Figura 3a mostra o estado de carga (SoC) da bateria em função da distância percorrida no cenário com HESS. Observa-se que a bateria atinge 20% de SoC após 131,3 km, enquanto no cenário sem supercapacitor esse limite é atingido 14,67 km antes. Esse resultado representa um aumento de autonomia da ordem de 15%.

**Figura 3 – Resultados comparativos de autonomia do VW e-Golf: (a) autonomia ampliada com HESS; (b) perfil de descarga mais suave quando o SC é integrado.**



**(a) SoC em função da distância (com HESS).**



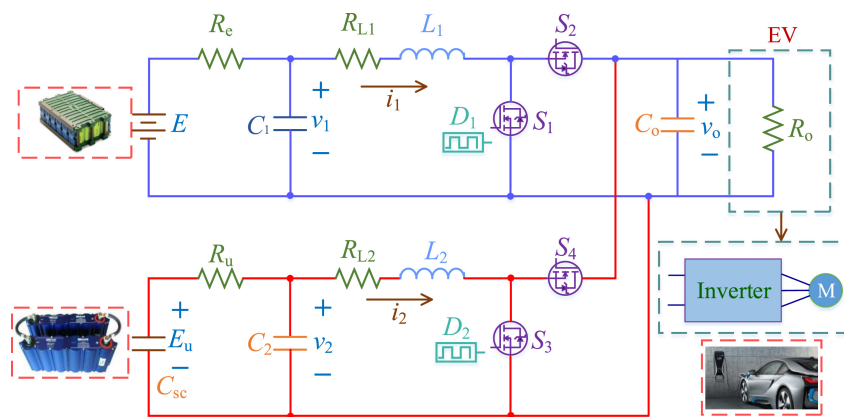
**(b) Comparação do SoC ao longo do tempo (com e sem SC).**

Fonte: [Mariasu e Kelemen \(2023\)](#).

Na Figura 3b observa-se ainda que o perfil de descarga no cenário sem supercapacitor apresenta quedas abruptas de SoC, associadas a picos de corrente. Já no caso híbrido, a curva é mais suave, evidenciando menor estresse eletrotérmico na bateria. Essa característica implica não apenas maior autonomia, mas também maior vida útil do sistema de armazenamento.

A Figura 4 ilustra a configuração de um sistema híbrido de armazenamento de energia com baterias e supercapacitores (BS–HESS) totalmente ativo para aplicações em VEs, com dois conversores CC/CC bidirecionais alimentando o barramento CC do inversor–motor, permitindo controle independente de potência/corrente e melhor gerenciamento de estresse nas fontes.

**Figura 4 – Diagrama de circuito equivalente com topologia ativa de um HESS com bateria e supercapacitor alimentados por dois conversores CC bidirecionais**



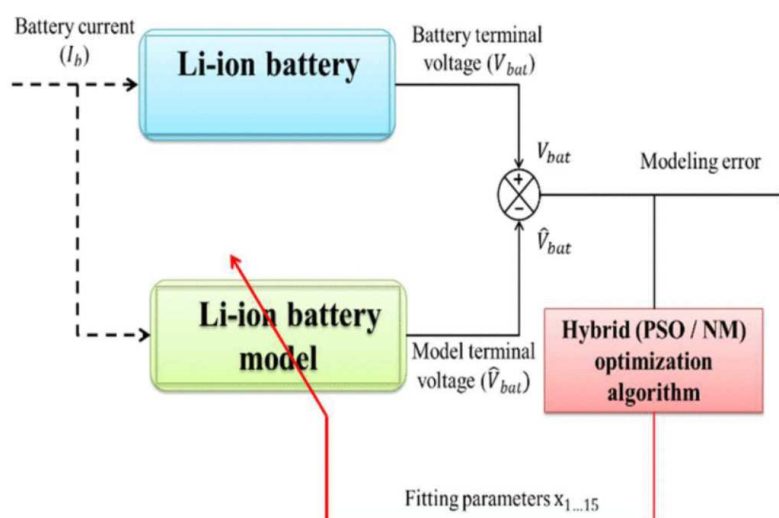
Fonte: Yang *et al.* (2020).

A modelagem matemática e elétrica das baterias e supercapacitores é essencial para representar com precisão suas dinâmicas de operação. No caso das baterias de íons de lítio, um modelo comumente utilizado é o circuito equivalente (ECM), que inclui uma fonte de tensão aberta em série com uma resistência interna. Este modelo é capaz de capturar as variações na resistência e na tensão da bateria, que são influenciadas pelo SOC e pela temperatura (WANG; LI; CHEN, 2022; ASENSIO *et al.*, 2022; PISAL; VIDYARTHI, 2022; MA; GUO; LI, 2023; MALLON; ASSADIAN, 2022).

Este modelo é eficaz para simulações que visam prever o comportamento da bateria em condições operacionais variadas, permitindo análises de desempenho e envelhecimento (MALLON; ASSADIAN, 2022).

Como etapa de parametrização do ECM, rotinas de identificação baseadas em otimização com o uso de algoritmos ajustam os parâmetros do modelo a partir de dados experimentais, como o exemplo da Figura 5.

**Figura 5 – Fluxo de modelagem de uma bateria de íon-lítio com calibração de parâmetros via algoritmo híbrido de otimização.**



Fonte: [Mesbahi et al. \(2021\)](#).

Os supercapacitores são modelados de forma semelhante às baterias, mas com uma ênfase maior em sua capacidade de lidar com picos de potência de curta duração. O modelo elétrico típico de um supercapacitor é baseado em um circuito RC equivalente, onde a capacitância ( $C_{sc}$ ) e a resistência série ( $R_{sc}$ ) são os componentes-chave ([KUBENDRAN; SHUAIB; ROSELYN, 2022](#); [MANOJ et al., 2021](#); [ZHANG; CHEN; LIAO, 2022](#); [YANG et al., 2020](#); [MA; GUO; LI, 2023](#)). A equação (2.2) descreve a tensão terminal do supercapacitor ( $V_{T,sc}$ ).

$$V_{T,sc} = \frac{q_{sc}}{C_{sc}} - I_{sc} \cdot R_{sc} \quad (2.2)$$

Neste caso,  $q_{sc}$  representa a carga armazenada no supercapacitor e  $I_{sc}$  é a corrente que flui pelo supercapacitor. Esse modelo permite que o supercapacitor responda rapidamente a demandas de energia, aliviando a carga sobre a bateria durante eventos de alta potência. Isso é importante para manter a estabilidade do sistema de armazenamento de energia, especialmente em condições em que há variações de alta frequência na demanda de energia ([YANG et al., 2020](#)).

A configuração de um HESS envolve a escolha entre diferentes topologias, cada uma com níveis variados de complexidade e eficiência. As principais topologias incluem a passiva, a semiativa e a ativa completa. Na topologia passiva, a bateria e o supercapacitor são conectados diretamente em paralelo, o que proporciona simplicidade e baixo custo, porém sem controle sobre a distribuição de energia ([CHEN et al., 2022](#); [WILBERFORCE et al., 2023](#); [RAIKAR; SAHA; VITTAL, 2022](#); [REZAEI et al., 2022](#); [YANG et al., 2020](#)).

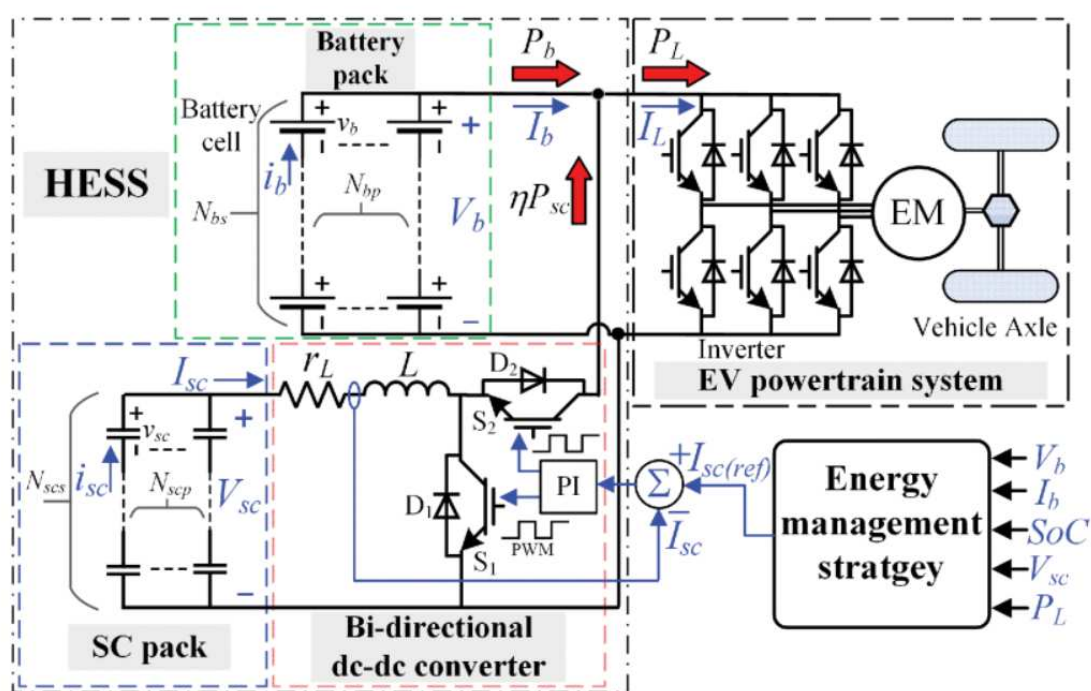
A topologia semiativa, representada pela Figura 6, que utiliza conversores DC/DC bidirecionais para controlar o supercapacitor enquanto a bateria permanece conectada diretamente ao barramento DC, equilibra o custo e o desempenho, oferecendo um controle moderado sobre a

transferência de energia. A topologia ativa completa, por sua vez, emprega conversores DC/DC tanto para a bateria quanto para o supercapacitor, permitindo um controle independente e otimizado de cada componente. Embora essa configuração seja a mais cara e complexa, ela oferece o melhor desempenho em termos de eficiência e flexibilidade de controle (WILBERFORCE *et al.*, 2023; MAGHFIROH; WAHYUNGGORO; CAHYADI, 2024).

Além da modelagem elétrica, a integração de técnicas de previsão de demanda de potência tem se mostrado extremamente eficaz na gestão de energia em sistemas HESS. Modelos autoregressivos e filtros de Kalman, por exemplo, são ferramentas poderosas para prever as necessidades energéticas dos veículos elétricos, permitindo que o sistema HESS responda de maneira proativa às variações de demanda (ASENSIO *et al.*, 2022; ZHANG; CHEN; LIAO, 2022; PISAL; VIDYARTHI, 2022; MA; GUO; LI, 2023; YANG *et al.*, 2022).

Quando essas técnicas são combinadas com estratégias de Controle Preditivo de Modelo (MPC), o resultado é um sistema que responde de forma eficiente às variações de demanda, além de preservar a saúde da bateria e otimizar o uso do supercapacitor.

**Figura 6 – HESS bateria–supercapacitor em topologia semi-ativa**



Fonte: Larijani *et al.* (2024).

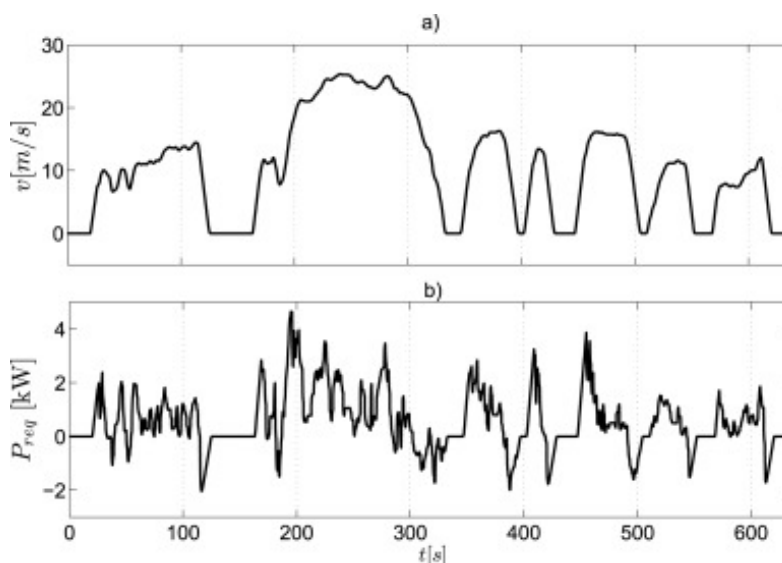
Em Larijani *et al.* (2024), o supervisor é formulado pelo MPC, que particiona o fluxo de potência entre bateria ( $P_b$ ) e o supercapacitor ( $P_{sc}$ ), levando em conta os modelos dinâmicos dos dois dispositivos e os rendimentos do conversor nos modos de carga/descarga. Essa escolha é coerente com os objetivos de HESS: suavizar picos de corrente na bateria, estabilizar o barramento CC e manter a operação em janelas de SOC mais saudáveis. Na prática, o MPC fornece a corrente de referência ( $i_{sc}^{ref}$ ) ao controlador de corrente do conversor (proporcionalmente integrativo - PI), que aciona as chaves PWM para rastrear a referência respeitando limites de

corrente/tensão e as eficiências do conversor. Este enquadramento conecta a seleção topológica (semi-ativa) às estratégias de gerenciamento de energia (EMS) discutidas na Seção 2.7.3.

Um aspecto-chave para o sucesso do MPC em sistemas HESS é a previsão da trajetória futura de potência requerida pelo veículo, pois essa grandeza atua como entrada direta no horizonte de previsão. Conforme discutido em Asensio *et al.* (2022), a potência requerida ( $P_{req}$ ) depende fortemente da velocidade e aceleração impostas pelo condutor, o que a torna incerta para instantes futuros. Assim, estratégias de predição são necessárias para aproximar o perfil de demanda durante o horizonte de controle.

Como o trabalho de Asensio *et al.* (2022) foca em aplicações urbanas, os autores utilizaram ciclos de condução padronizados para representar perfis típicos de demanda. Em particular, o ciclo *Urban Dynamometer Driving Schedule* (UDDS) foi empregado como referência, com a demanda de potência calculada a partir de um modelo longitudinal do veículo. O estudo considerou parâmetros experimentais de um veículo urbano leve. Na Figura 7, observa-se que a variação de  $P_{req}$  segue de perto as acelerações e desacelerações impostas pelo ciclo de velocidade, apresentando fortes flutuações que reforçam a necessidade de um sistema híbrido.

**Figura 7 – Ciclo UDDS modificado: (a) perfil de velocidade  $v(t)$ ; (b) potência instantânea requerida  $P_{req}(t)$**



Fonte: Asensio *et al.* (2022)

A modelagem detalhada dos componentes do HESS, a escolha apropriada da topologia e a integração com estratégias avançadas de controle são fundamentais para alcançar uma operação eficiente e sustentável em veículos elétricos. Esses elementos combinados permitem uma distribuição otimizada de energia, minimizando perdas e prolongando a vida útil dos componentes, especialmente das baterias. A sinergia entre a modelagem precisa, a topologia bem escolhida e o controle inteligente assegura que o HESS opere no seu máximo potencial, atendendo às demandas de energia de maneira eficiente e eficaz, ao mesmo tempo em que mantém a integridade do sistema e prolonga a longevidade dos seus componentes (WILBERFORCE *et*

*al.*, 2023; MALLON; ASSADIAN, 2022).

### 2.7.1 Modelagem Matemática de Sistemas Híbridos de Armazenamento de Energia

O objetivo dos HESS é utilizar a alta densidade de energia das baterias junto com a alta densidade de potência dos supercapacitores, possibilitando uma gestão otimizada da energia armazenada. Para modelagem matemática, existem diversas formulações utilizadas na modelagem e controle desse sistema (KUBENDRAN; SHUAIB; ROSELYN, 2022; MANOJ *et al.*, 2021; CHEN *et al.*, 2022; PISAL; VIDYARTHI, 2022; MESBAHI *et al.*, 2021).

As baterias, como principais componentes de armazenamento de energia em VEs, são geralmente modeladas usando um Modelo de Circuito Equivalente (ECM). Este modelo é para entender e prever o comportamento das baterias sob diferentes condições de carga e descarga. O ECM inclui uma fonte de tensão em circuito aberto ( $V_{oc}$ ), uma resistência série ( $R_s$ ), e elementos capacitivos que representam a dinâmica interna da bateria. Esse modelo captura com precisão as características de carga e descarga da bateria, incluindo perdas internas e fenômenos de relaxação, sendo matematicamente representado pelas equações (2.3), (2.4) e (2.5) (JIA *et al.*, 2021).

$$V_{bat} = V_{OC} - I_{bat}R_s - \sum_{n=1}^3 V_{RCn} \quad (2.3)$$

$$V_{RCn} = I_{bat}R_nC_n \quad (2.4)$$

$$SOC_{bat} = -\frac{I_{bat}}{C_{bat}} \quad (2.5)$$

onde  $V_{bat}$  representa a tensão terminal da bateria,  $I_{bat}$  é a corrente fluindo através da bateria,  $R_s$  é a resistência série que captura as perdas ôhmicas,  $V_{RCn}$  são as tensões nos ramos RC que representam a resposta dinâmica da bateria, e  $C_{bat}$  é a capacidade nominal da bateria. O uso desse modelo é vital para prever o comportamento da bateria sob diferentes cenários operacionais, como picos de demanda e condições de carga parcial (JIA *et al.*, 2021).

Em paralelo, os supercapacitores são modelados de maneira semelhante às baterias, também utilizando um modelo de circuito equivalente. Uma abordagem comum é o modelo Zubieta-Bonert, que inclui múltiplos pares RC para capturar a resposta dinâmica dos supercapacitores. Esse modelo é essencial para descrever como os supercapacitores podem fornecer grandes quantidades de potência em períodos curtos, para responder a picos de demanda energética, sendo matematicamente descrito nas equações (2.6), (2.7) e (2.8) (JIA *et al.*, 2023):

$$V_{SC} = V_C - I_{SC}R_s - \sum_{m=1}^3 V_{Cm} \quad (2.6)$$

$$\dot{V}_{C_m} = \frac{I_{SC}}{C_{SC_m}} - \frac{V_{C_m}}{R_{SC_m} C_{SC_m}} \quad (2.7)$$

$$SOC_{SC} = -\frac{I_{SC}}{C_{SC}} \quad (2.8)$$

onde  $V_{SC}$  é a tensão terminal do supercapacitor,  $I_{SC}$  é a corrente através do supercapacitor,  $R_s$  é a resistência série que caracteriza perdas resistivas, e  $C_{SC}$  é a capacitância efetiva do supercapacitor. Esses modelos permitem uma descrição precisa do comportamento transiente dos supercapacitores, essencial para aplicações de resposta rápida (JIA *et al.*, 2021).

A calibração e a validação dos modelos elétricos de bateria e ultracapacitor em HESS exigem ensaios capazes de excitar suas dinâmicas relevantes. Seguindo o procedimento de Liu *et al.* (2023), empregam-se dois protocolos complementares: (i) o *Hybrid Pulse Power Characterization* (HPPC), que aplica pulsos de corrente para revelar a resistência ôhmica, a recuperação de tensão e a capacidade de potência instantânea; e (ii) o ciclo *Urban Dynamometer Driving Schedule* (UDDS), que reproduz solicitações transitórias típicas de tráfego urbano, servindo como teste de aderência do modelo em operação realista.

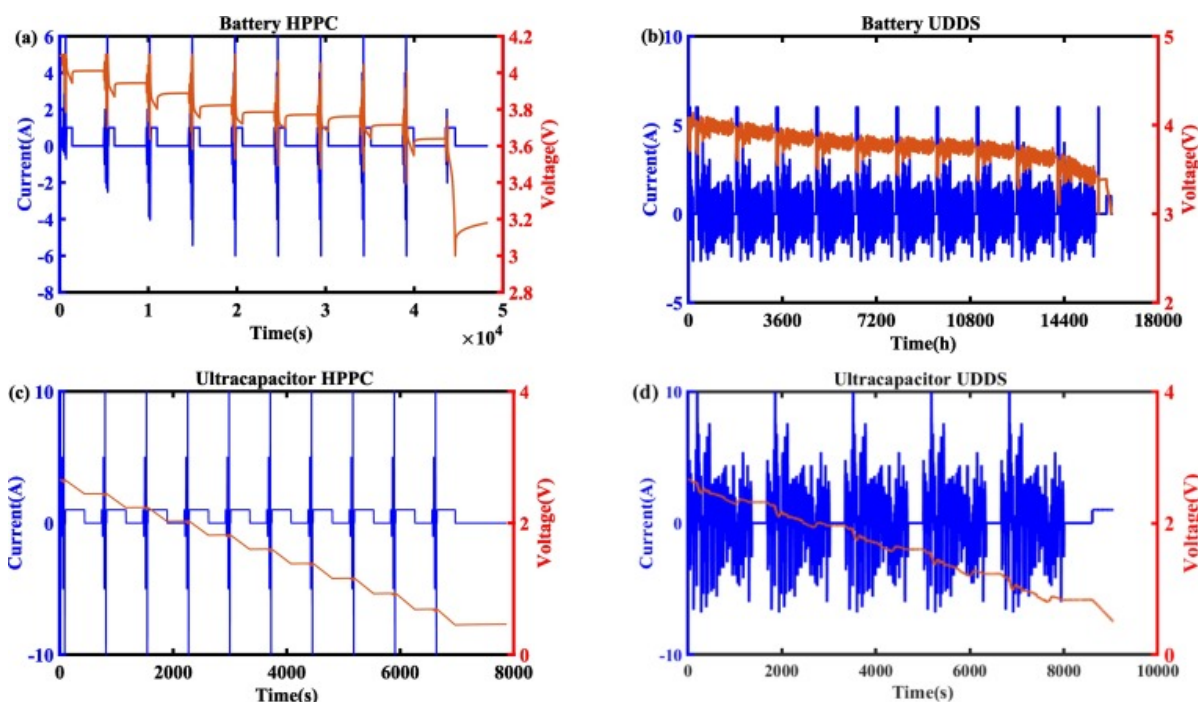
A Figura 8 resume os resultados a 25°C para uma bateria Li-ion NMC (3,7 V e 2 Ah) e um ultracapacitor (2,7 V e 1500 F):

- **Bateria — HPPC (Figura 8a):** cada pulso produz uma queda abrupta de tensão proporcional à resistência interna e uma recuperação subsequente associada à dinâmica difusiva/RC do ECM. Esses traços permitem identificar  $R_s$  e parâmetros dos ramos  $R-C$  por ajuste de resposta ao degrau (LIU *et al.*, 2023).
- **Bateria — UDDS (Figura 8b):** a corrente apresenta variações rápidas (acelerações/frenagens), enquanto a tensão terminal decai gradualmente com o SOC. O modelo calibrado no HPPC é validado por erro baixo de tensão preditada, evidenciando boa generalização em perfil de condução realista.
- **Ultracapacitor — HPPC (Figura 8c):** observa-se resposta praticamente instantânea de corrente e uma rampa quase linear de tensão (com leve queda adicional devida a  $R_s$ ), coerente com a natureza predominantemente capacitiva. O ajuste fornece  $C_{uc}$  efetiva e  $R_s$  com alta confiabilidade.
- **Ultracapacitor — UDDS (Figura 8d):** correntes altamente pulsantes são acompanhadas por variação rápida de tensão; essa característica confirma a aptidão do SC para absorver picos de potência, poupando a bateria nos transitórios (LIU *et al.*, 2023).

Em linha com Liu *et al.* (2023), os dados HPPC fornecem dados de referência para a identificação paramétrica (ECM da bateria e modelo RC/Zubieta-Bonert do SC), ao passo que o UDDS quantifica a aderência em cenário veicular. Na operação coordenada, o SC lida com

componentes de alta frequência da potência, reduzindo a variação da corrente da bateria, perdas de potência devido ao aquecimento e estresse térmico/envelhecimento da bateria.

**Figura 8 – Resultados experimentais de Liu et al. (2023) para caracterização dinâmica: (a) HPPC da bateria; (b) UDDS da bateria; (c) HPPC do ultracapacitor; (d) UDDS do ultracapacitor.**



Fonte: Liu et al. (2023).

### 2.7.2 Impacto da Topologia de HESS na Eficiência Energética e na Vida Útil das Baterias

As diferentes topologias de HESS desempenham um papel na gestão de energia e na longevidade das baterias. Três principais topologias são frequentemente discutidas na literatura: topologia passiva, topologia semi-ativa e topologia totalmente ativa (WILBERFORCE et al., 2023; CHEN et al., 2022).

Na topologia passiva, a bateria e o supercapacitor são conectados diretamente em paralelo ao barramento de energia. Essa configuração é a mais simples e de baixo custo, mas oferece controle limitado sobre a distribuição de energia entre os dois componentes. A principal desvantagem dessa topologia é a sua ineficiência em gerenciar a transferência de energia durante picos de demanda, o que pode resultar em estresse adicional nas baterias, acelerando sua degradação (WILBERFORCE et al., 2023).

A topologia semi-ativa utiliza um conversor DC-DC bidirecional conectado ao supercapacitor ou à bateria, permitindo um controle mais refinado da distribuição de energia. Esta configuração equilibra o desempenho e o custo, oferecendo uma melhoria na eficiência energética em comparação com a topologia passiva (CHEN et al., 2022). Ao isolar a bateria das

variações rápidas de demanda de energia, a topologia semi-ativa reduz o estresse nas baterias e prolonga sua vida útil (WILBERFORCE *et al.*, 2023; CHEN *et al.*, 2022).

A topologia totalmente ativa envolve o uso de conversores DC-DC bidirecionais tanto para a bateria quanto para o supercapacitor, permitindo controle independente de ambos os dispositivos. Essa topologia oferece o melhor desempenho em termos de eficiência energética e gestão da vida útil da bateria, uma vez que pode otimizar a distribuição de energia com base nas condições operacionais em tempo real (WILBERFORCE *et al.*, 2023). No entanto, essa configuração é mais complexa e cara, o que pode limitar sua aplicação em larga escala (REZAEI *et al.*, 2022).

A escolha da topologia de HESS influencia diretamente a eficiência energética e a longevidade das baterias. Estudos mostram que a topologia semi-ativa e totalmente ativa melhoram a eficiência do sistema e a durabilidade das baterias em comparação com a topologia passiva. A topologia totalmente ativa, em particular, permite que o supercapacitor atenda rapidamente às demandas de alta potência, enquanto a bateria fornece energia de fundo, evitando estresses desnecessários e prolongando sua vida útil (CHEN *et al.*, 2022; WILBERFORCE *et al.*, 2023).

A eficiência energética pode ser quantificada pela redução das perdas de energia durante a conversão e a distribuição. Considerando um sistema de controle eficiente, a equação para calcular a eficiência energética ( $\eta$ ) é descrita na equação (2.9).

$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \quad (2.9)$$

Onde:

- $P_{\text{out}}$  é a potência de saída útil do HESS.
- $P_{\text{in}}$  é a potência total de entrada fornecida ao HESS.

A Tabela 2 sintetiza a eficiência energética de cada topologia e a longevidade das baterias, com base nos autores.

### 2.7.3 Estratégias de Gerenciamento de Energia

Nos últimos anos, a adoção VEs tem crescido, impulsionada pela busca por soluções sustentáveis e eficientes de transporte. No entanto, a eficiência energética e a durabilidade das baterias continuam sendo desafios críticos. Para enfrentar esses desafios, diversas estratégias de gerenciamento de energia (EMS) têm sido desenvolvidas com o objetivo de otimizar o desempenho de HESS, que combinam baterias e supercapacitores (ASENSIO *et al.*, 2022; PISAL; VIDYARTHI, 2022; CHEN *et al.*, 2022). Segundo Mossadak, Chebak e Elmahjoub (2023), os métodos de EMS são classificados em três categorias: (i) baseados em regras, (ii) baseados em otimização e (iii) baseados em aprendizado.

**Tabela 2 – Impacto das diferentes topologias de HESS na eficiência energética e na longevidade das baterias.**

Topologia de HESS	Eficiência Energética	Longevidade das Baterias	Referências
Passiva	Baixa	Reduzida devido ao estresse contínuo	(WILBERFORCE <i>et al.</i> , 2023) (REZAEI <i>et al.</i> , 2022)
Semi-ativa	Moderada	Melhorada devido ao controle de picos	(WILBERFORCE <i>et al.</i> , 2023) (CHEN <i>et al.</i> , 2022)
Totalmente Ativa	Alta	prolongada	(CHEN <i>et al.</i> , 2022) (REZAEI <i>et al.</i> , 2022)

Fonte: Autoria Própria (2025).

Uma das abordagens mais comuns é a implementação de estratégias baseadas em regras. Estas estratégias utilizam conjuntos predefinidos de regras ou tabelas de consulta para determinar a distribuição de energia entre a bateria e o supercapacitor, com o objetivo de minimizar o estresse sobre a bateria e prolongar sua vida útil (REZAEI *et al.*, 2022). As estratégias baseadas em frequência também são amplamente utilizadas, onde a demanda de energia é decomposta em componentes de baixa e alta frequência: a bateria opera com as componentes de baixa frequência, enquanto o supercapacitor atende às demandas de alta frequência (REZAEI *et al.*, 2022; CHEN *et al.*, 2022). Essas abordagens garantem que os supercapacitores absorvam picos de potência, protegendo a bateria de variações bruscas de carga (CHEN *et al.*, 2022).

Estratégias baseadas em controle preditivo de modelo (MPC) são cada vez mais aplicadas devido à sua capacidade de prever comportamentos futuros e ajustar a distribuição de energia de forma otimizada (ASENSIO *et al.*, 2022; PISAL; VIDYARTHI, 2022). O MPC utiliza modelos dinâmicos do sistema para calcular o estado futuro do HESS e otimizar as correntes de carga e descarga em tempo real, minimizando perdas de energia e reduzindo a degradação da bateria (MA; GUO; LI, 2023). Sua função de custo  $J$  é representada pela equação (2.10).

$$J = \sum_{t=0}^N (\alpha \cdot E_{\text{loss}}(t) + \beta \cdot I_{\text{bat}}(t)^2 + \gamma \cdot (V_{\text{SC}}(t) - V_{\text{ref}})^2) \quad (2.10)$$

Onde:

- $E_{\text{loss}}$  são as perdas de energia.
- $I_{\text{bat}}$  é a corrente da bateria.
- $V_{\text{SC}}$  é a tensão do supercapacitor.

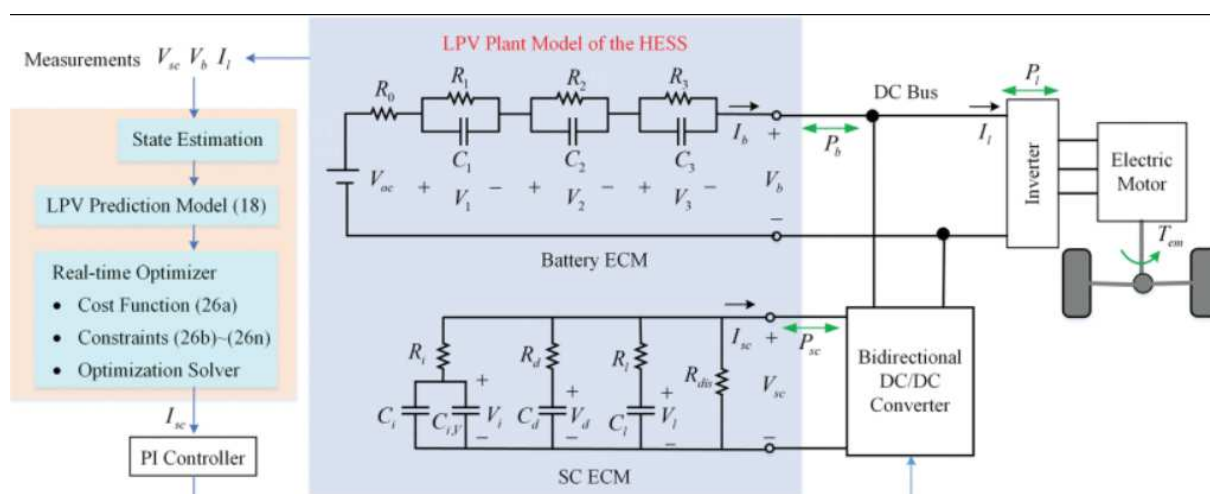
- $V_{ref}$  é a tensão de referência.
- $\alpha, \beta, \gamma$  são pesos para cada termo.

O MPC em sua forma não linear (NMPC) é frequentemente utilizado para gerenciar a distribuição de potência entre a bateria e o supercapacitor. O NMPC minimiza a degradação da bateria ao controlar a tensão do supercapacitor para um valor de referência desejado. A função custo do NMPC é projetada para reduzir as variações de corrente da bateria, que é um fator crítico para prolongar a vida útil do sistema (ASENSIO *et al.*, 2022).

O controle preditivo de modelo linear com parâmetros variantes no tempo (LPV-MPC) ajusta continuamente as variáveis de controle com base na previsão de demanda de potência e nas condições atuais do sistema (LARIJANI *et al.*, 2024; JIA *et al.*, 2021).

A Figura 9 ilustra a arquitetura HESS semi-ativa considerada e o papel do controlador de supervisão LPV-MPC: a bateria é conectada passivamente ao barramento CC, enquanto o supercapacitor (SC) é conectado por um conversor CC/CC bidirecional. Nessa configuração, as tensões do SC e da bateria são desacopladas, permitindo alocação flexível de potência do SC em acelerações e frenagens regenerativas, aliviando o estresse da bateria; a corrente de referência do SC fornecida pelo LPV-MPC é rastreada por um controlador PI do conversor.

**Figura 9 – Configuração do trem de força de um VE com HESS semi-ativo e estratégia LPV-MPC**



Fonte: Jia *et al.* (2023).

Asensio *et al.* (2022) testaram diferentes estratégias de previsão, incluindo modelos autorregressivos (AR), filtro de Kalman e o caso base de manter a potência constante. A análise demonstrou que abordagens estatísticas (AR, Kalman) fornecem previsões mais acuradas, permitindo ao MPC distribuir a carga entre bateria e supercapacitor de forma mais eficiente e reduzir o estresse nos componentes.

Além do MPC, o controle baseado em lógica fuzzy tem sido amplamente utilizado para a gestão de energia em HESS. A lógica fuzzy oferece uma forma intuitiva de modelar incertezas

e imprecisões associadas ao comportamento do sistema. Esse controle permite que a distribuição de energia seja ajustada dinamicamente com base em variáveis como o estado de carga (SOC) da bateria e as condições operacionais em tempo real (ZHANG; CHEN; LIAO, 2022). Por exemplo, uma regra fuzzy típica pode ser formulada como:

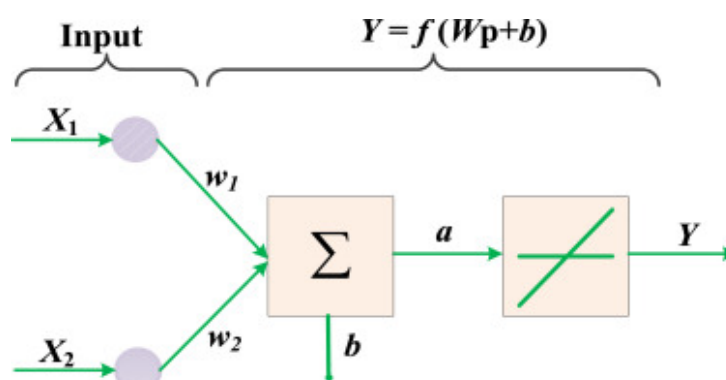
$$\text{Se } SOC_{bat} \text{ é baixo, então } P_{SC} \text{ é alto} \quad (2.11)$$

Essa regra sugere que quando o SOC da bateria é baixo, a potência fornecida pelo supercapacitor deve ser alta para evitar a descarga excessiva da bateria. Esse tipo de controle permite uma adaptação rápida às mudanças nas demandas de energia, protegendo a bateria contra picos de corrente e prolongando sua vida útil, o que é para a longevidade do sistema (ISHAQUE *et al.*, 2021).

Outra abordagem envolve o uso de algoritmos de aprendizado profundo, como redes neurais profundas (DNNs), que podem aprender e prever padrões de demanda de energia de maneira mais eficiente (PISAL; VIDYARTHI, 2022). Integrando esses algoritmos com estratégias de controle preditivo e algoritmos meta-heurísticos, como o *Squirrel Search Algorithm* (SSA), é possível aprimorar ainda mais a precisão e a eficiência do gerenciamento de energia em HESS (PISAL; VIDYARTHI, 2022).

Modelos de aprendizado têm sido empregados para prever a componente lenta da demanda de potência e, com isso, operar a bateria em regiões mais eficientes. A Figura 10 ilustra uma arquitetura típica de rede neural linear adaptativa (ADALINE) com duas entradas (por exemplo, componente de baixa frequência via wavelet de Haar e demanda da carga) e uma saída de potência prevista, utilizada para referência do controle de energia (ZHANG *et al.*, 2020).

**Figura 10 – Arquitetura básica de uma rede neural linear adaptativa (ADALINE) para previsão de demanda de potência lenta em HESS.**



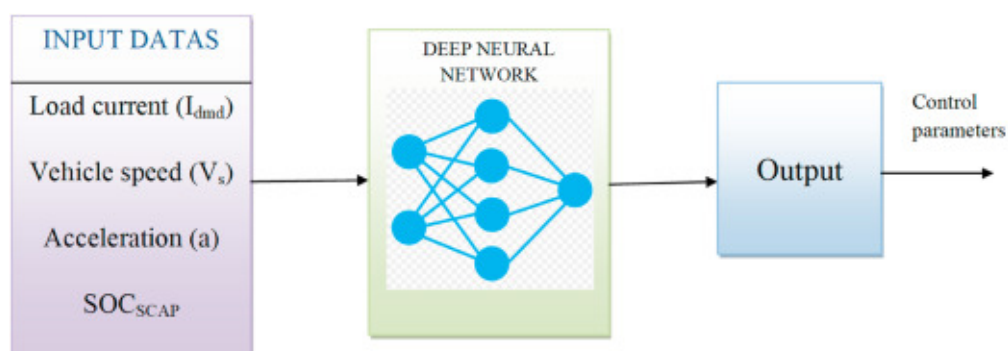
Fonte: Zhang *et al.* (2020).

O controle proporcional–integral–derivativo (PID) é amplamente empregado em aplicações industriais devido à sua simplicidade e eficácia. No entanto, em sistemas de gerenciamento de energia para veículos elétricos híbridos, sua aplicação em tempo real é limitada, já que a estratégia depende explicitamente de informações futuras da demanda de carga ou do

deslocamento do veículo. Para contornar esse desafio, [Pisal e Vidyarthi \(2022\)](#) propõem o uso de redes neurais profundas (DNN) como ferramenta de otimização *offline*, permitindo ajustar previamente os parâmetros ótimos do controlador PID.

Na abordagem apresentada pela Figura [11](#), a DNN recebe como entradas a corrente de carga ( $I_{dmd}$ ), a velocidade do veículo ( $v_s$ ), a aceleração ( $a$ ) e o estado de carga do supercapacitor ( $SOC_{SCAP}$ ). Esses dados representam tanto o perfil de condução quanto as condições de operação do HESS. A rede é treinada para fornecer como saída os parâmetros de controle ótimos (ganhos  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ ) aplicáveis ao conversor CC–CC bidirecional, conforme mostrado na Figura [11](#).

**Figura 11 – Arquitetura de rede neural profunda (DNN) para otimização de parâmetros PID no gerenciamento de energia de HESS.**



Fonte: [Pisal e Vidyarthi \(2022\)](#).

Essa metodologia explora a capacidade da DNN de aproximar sistemas complexos e reproduzir decisões que, em um contexto clássico, exigiriam alto esforço de modelagem determinística. Os autores demonstram que a calibração baseada em DNN resulta em valores de PID mais adequados para diferentes ciclos de condução, reduzindo o erro dinâmico e melhorando a eficiência energética do sistema. Em síntese, o uso de DNNs representa um avanço frente ao PID convencional, conectando técnicas de controle clássico com inteligência artificial.

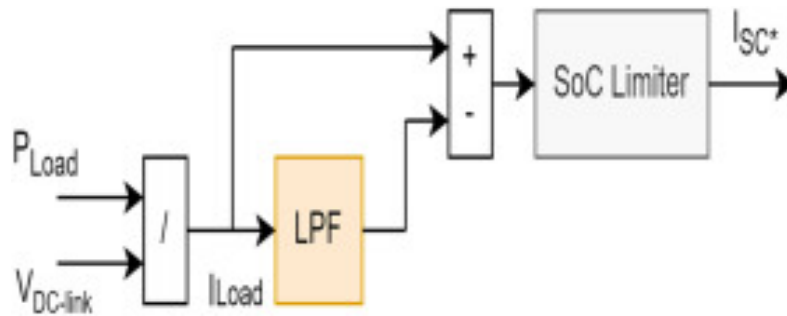
Adicionalmente, o uso de técnicas de filtragem, como a transformada wavelet, permite a separação eficiente das componentes de frequência na demanda de energia, alocando as componentes de alta frequência para os supercapacitores e as de baixa frequência para as baterias ([CHEN \*et al.\*, 2022](#); [ZHANG; CHEN; LIAO, 2022](#)). Isso não só protege a bateria contra picos de corrente, mas também melhora a eficiência energética geral do sistema, prolongando a vida útil dos componentes ([ZHANG; CHEN; LIAO, 2022](#)).

Embora a literatura apresente diversos métodos de EMS — incluindo abordagens baseadas em otimização matemática, inteligência artificial e controle preditivo — muitos desses métodos são de difícil implementação prática devido ao alto custo computacional e à necessidade de modelos altamente precisos.

Como alternativa simples e implementável em aplicações reais, o estudo de ([MAGHFIROH; WAHYUNGGORO; CAHYADI, 2024](#)) propõe o uso de um filtro passa-baixa (*Low-Pass*

*Filter - LPF*) como núcleo da EMS. O princípio de funcionamento consiste em desacoplar as componentes de baixa e alta frequência da demanda de potência: as baixas frequências são atribuídas à bateria, enquanto as variações rápidas e transitórias são direcionadas ao supercapacitor (SC). O desafio principal nessa abordagem é a escolha adequada da frequência de corte, de modo a equilibrar o estresse de corrente na bateria e a utilização do supercapacitor.

**Figura 12 – Estrutura do EMS baseado em LPF.**

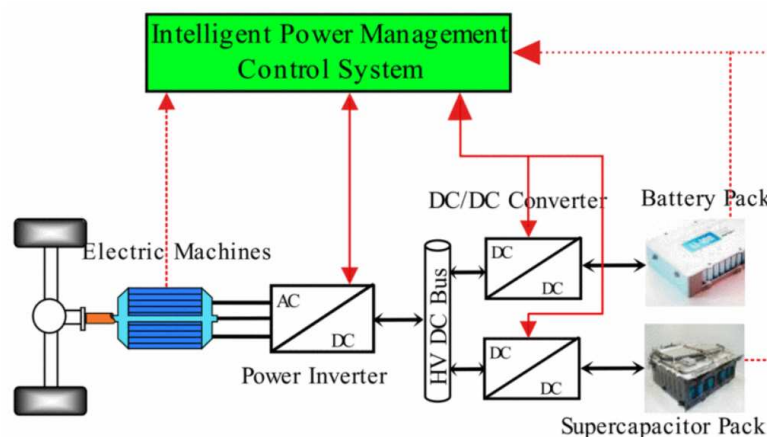


Fonte: [Maghfiroh, Wahyunggoro e Cahyadi \(2024\)](#).

Na Figura [12](#), observa-se que a corrente de baixa frequência proveniente do LPF é atribuída à bateria, enquanto a diferença entre a corrente total  $I_{Load}$  e a saída do LPF define a corrente de referência  $I_{SC}^*$  para o supercapacitor. Essa referência é posteriormente aplicada ao conversor CC-CC, responsável por acionar o SC dentro das restrições impostas pelo limitador de  $SoC$ . Os autores ressaltam que a faixa de operação do SC deve ser mantida entre 50–100% de carga, evitando degradação acelerada e perda de capacidade útil.

A Figura [13](#) ilustra a arquitetura proposta em [\(MOSSADAK; CHEBAK; ELMAHJOUB, 2023\)](#), composta por baterias como fonte primária (estacionária) e supercapacitores como fonte secundária (transitória), suprindo correntes de pico em aceleração e desaceleração.

**Figura 13 – Configuração totalmente ativa de HESS: baterias e supercapacitores conectados ao barramento CC via conversores bidirecionais, sob supervisão de um iPMCS.**



Fonte: [Mossadak, Chebak e Elmahjoub \(2023\)](#).

Para coordenar esse arranjo, os autores introduzem o *Intelligent Power Management Control System* (iPMCS), responsável por definir a partição otimizada dos fluxos de energia entre os componentes. O iPMCS atua como uma estrutura integradora que pode incorporar essas diferentes estratégias de controle.

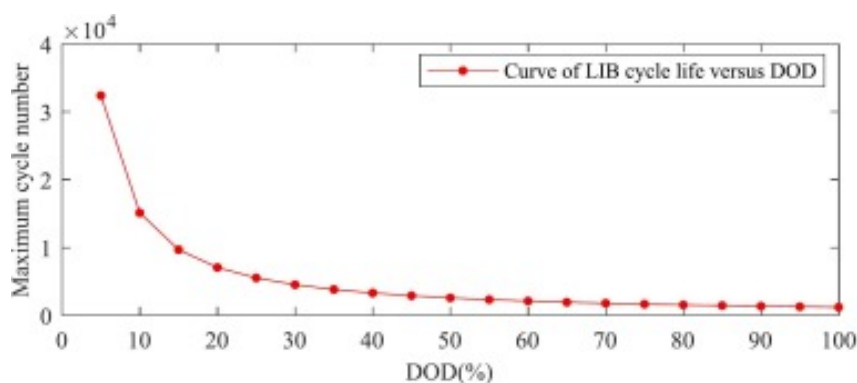
Outro aspecto relevante do estudo é a adoção da abordagem de engenharia de sistemas baseada em modelos (*Model-Based Systems Engineering*, MBSE) com a linguagem *SysML* para modelagem da arquitetura do iPMCS. Essa prática reduz tempo, custo e risco de desenvolvimento, oferecendo uma visão hierárquica e clara dos objetivos, missões e funcionalidades do sistema, além de maior rastreabilidade no processo de projeto.

As estratégias de gerenciamento de energia para HESS em veículos elétricos são fundamentais para melhorar a eficiência energética e a longevidade dos sistemas de armazenamento. Desde abordagens baseadas em regras simples até sofisticados algoritmos de aprendizado de máquina, essas estratégias desempenham um papel importante na maximização do desempenho dos veículos elétricos e na proteção de suas baterias (REZAEI *et al.*, 2022; ASENSIO *et al.*, 2022; PISAL; VIDYARTHI, 2022).

## 2.8 CICLO DE VIDA, PROFUNDIDADE DE DESCARGA E IMPLICAÇÕES PARA HESS

O desempenho em ciclo e a degradação das fontes de armazenamento impõem limites diretos ao dimensionamento e ao controle do HESS. Em Chen *et al.* (2023), compara-se a sensibilidade do ciclo de vida à profundidade de descarga (DOD) em baterias de íon-lítio (LIB) e o comportamento das baterias redox de vanádio (VRB). Para LIB, o número de ciclos decresce acentuadamente com o aumento do DOD, refletindo mecanismos dominantes de envelhecimento por deposição de lítio metálico na superfície do ânodo, crescimento da Camada de Interface Eletrólito-Sólido (SEI) e estresse eletromecânico nas extremidades de SOC. A relação empírica apresentada em Chen *et al.* (2023) (Figura 14) evidencia que operar com janelas de DOD menores aumenta substancialmente a vida útil.

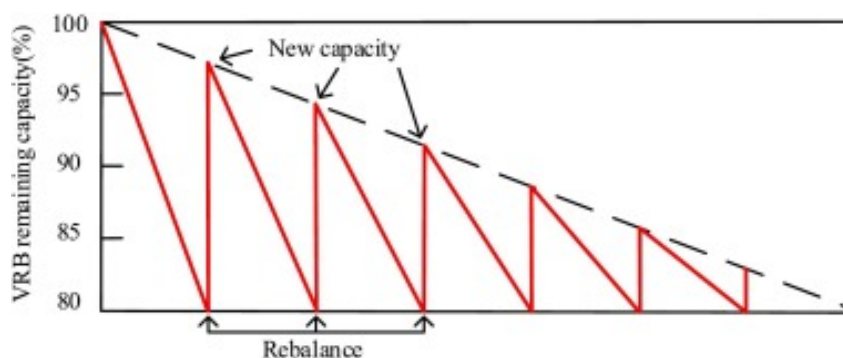
**Figura 14 – Relação qualitativa entre número máximo de ciclos e DOD para baterias de íon de lítio.**



Fonte: Chen *et al.* (2023).

Para VRB, o ciclo de vida é praticamente independente do DOD, porém a capacidade aparente decai gradualmente devido à contaminação cruzada dos eletrólitos. Tal perda é parcialmente reversível via *rebalance* periódico dos tanques, como ilustrado na Figura 15 (CHEN *et al.*, 2023). Assim, enquanto LIB requer gestão ativa de faixa de SOC/DOD para mitigar envelhecimento, VRB demanda rotinas de manutenção de eletrólito.

**Figura 15 – Esquema do decaimento de capacidade e recuperação por *rebalance* em VRB.**



Fonte: Chen *et al.* (2023).

Para baterias de íon de lítio em aplicações veiculares, os resultados de Chen *et al.* (2023) reforçam duas diretrizes: (i) limitar picos de corrente e manter a operação em janelas de DOD moderadas eleva o número de ciclos; (ii) topologias HESS e EMS que desviam componentes rápidas/altas de potência para o supercapacitor (SC) reduzem a variância de corrente da bateria, diminuindo perdas de potência por aquecimento e estresse eletrotérmico. Em síntese, a sensibilidade do ciclo de vida ao DOD em LIB fornece a justificativa física para as estratégias de limitação de taxa C, de amplitude de corrente e de operação em janelas de SOC mais “saudáveis” no contexto HESS.

### 3 DA MODELAGEM ÀS EVIDÊNCIAS: ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com base na revisão da literatura, os resultados experimentais e as simulações realizadas nos estudos sobre HESS em VEs demonstraram avanços em termos de eficiência energética e vida útil das baterias. Os métodos baseados em aprendizado por reforço e controle preditivo de modelos têm mostrado superioridade em comparação com estratégias tradicionais baseadas em regras.

No estudo de (MANOJ *et al.*, 2021) foi demonstrado que o uso de aprendizado por reforço em estratégias de gerenciamento de energia para HESS resulta em maior eficiência energética e estabilidade do sistema. Similarmente, (YANG *et al.*, 2022) destacaram a eficácia do Controle Preditivo de Modelo (MPC) em minimizar perdas de energia e manter a tensão do barramento DC estável, superando as abordagens tradicionais baseadas em regras. Essas evidências reforçam a adoção de técnicas avançadas de controle para otimizar o desempenho e a vida útil dos sistemas de energia em veículos elétricos.

No estudo de (CHEN *et al.*, 2022), foi demonstrado que a combinação de controladores não-lineares e técnicas de filtragem passa-baixa, média móvel e transformada wavelet permitiu uma divisão eficiente de potência entre a bateria e o supercapacitor, melhorando a robustez e adaptabilidade em ciclos de condução como o IM240 e ECE-15. A utilização de supercapacitores para absorver componentes de alta frequência da potência demandada demonstrou ser eficaz para prolongar a vida útil das baterias, evitando sobrecargas e flutuações bruscas de corrente.

O estudo conduzido por Manoj *et al.* (2021) validou a eficácia de um controlador PID em sistemas HESS, demonstrando que o ajuste dos parâmetros de controle utilizando algoritmos meta-heurísticos pode reduzir o tempo de estabilização e aumentar a eficiência energética do sistema. A integração de técnicas avançadas de aprendizado profundo (Deep Neural Networks) com algoritmos otimizados provou ser uma abordagem para otimizar a gestão de energia em tempo real.

Experimentos adicionais em plataformas de veículos elétricos de teste, como no estudo de Yang *et al.* (2022), utilizaram topologias semi-ativas e completamente ativas para HESS, mostrando que estratégias de controle ativo não apenas otimizam a distribuição de energia, mas também oferecem maior controle sobre a tensão do barramento DC e a corrente de carga da bateria. Tais abordagens foram fundamentais para minimizar as perdas de energia e estabilizar a tensão do sistema, contribuindo para um desempenho consistente e confiável.

Os estudos de validação e simulação, implementados em ambientes como MATLAB/Simulink, IGNITE e plataformas de teste em tempo real, evidenciam que a adoção de estratégias de controle preditivo e o uso de tecnologias híbridas de armazenamento de energia são passos essenciais para o avanço dos veículos elétricos. A combinação de modelagem detalhada, estratégias avançadas de gerenciamento de energia e otimização baseada em aprendizado de máquina está provando ser um caminho viável e eficaz para a próxima geração de veículos elétricos

([YANG et al., 2022](#)).

Esses avanços não apenas aumentam a eficiência energética dos veículos elétricos, mas também promovem a sustentabilidade ao reduzir a necessidade de substituição frequente das baterias, oferecendo soluções economicamente viáveis e ecologicamente corretas para o futuro da mobilidade.

Estudo	Eixo / Abordagem	Método / Modelo	Achados / Contribuições
(WANG <i>et al.</i> 2023)	Modelagem HESS	Integração bateria-supercapacitor	Ganhos de eficiência e vida útil via combinação Li-ion + SC em VEs.
(CHEN <i>et al.</i> 2023)	Modelagem HESS	Integração bateria-supercapacitor	Complementaridade energia/potência e implicações para controle.
(MESBAHI <i>et al.</i> 2021)	Modelagem HESS	Arquiteturas híbridas	HESS como opção para perfis dinâmicos de condução.
(MARIASIU; KE-LEMMEN; 2023)	Contexto VE	Revisão de armazenamento	Reforça demanda por soluções de alta eficiência em VEs.
(WILBERFORCE <i>et al.</i> 2023)	Topologias HESS	Passiva, semi-ativa e totalmente ativa	Semi/ativa reduzem estresse; ativa maximiza eficiência com maior custo/complexidade.
(CHEN <i>et al.</i> 2022)	Topologias & Controle	Não lineares + filtragem (passa-baixa, média móvel, wavelet)	Divisão eficiente de potência; robustez (IM240, ECE-15); prolonga vida útil da bateria.
(REZAEI <i>et al.</i> 2022)	EMS (Regras/Frequência)	Regras e separação por frequência	SC absorve alta frequência; bateria fica com baixa; menor estresse e melhor durabilidade.
(RAIKAR; SAHA; VITTAL 2022)	Topologias	Revisão de configurações	Limitações da topologia passiva em picos de demanda.
(MAGHFIROH; WAHYUNGGORO; CAHYADI 2024)	Topologias	Arquiteturas ativas	Controle independente com maior flexibilidade; custo/complexidade acrescidos.
(YANG <i>et al.</i> 2020)	Modelagem de SC	RC equivalente (SC)	Resposta a picos transitórios; útil para variações de alta frequência.
(KUBENDRAN; SHUAIB; ROSELYN 2022)	Modelagem de SC	RC equivalente (SC)	Ênfase em $C_{uc}$ e $R_{uc}$ na resposta dinâmica.
(ZHANG; CHEN; LIAO 2022)	EMS (Filtragem & Fuzzy)	Wavelet/filtragem; lógica fuzzy	Separação eficiente de frequências; proteção da bateria; base para regras fuzzy.
(ASENSIO <i>et al.</i> 2022)	Previsão & Controle	AR/Kalman; MPC/NMPC	NMPC minimiza variação de corrente; preserva saúde da bateria; resposta preditiva.
(PISAL; VIDYARTHI 2022)	Previsão & Otimização	DNN + meta-heurísticas (SSA)	Melhora previsão e eficiência do EMS quando integrado ao controle preditivo.
(MA; GUO; LI 2023)	Previsão & Controle	MPC com modelos dinâmicos	Redução de perdas; ajuste em tempo real das correntes de carga/descarga.
(YANG <i>et al.</i> 2022)	Controle & Topologias	MPC; semi-ativa/ativa	Estabiliza barramento DC; otimiza distribuição; controle em tempo real.
(LARIJANI <i>et al.</i> 2024)	Controle	LPV-MPC	Ajuste contínuo de variáveis conforme demanda/estado.
(JIA <i>et al.</i> 2023)	Modelagem de SC	Zubieta-Bonert (múltiplos RC)	Capta resposta dinâmica transitória dos SC para picos de potência.
(JIA <i>et al.</i> 2021)	Modelagem de Bateria & MPC	ECM Li-ion; função de custo MPC	Representa $V_{OC}$ , $R_s$ , ramos RC; base p/custo que penaliza perdas e variações de corrente.
(WANG; LI; CHEN 2022)	Modelagem de Bateria	ECM ( $OCV + R_{eq}$ )	$V_T$ dependente de SOC/temperatura; útil a desempenho/envelhecimento.
(MALLON; ASSADIAN 2022)	Modelagem/Envelhecimento	ECM aplicado	Suporte a simulações de desempenho e envelhecimento.
(Mallon e Assadian 2022)	Modelagem/Envelhecimento	ECM aplicado	Análises de comportamento e envelhecimento em simulações.
(ISHAQUE <i>et al.</i> 2021)	EMS (Fuzzy)	Regras fuzzy (ex.: SOC baixo $\Rightarrow P_{SC}$ alto)	Partição dinâmica de potência para proteger a bateria.
(MANOJ <i>et al.</i> 2021) — RL	EMS (Aprendizado)	Aprendizado por reforço em HESS	Maior eficiência energética e estabilidade versus abordagens tradicionais.
(Manoj <i>et al.</i> 2021) — PID+Meta-heurísticas	Controle Clássico Otimizado	PID com ajuste por meta-heurísticas	Reduz tempo de estabilização; eleva eficiência global.
(Yang <i>et al.</i> 2023)	Validação/Simulação	MATLAB/Simulink, IGNITE, HIL	Evidencia robustez de estratégias preditivas e arquiteturas híbridas em testes.

**Tabela 3 – Síntese ampliada dos trabalhos citados na Discussão (eixo temático, método/modelo e contribuições).**

Fonte: Autoria Própria (2025).

## 4 CONCLUSÃO

Apresentou-se neste trabalho uma revisão sistemática da literatura sobre HESS em veículos elétricos no período de 2020 a 2025, com seleção de artigos nas bases ScienceDirect, Scopus e Web of Science e ranqueamento por meio do método InOrdinatio. Os resultados evidenciaram que a combinação de baterias de íon-lítio e supercapacitores constitui uma opção para mitigar problemas de degradação acelerada, perdas energéticas e limitações de potência observadas em sistemas exclusivamente baseados em baterias. Modelos elétricos simplificados, como os de circuito equivalente, continuam sendo amplamente utilizados devido ao seu equilíbrio entre precisão e baixo custo computacional, enquanto topologias semi-ativas e totalmente ativas mostraram-se mais eficientes para o particionamento de potência e para o prolongamento da vida útil da bateria.

A análise também revelou a evolução das estratégias de gerenciamento de energia. Embora métodos heurísticos e de filtragem em frequência ainda sejam relevantes em contextos de hardware limitado, as abordagens mais recentes baseadas em controle preditivo, em especial o modelo preditivo linear-parametrizado, e em técnicas de aprendizado de máquina, como redes neurais e aprendizado por reforço, têm demonstrado maior capacidade de adaptação a cenários dinâmicos, além de ganhos consistentes em autonomia e eficiência. Estudos comparativos indicaram reduções expressivas nos picos de corrente da bateria e maior estabilidade no estado de carga quando a energia é particionada com apoio dos supercapacitores, confirmando o potencial do HESS em aumentar a confiabilidade e a sustentabilidade dos veículos elétricos.

Apesar dos avanços, foram identificadas limitações importantes que representam as lacunas de pesquisa, como a ausência de padronização nos ciclos experimentais, a carência de estudos de longa duração em campo e a necessidade de integrar aspectos térmicos, econômicos e de cibersegurança ao projeto de sistemas de gerenciamento de energia. Observa-se também que o custo de implementação dos sistemas híbridos de armazenamento de energia constitui um fator relevante, mas que não é discutido de forma aprofundada nos trabalhos analisados, os quais se concentram majoritariamente em métricas técnicas de desempenho, eficiência e vida útil, sem avaliar de maneira sistemática os impactos econômicos associados às diferentes topologias, níveis de complexidade dos conversores e estratégias de controle.

Nesse sentido, trabalhos futuros devem considerar de forma explícita a avaliação do custo de implementação e sua relação com os ganhos obtidos em desempenho, durabilidade e eficiência energética, além da realização de ensaios em condições reais de operação para validar os ganhos reportados em simulações, o desenvolvimento de estratégias de controle hierárquico que conciliem métodos preditivos e aprendizado de máquina, a inclusão de modelos eletrotérmicos acoplados ao gerenciamento de energia e a avaliação de novas químicas de baterias em associação a supercapacitores. Além disso, pesquisas poderão explorar a integração dos HESS com sistemas inteligentes de rede, veículos conectados e estratégias de recarga bidirecional,

consolidando o papel desses sistemas como componentes centrais para a eficiência, segurança e sustentabilidade da mobilidade elétrica em larga escala.

## REFERÊNCIAS

ASENSIO, E. M. *et al.* Short-term power demand prediction for energy management of an electric vehicle based on batteries and ultracapacitors. **Energy**, v. 247, 2022. Cited by: 11. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85124843225&doi=10.1016%2fj.energy.2022.123430&partnerID=40&md5=1c3f24bf1a42a0f481f161e9a40944fd>.

BAMDEZH, M.; MOLAEIMANESH, G. Aging behavior of an electric vehicle battery system considering real drive conditions. **Energy Conversion and Management**, v. 304, p. 118213, 2024. Cited by: 15; Research Paper. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118213>.

CHEN, F. *et al.* Energy management and nonlinear control strategy of hybrid energy storage system for electric vehicle. **Energy Reports**, v. 8, p. 11161 – 11173, 2022. Cited by: 9; All Open Access, Gold Open Access. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85137267270&doi=10.1016%2fj.egyr.2022.08.250&partnerID=40&md5=e4eeb733e62d9c912a6e061839e565cf>.

CHEN, X. *et al.* Hybrid energy storage system optimization with battery charging and swapping coordination. **IEEE Transactions on Automation Science and Engineering**, p. 1–12, 2023. Cited by: 0. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85165928983&doi=10.1109%2fTASE.2023.3292189&partnerID=40&md5=4c92d551e5be39b315031776ea96ae29>.

HU, J. *et al.* A real-time multi-objective optimization method in energy efficiency for plug-in hybrid electric vehicles considering dynamic electrochemical characteristics of battery and driving conditions. **Journal of Energy Storage**, v. 84, p. 110779, 2024. Cited by: 11; Research Paper. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.110779>.

ISHAQUE, M. R. *et al.* Fuzzy logic-based duty cycle controller for the energy management system of hybrid electric vehicles with hybrid energy storage system. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 11, 2021. Cited by: 5; All Open Access, Gold Open Access. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85104072136&doi=10.3390%2fapp11073192&partnerID=40&md5=2beafb1534223fac9abc49b15f9ae19b>.

JAFARI, M. *et al.* Electric vehicle battery cycle aging evaluation in real-world daily driving and vehicle-to-grid services. **IEEE Transactions on Transportation Electrification**, v. 4, n. 1, p. 122–134, 2018.

JAGUEMONT, J.; BOULON, L.; DUBÉ, Y. A comprehensive review of lithium-ion batteries used in hybrid and electric vehicles at cold temperatures. **Applied Energy**, v. 164, p. 99–114, 2016. Cited by: 893; Highly Cited. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.11.034>.

JIA, C. *et al.* A real-time, linear, parameter-varying, model predictive control strategy for a battery-supercapacitor hybrid energy storage system. **Proceedings of the 2021 IEEE 12th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems, PEDG 2021**, 2021. Cited by: 0. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85112350164&doi=10.1109%2fPEDG51384.2021.9494277&partnerID=40&md5=961106a77d091060e5c348b37e3642ae>.

\_\_\_\_\_. Real-time model predictive control for battery-supercapacitor hybrid energy storage systems using linear parameter-varying models. **IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics**, v. 11, p. 251 – 263, 2023. Cited by: 10. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85120567249&doi=10.1109%2fJESTPE.2021.3130795&partnerID=40&md5=9ad24d55e4113f5ef00d761ca09c4e9c>.

KUBENDRAN, V.; SHUAIB, Y. M.; ROSELYN, J. P. Modelling of vehicle dynamics and determination of energy demand for electric vehicle. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 2335, 2022. Cited by: 1. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85139128676&doi=10.1088%2f1742-6596%2f2335%2f1%2f012049&partnerID=40&md5=e97e04f8cd7520ecec85dd7beaf26578>.

LARIJANI, M. R. *et al.* Linear parameter-varying model predictive control for intelligent energy management in battery/supercapacitor electric vehicles. **IEEE ACCESS**, v. 12, p. 51026–51040, 2024. ISSN 2169-3536.

LIU, R. *et al.* A twin delayed deep deterministic policy gradient-based energy management strategy for a battery-ultracapacitor electric vehicle considering driving condition recognition with learning vector quantization neural network. **Journal of Energy Storage**, v. 71, p. 108147, 2023. ISSN 2352-152X. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X2301544X>.

LIU, Z. *et al.* Comparing total cost of ownership of battery electric vehicles and internal combustion engine vehicles. **Energy Policy**, Elsevier, v. 158, p. 112564, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421521004341>.

LU, L. *et al.* A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles. **Journal of Power Sources**, v. 226, p. 272–288, 2013. Cited by: 4145; Highly Cited. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.10.060>.

MA, B.; GUO, X.; LI, P. Adaptive energy management strategy based on a model predictive control with real-time tuning weight for hybrid energy storage system. **Energy**, v. 283, p. 129128, 2023. ISSN 0360-5442. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544223025227>.

MAGHFIROH, H.; WAHYUNGGORO, O.; CAHYADI, A. I. Novel iterative ragone plot-based optimization of low pass filter for hybrid power sources electric vehicles. **e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy**, v. 7, p. 100389, 2024. ISSN 2772-6711. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S277267112300284X>.

MALLON, K.; ASSADIAN, F. A study of control methodologies for the trade-off between battery aging and energy consumption on electric vehicles with hybrid energy storage systems. **ENERGIES**, v. 15, 1 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en15020600>.

MANOJ, G. A. *et al.* Energy management and hybridization of nissan leaf using switched capacitor converter and ultra-capacitor. **2021 IEEE International Power and Renewable Energy Conference, IPRECON 2021**, 2021. Cited by: 0. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85123793986&doi=10.1109%2fIPRECON52453.2021.9640625&partnerID=40&md5=5a23203ce4e00fc9e015cc0167ce8fb8>.

MARIASIU, F.; KELEMEN, E. A. Analysis of the energy efficiency of a hybrid energy storage system for an electric vehicle. **BATTERIES-BASEL**, v. 9, 8 2023.

MESBAHI, T. *et al.* Advanced model of hybrid energy storage system integrating lithium-ion battery and supercapacitor for electric vehicle applications. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 68, p. 3962 – 3972, 2021. Cited by: 44. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85098755870&doi=10.1109%2fTIE.2020.2984426&partnerID=40&md5=a20417776cc6ac5917d25e7019cbdede>.

MOSSADAK, M.-A.; CHEBAK, A.; ELMAHJOUR, A. A. Intelligent power management control system modelling for battery/supercapacitor electric vehicles using mbse and sysml. **2023 2nd International Conference on Mechatronics and Electrical Engineering, MEEE 2023**, p. 20 – 24, 2023. Cited by: 0. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85161605767&doi=10.1109%2fMEEE57080.2023.10126676&partnerID=40&md5=5968febfad15e9bda9010d8b50feb9f3>.

PAGANI, R. N.; KOVALESKI, J. L.; RESENDE, L. M. Methodi ordinatio: a proposed methodology to select and rank relevant scientific papers encompassing the impact factor, number of citation, and year of publication. **Scientometrics**, v. 105, n. 3, p. 2109–2135, 2015.

PAGE, M. J. *et al.* Prisma 2020 explanation and elaboration: updated guidance and exemplars for reporting systematic reviews. **BMJ**, v. 372, p. n160, 2021.

PISAL, P. S.; VIDYARTHI, D. A. An optimal control for power management in super capacitors/battery of electric vehicles using deep neural network. **Journal of Power Sources**, v. 542, p. 231696, 2022. ISSN 0378-7753. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775322006930>.

RAIKAR, S. B.; SAHA, A.; VITTAL, K. P. Frequency filtering in ultracapacitor-battery energy storage system in electric vehicles. **2022 IEEE North Karnataka Subsection Flagship International Conference, NKCon 2022**, 2022. Cited by: 0. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85163068442&doi=10.1109%2fNKCon56289.2022.10127020&partnerID=40&md5=22e7a344cd6ab00c104f41b2b1b224c7>.

REZAEI, H. *et al.* Energy management strategies of battery-ultracapacitor hybrid storage systems for electric vehicles: Review, challenges, and future trends. **Journal of Energy Storage**, v. 53, p. 105045, 2022. ISSN 2352-152X. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X22010477>.

THANGAVEL, S. *et al.* A comprehensive review on electric vehicle: Battery management system, charging station, traction motors. **IEEE Access**, v. 11, p. 20994–21019, 2023. Cited by: 103; Keywords: Automobiles, Batteries, BMS, Charging station, Motors, Cyber security. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3250221>.

VEZA, I. *et al.* Electric vehicle (ev) and driving towards sustainability: Comparison between ev, hev, phev, and ice vehicles to achieve net zero emissions by 2050 from ev. **Alexandria Engineering Journal**, v. 82, p. 459–467, 2023. ISSN 1110-0168. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016823009055>.

WANG, L.; LI, M.; CHEN, Z. An energy management strategy for hybrid energy storage systems coordinate with state of thermal and power. **Control Engineering Practice**, v. 122, 2022. Cited by: 13. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85125016472&doi=10.1016%2fj.conengprac.2022.105122&partnerID=40&md5=b81606cf2cb229dcb104df16bc791b4e>.

WANG, Y. *et al.* An energy management strategy for hybrid energy storage system based on reinforcement learning. **World Electric Vehicle Journal**, v. 14, 2023. Cited by: 3; All Open Access, Gold Open Access. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85150986012&doi=10.3390%2fwvej14030057&partnerID=40&md5=a3d3a9b71e8c43bc278375b8becc80cb>.

WILBERFORCE, T. *et al.* An investigation into hybrid energy storage system control and power distribution for hybrid electric vehicles. **Energy**, v. 279, p. 127804, 2023. ISSN 0360-5442. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544223011982>.

YANG, B. *et al.* Applications of battery/supercapacitor hybrid energy storage systems for electric vehicles using perturbation observer based robust control. **Journal of Power Sources**, v. 448, p. 227444, 2020. ISSN 0378-7753. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775319314375>.

YANG, Y. *et al.* Research on the energy management strategy of extended range electric vehicles based on a hybrid energy storage system. **Energy Reports**, v. 8, p. 6602–6623, 2022. ISSN 2352-4847. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484722008605>.

\_\_\_\_. Research on the energy management strategy of extended range electric vehicles based on a hybrid energy storage system. **Energy Reports**, v. 8, p. 6602–6623, 2023. Cited by: –; All Open Access, Gold Open Access. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.05.013>.

ZHANG, Q.; CHEN, X.; LIAO, S. Energy management control strategy for hybrid energy storage systems in electric vehicles. **International Journal of Electrochemical Science**, v. 17, p. 220121, 2022. ISSN 1452-3981. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S145239812301009X>.

ZHANG, Q. *et al.* A real-time energy management control strategy for battery and supercapacitor hybrid energy storage systems of pure electric vehicles. **Journal of Energy Storage**, v. 31, p. 101721, 2020. ISSN 2352-152X. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X20315589>.