

**ASSOCIAÇÃO EDUCACIONAL DOM BOSCO  
FACULDADE DE ENGENHARIA DE RESENDE  
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**VICENTE DE PAULO VITURINO  
VITOR LUÍS DA SILVA JUNIOR**

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE OS MÉTODOS DE ESTIMAÇÃO DE ESTADO  
DE CARGA PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS**

Resende – RJ

2024

**ASSOCIAÇÃO EDUCACIONAL DOM BOSCO  
FACULDADE DE ENGENHARIA DE RESENDE**

**Vicente de Paulo Vitorino  
Vitor Luís da Silva Junior**

**Estudo Comparativo entre os Métodos de Estimação de Estado de Carga para  
Veículos Elétricos**

Trabalho de Graduação apresentado à Associação Educacional Dom Bosco, Faculdade de Engenharia de Resende, Curso de Engenharia Elétrica, como requisito parcial para obtenção do diploma de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Resende – RJ

2024

Catálogo na fonte  
Biblioteca Central da Associação Educacional Dom Bosco – Resende-RJ

V854 Viturino, Vicente de Paulo  
Estudo comparativo entre os métodos de estimação de estado de carga para veículos elétricos / Vicente de Paulo Viturino; Vitor Luís da Silva Junior - 2024.  
64f.

Orientador: Luiz Fernando Ribas Monteiro  
Trabalho de conclusão de curso apresentado como requisito parcial à finalização do curso de Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia de Resende da Associação Educacional Dom Bosco.

1. Engenharia elétrica. 2. Veículo elétrico. 3. Bateria. I. Silva Junior, Vitor Luís da. II. Monteiro, Luiz Fernando Ribas. III. Faculdade de Engenharia de Resende. IV. Associação Educacional Dom Bosco. V. Título.

CDU 629.331(043)



Vicente de Paulo Viturino

Vitor Luís da Silva Junior

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO  
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE ENGENHARIA  
ELÉTRICA COM ÊNFASE EM ELETRÔNICA.

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA

**BANCA EXAMINADORA:**

*Luiz Fernando Ribas Monteiro*

Prof. (a).: Prof. M.Sc. Luiz Fernando Ribas Monteiro

Orientador

Prof. (a).: Prof. M.Sc. Douglas Rosa Grillo

Membro da Banca

*Juliana Ribas Monteiro*

Prof. (a).: Dra. Juliana Ribas Monteiro

Membro da Banca

Resende, 04 dezembro de 2024.

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar agradecemos a Deus, fonte da vida e da graça. Agradecemos pelas nossas vidas e por nos capacitar e nos ajudar em todos os momentos.

As nossas famílias e amigos pelo apoio e incentivo.

Ao nosso orientador, Prof. M.Sc. Luiz Fernando Ribas Monteiro, que jamais deixou de nos incentivar e sem a sua orientação, dedicação e auxílio, o estudo aqui apresentado seria praticamente impossível.

Aos nossos professores que fizeram toda diferença nessa caminhada até aqui. Apesar das dificuldades enfrentadas, sempre incentivaram nossos estudos.

Aos funcionários das Faculdades Dom Bosco pela dedicação e alegria no atendimento.

## RESUMO

Este trabalho tem por objetivo fazer um estudo sobre os Métodos de Estimação de Estado de Carga e realizar uma análise dos fatores que afetam a expansão dos veículos elétricos à bateria do tipo automóvel (VEBs) no Brasil, contribuindo para a produção de fontes de pesquisa sobre o assunto. O contexto histórico e evolução dos VEBs são analisados e os motivos que os levaram a perder espaço para os veículos movidos por motores de combustão interna no início do século XX. Posteriormente, as conjunturas relacionadas aos veículos convencionais que interagem com os VEBs são analisadas, assim como as características e circunstâncias específicas destes trata da modelagem de baterias de íon-lítio e de um estudo comparativo de estimativa do estado de carga de veículos elétricos. A abordagem de modelagem foi realizada utilizando circuitos equivalentes com detalhamento das variáveis e parâmetros que influenciam o processo, dando um foco crítico na análise dos métodos existentes. Na metodologia foi utilizada a parte conceitual de fundamentação teórica, passando em seguida para as etapas de modelagem, análise, conclusão da análise e mensuração. O método de estimativa de contagem de Coulomb estima o estado de carga da bateria com base na integral da corrente elétrica ao longo do tempo. Apesar de simples, por ser em malha aberta, possui erro acumulativo. As metodologias foram comparadas entre si em termos de precisão e exatidão utilizando algumas ferramentas, os modelos provaram ser satisfatórios e os resultados fornecem insights sobre a eficácia e eficiência das abordagens propostas.

**Palavras-chave:** Estado de Carga. Baterias de Íon-Lítio. Contagem de Coulomb. Modelo de Baterias.

## ABSTRACT

This project aims to study the State of Charge Estimation Methods and perform an analysis of the factors that affect the expansion of automotive-type battery electric vehicles (BEVs) in Brazil, contributing to the production of research sources on the subject. The historical context and evolution of BEVs is analyzed, presenting the reasons that led them to lose space to vehicles powered by internal combustion engines at the beginning of the 20th century. Subsequently, the circumstances related to conventional vehicles that interact with BEVs are analyzed, as well as the specific characteristics and circumstances of this study of modeling lithium-ion batteries and a comparative study of estimating the state of charge of electric vehicles. The modeling approach was carried out using equivalent circuits with details of the variables and parameters that influence the process, giving a critical focus on the analysis of existing methods. In the methodology, the conceptual part of the theoretical foundation was used, then moving on to the modeling, analysis, conclusion of the analysis and measurement stages. The Coulomb count estimation method estimates the state of charge of the battery based on the integral of electrical current over time. Despite being simple, as it is open-loop, it has accumulative error. The methodologies were compared with each other in terms of precision and accuracy using some tools, the models proved to be satisfactory and the results provide insights into the effectiveness and efficiency of the proposed approaches.

**Keywords:** Stage of Charge. Lithium-Ion Battery. Coulomb Counting. Battery Model.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.Gráfico 1 – Número total de veículos (2006-2015).....	13
Figura 1.Gráfico 2 – Quantidade total de veículos elétricos no mundo (2010 – 2019).....	14
Figura 3.Gráfico 3 – Porcentagem de emissão de CO <sub>2</sub> no mundo(setor de transportes).....	15
Figura 4.Gráfico 4 – Porcentagem de emissão de CO <sub>2</sub> no Brasil (setor de transportes).....	15
Figura 5 – Diagrama de blocos dos veículos elétricos.....	21
Figura 6 – Diagrama de blocos veículo elétrico acrescido do conversor CA/CC e cargas de serviço.....	22
Figura 7.Gráfico 5 – Valor kWh,em dólar, das baterias de lítio-íon.....	29
Figura 8 – Principais elementos de uma célula de bateria.....	30
Figura 9 – Veículos Elétricos Comercializados no Brasil.....	34
Figura 10 – Métodos de Estimação de Soc.....	40
Figura 11 – Metodologia do Trabalho.....	45
Figura 12 – Percentual de Carga.....	50
Figura 13 – Pontos de Aterramento.....	52
Figura 14 – Pontos de Isolamento..	53
Figura 15 – Testador de Resistência.....	54
Figura 16 – Cabo de Teste.....	54
Figura 17 – Cinta Magnética... ..	55
Figura 18 – Comunicação.....	55
Figura 19 – Esquema de funcionamento do processo de descarga e carga das baterias.....	57

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparativo de tecnologias de baterias até o ano de 2010.....	28
Tabela 2 – Valores de referência para as principais tecnologias de bateria. ....	49
Tabela 3 – Pontos de Teste. ....	53

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABVE	Associação Brasileira Veículos Elétricos
ALS	Autocovariance Least Square
AUKF	Adaptative Unscented Kalman Filter
BEV	Battery Electric Vehicle
BJDST	Beijing Dynamic Stress Test
BMS	Battery Management System
CBMM	Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração
CC\CA	Corrente Contínua e Corrente Alternada
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
DE	Differential Evolution
DOD	Depth of Discharge
EKF	Extended Kalman Filter
FUDS	Federal Urban Driving Schedules
GA	Genetic Algorithm
GLM	Generalized Linear Model
ICE	Internal Combustion Engine
IRENA	International Renewable Energy Agency
LI-S	Lítio-Enxofre
LIB	Lithium-ion Battery
Li-ion	Lithium-ion
LFP	Lithium-Ion Phosphate
LMO	Lítio Manganês Óxido
LLS	Linear Least Square
LTO	Titanato Lítio
MCI	Motor Combustão Interno
MCU	Macro Controle Unit
MPSO	Multi Swarm Particle Optimization
NAS	Sódio Enxofre
NCA	Níquel Cobalto Alumínio
NEDC	New European Driving Cycle
NI-CD	Níquel - Cádmio

NI-MH	Níquel - Hidreto
NO <sub>x</sub>	Óxido de Nitrogênio
NO <sub>2</sub>	Dióxido de Nitrogênio
NMC	Níquel Manganês Cobalto
OCV	Open Circuit Voltage
PSO	Dynamic Swarm Optimization
RLS	Recursive Least Square
SAE	Sistema de Armazenamento de Energia
SKF	Standard Kalman Filter
SOC	State of Charge
SOH	State of Health
SOF	State of Function
UDDS	Urban Dynamometer Driving Schedule
UKF	Unscented Kalman Filter
UT	Transformada Unscented
US06	Highway Driving Schedule
VEB	Veículo Elétrico à Bateria
VECC	Veículo Elétrico Carregado a Célula de Combustível
VHE	Veículo Híbrido Elétrico
VE's	Veículos Elétricos
VRFB	Battery Flow Rodox Vanádio

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>11</b>
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO .....	12
1.2	JUSTIFICATIVA .....	14
1.3	OBJETIVO.....	16
1.3.1	<b>Objetivos Específicos</b> .....	<b>16</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>17</b>
2.1	TIPOS DE VEÍCULOS.....	22
2.1.1	<b>Veículos elétricos</b> .....	<b>23</b>
2.1.2	<b>Veículo híbrido elétrico plug-in</b> .....	<b>23</b>
2.1.3	<b>Veículo híbrido elétrico</b> .....	<b>24</b>
2.1.4	<b>Veículo elétrico carregado a célula de combustível</b> .....	<b>24</b>
2.2	TIPOS DE MODELOS DA BATERIA.....	24
2.2.1	<b>Bateria de chumbo-ácido</b> .....	<b>25</b>
2.2.2	<b>Bateria de íon-lítio</b> .....	<b>25</b>
2.2.3	<b>Baterias de sódio-enxofre</b> .....	<b>26</b>
2.2.4	<b>Baterias de fluxo</b> .....	<b>27</b>
2.3	MÉTODOS DE ESTIMAÇÃO .....	30
<b>3</b>	<b>REVISÃO NA LITERATURA</b> .....	<b>33</b>
3.1	MÉTODOS PARA ESTIMAÇÃO DE SOC.....	40
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA E RESULTADOS</b> .....	<b>45</b>
4.1	ANÁLISE .....	46
4.1.1	<b>Tempo de vida útil</b> .....	<b>47</b>
4.1.2	<b>Baterias de fluxo</b> .....	<b>48</b>
4.1.3	<b>Fluxo de medição de isolamento</b> .....	<b>51</b>
4.1.4	<b>Para medições mais seguras e eficientes</b> .....	<b>54</b>
4.2	DISCUSSÃO .....	56
4.2.1	<b>Aspectos de funcionamento das baterias</b> .....	<b>56</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>58</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>59</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A preocupação com a saúde dos residentes das metrópoles, segundo Esteves (2003), a necessidade urgente de diminuir as emissões de dióxido de carbono e o progresso tecnológico nos métodos de acumulação e conversão de energia elétrica em movimento têm impulsionado o interesse na propulsão elétrica para automóveis nos últimos anos.

Os carros elétricos, que eram comuns no começo do século XX, segundo Husain (2003) quase deixaram de existir na segunda década do mesmo século.

Alguns novos modelos surgiram isoladamente nas décadas de 1970 e 1980, contudo, sem sucesso no mercado.

Durante a década de 1990 e o começo do século XXI, as tecnologias de armazenamento de energia elétrica e sua subsequente conversão em movimento tiveram um desenvolvimento significativo e aprimoradas, viabilizando novamente o veículo elétrico como meio de transporte para os centros urbanos.

Assim se é feita uma revisão bibliográfica sobre os Métodos de Estimação de Estado de Carga, através desta pesquisa.

Visa também, abordar as características da geração de energia elétrica veicular, quais tipos de células de baterias são utilizadas atualmente, qual a sua vida útil, segurança e capacidade.

Além disso, como será feito o descarte, quais os tipos de incentivos e investimentos dentro da área e as perspectivas futuras no desenvolvimento em células de baterias. Quais tipos de matérias e suas aplicações em escala a longo, médio e curto prazo.

O Brasil pode passar a integrar o grupo de países que fabricam baterias para mobilidade elétrica, segmento liderado por China, Estados Unidos, Japão e Coréia do Sul. Pelo menos quatro iniciativas, envolvendo empresas nacionais em colaboração com estrangeiras, segundo a Associação Brasileira do Veículo Elétrico, estão em curso no país com essa finalidade. Na maioria delas, a tecnologia das baterias foi ou está sendo desenvolvida pelo parceiro internacional.

Uma das iniciativas está a cargo da Companhia de Desenvolvimento de Minas Gerais (Codemge), que assinou um acordo em 2018 com a empresa inglesa Oxis Energy para estabelecer a primeira fábrica em larga escala de células de bateria de lítio-enxofre (Li-S).

De acordo com a Oxis, essa tecnologia apresenta desempenho e segurança superiores às baterias de lítio-íon, a principal opção que abastece o mercado de carros elétricos.

A Moura, conhecida fabricante de baterias, a fabricante de sistemas de células de combustível, Electrocell, e um consórcio formado pela Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (CBMM) e os japoneses da Toshiba, também têm planos de entrar nesse mercado.

Inicialmente, como alvo da Oxis Brasil, uma iniciativa resultante da colaboração entre a Codemge e a Oxis Energy, será o seguimento de veículos.

O trabalho está estruturado de forma a abordar os diferentes aspectos dos Métodos de Estimação de Estado de Carga.

O Capítulo 2 apresenta uma fundamentação teórica, explorando tecnologias relacionadas a sistemas de Armazenamento de Energia (SAE), sistemas de produção de energia renovável e dispositivos eletrônicos portáteis e suas aplicações.

No Capítulo 3, são descritos e apresentada a revisão da literatura os materiais e métodos utilizados de estimação do Soc. O estado de carga (SoC) é um indicador utilizado para representar a quantidade de energia armazenada em uma bateria, sendo essencial calculá-lo com precisão para assegurar o funcionamento adequado do sistema de armazenamento e evitar danos internos e externos.

O Capítulo 4 discute os resultados obtidos, com ênfase na produtividade, na eficiência dos processos, sua metodologia de estimação, análise, tempo de vida útil e o fluxo das baterias, a durabilidade dos componentes e no impacto ambiental.

Essa análise busca validar o desempenho do protótipo e propor melhorias.

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

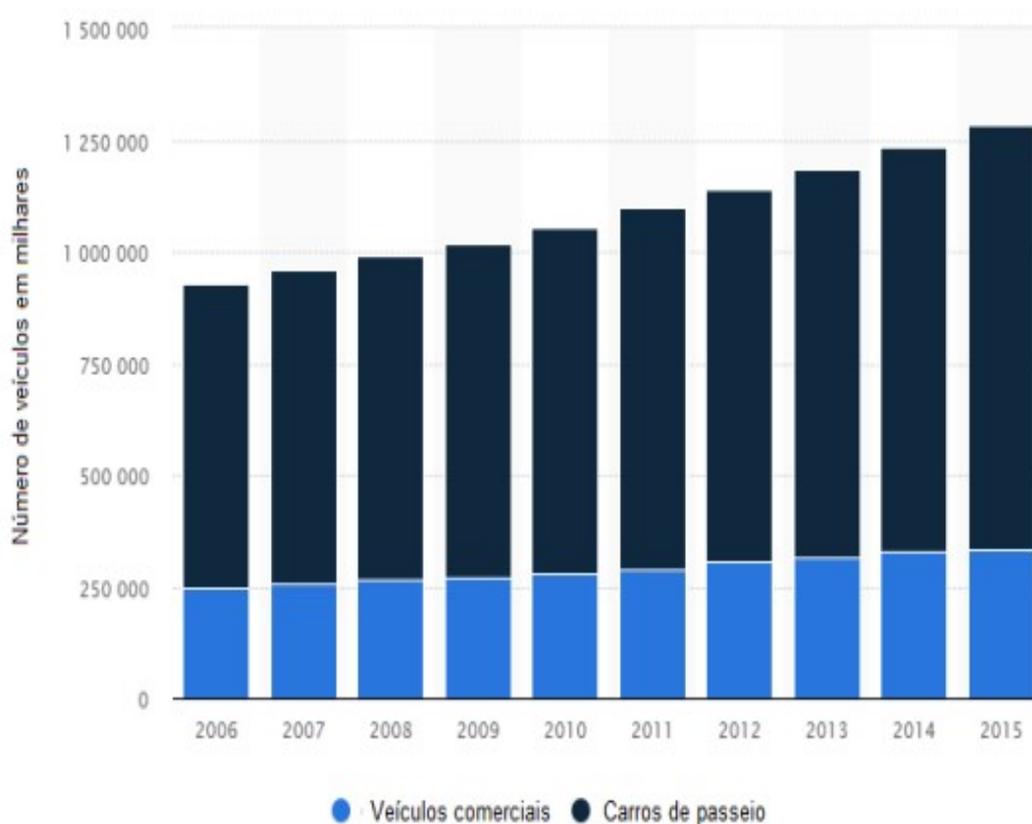
Com a globalização, a circulação de veículos tornou-se cada vez mais freqüente.. Em 2010, atingiu-se a marca de 1 bilhão de veículos ao redor do mundo, o que na época significava uma unidade para cada 7 pessoas. Isso evidencia a sua relevância econômica e de transporte.

Em 2015, esse número superou 1,28 bilhão, incluindo automóveis de passeio e comerciais, excluindo caminhões e veículos de grande porte (STATISTA, 2017).

O Gráfico 1 mostra a evolução da quantidade total de veículos no mundo de 2006 a 2015.

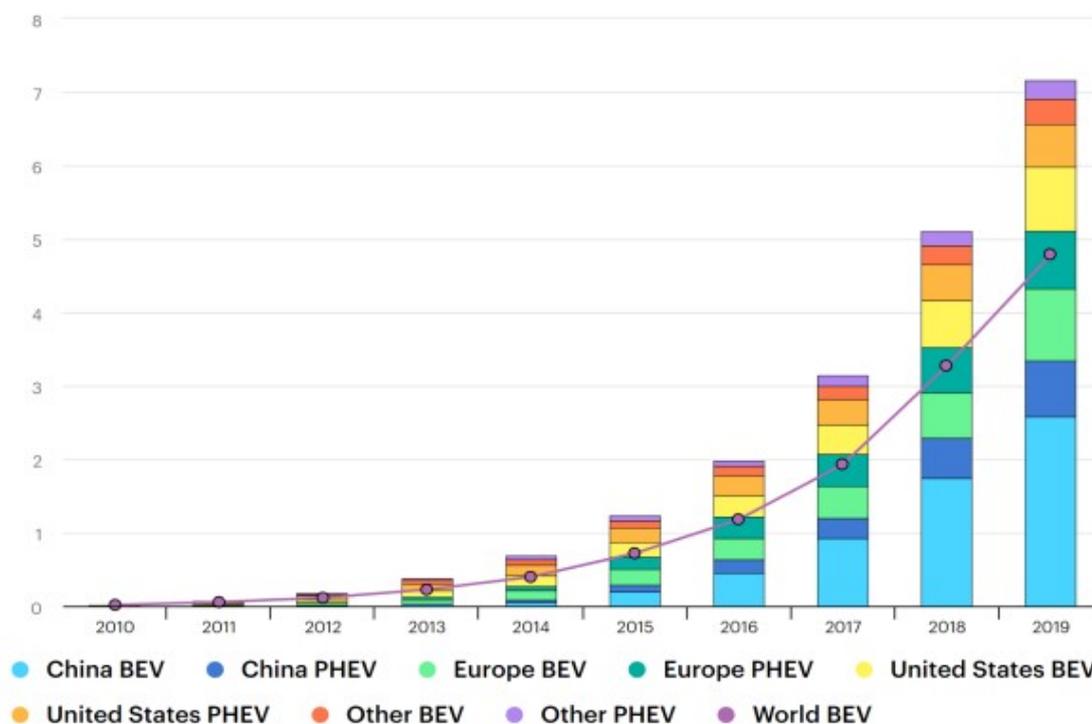
A quantidade de veículos elétricos no mundo tem expandido nos últimos anos, alcançando a marca de 7 milhões de veículos elétricos em 2019, sendo pouco menos de 4,8 milhões de carros elétricos (BEVs, do inglês *Battery Electric Vehicles*), representando 2,6% do total de vendas de veículos no ano de 2019, com um aumento de 6% em relação a 2018 (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2020).

Figura 1. Gráfico 1- Número total de veículos (2006-2015)



Fonte: Statista (2017) Nota: Traduzido pelo autor.

Figura 2. Gráfico 2 - Quantidade total de veículos elétricos no mundo (2010 - 2019)

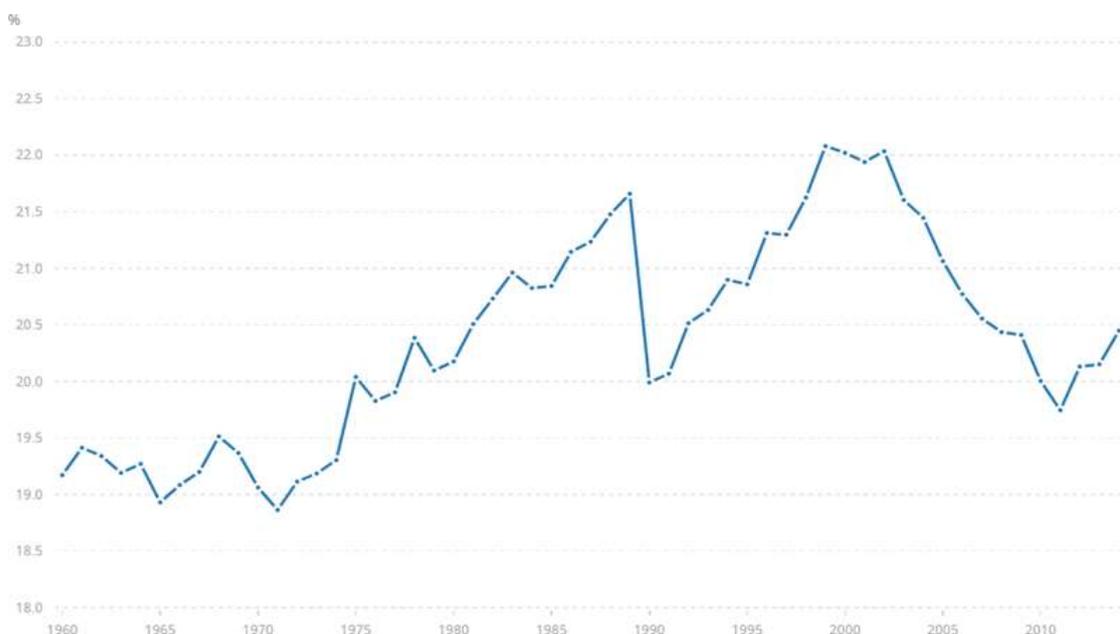


Fonte: International Energy Agency (2020). Nota: Phev (Plug-in Hybrid Electric Vehicle).

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Os meios de transporte corresponderam mundialmente a 20,45% das emissões de dióxido de carbono no ano de 2014, em escala nacional, essa porcentagem é mais do que o dobro, correspondendo a 44,75% dessas emissões no território do Brasil (THE WORLD BANK GROUP, 2014). Os números podem ser conferidos no Gráficos 3 e 4.

Figura 3. Gráfico 3 - Porcentagem de emissão de CO<sub>2</sub> no mundo (setor de transportes).



Fonte: The World Bank Group (2014).

Figura 4. Gráfico 4 - Porcentagem de emissão de CO<sub>2</sub> no Brasil (setor de transporte).



Fonte: The World Bank Group (2014).

O dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) é um subproduto gerado pela queima de combustíveis fósseis e é a principal fonte antropogênica causadora do efeito estufa, que afeta a camada de ozônio do planeta terra. Há também a questão da poluição do ar, causada pelos óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), principalmente o dióxido de

nitrogênio (NO<sub>2</sub>), que influencia na qualidade de vida das pessoas no mundo (UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2021b).

O setor de transportes é um dos grandes responsáveis pela emissão desses gases e o petróleo um recurso finito. Alternativas sustentáveis à utilização de combustíveis fósseis no setor de transporte fazem-se necessárias.

Os carros elétricos não liberam gases nocivos durante seu funcionamento. Ademais, o motor de combustão interna (ICE) é mais eficaz mecanicamente do que o sistema de tração elétrica. Os automóveis elétricos empregam de 59 a 62 % da energia elétrica proveniente da rede para produzir tração nas rodas, em contraste com os carros a gasolina convencionais, que transformam entre 17 e 21% da energia presente no combustível em propulsão (UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY, 2017).

Cerca de 23 países iniciaram a eliminação progressiva de veículos de ICE, com o objetivo de diminuir ou até eliminar as emissões de gases poluentes provenientes de veículos. Países como Alemanha e Islândia já têm leis aprovadas que proíbem o registro de veículos com ICE a partir de 2030, ou com políticas ainda mais agressivas, como na Noruega, que pretende vender apenas veículos elétricos a partir de 2025 (BURCH; GILCHRIST, 2018).

Por isso, durante esse estudo, foram analisadas essas questões sob diversos pontos, como por exemplo: a eficiência e maturidade das tecnologias de tração elétrica, tipos e formatos de baterias utilizados, conectores de carregamento, além das barreiras existentes para sua adoção em massa.

### 1.3 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é fazer um estudo bibliográfico sobre os Métodos de Estimação de Estado de Carga de baterias.

#### 1.3.1 Objetivos Específicos

- Estudar os Métodos de estimação de baterias de lítio
- Estudar a Modelagem das baterias de lítio
- Fazer estudo sobre o estado de carga (SoC) e o estado de Saúde (SoH) das baterias.
- Abordar as características da geração de energia elétrica veicular.

- Abordar os tipos de células de baterias utilizadas atualmente.
- Apresentar estudo sobre vida útil, segurança e capacidade das baterias.
- As perspectivas futuras no desenvolvimento em células de baterias, quais tipos de matérias e suas aplicações em escala a longo, médio e curto prazo.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esses sistemas têm a capacidade de aprimorar a performance operacional dos dispositivos, prolongando sua vida útil e, em maior medida, diminuindo o impacto climático através da eliminação do uso de combustíveis fósseis.

Os SAE têm a função de armazenar eletricidade em outras formas de energia, sendo a eletroquímica a mais utilizada.

Uma das aplicações mais comuns de SAE é baseada em baterias de íons de lítio, cuja relevância varia conforme a aplicação final.

Este tipo de bateria consiste em um cátodo (polo positivo) e um ânodo (polo negativo), envolvidos pelo eletrólito (composição que permite a troca de elétrons entre os polos) e separados por um separador para prevenir o curto-circuito internamente. Estes quatro componentes principais operam de maneira a garantir que a carga e a descarga da bateria aconteçam de maneira segura e eficaz (HANNAH et al., 2018).

Contudo, diferentes fatores podem colocar em risco o bom funcionamento da bateria. Dentre eles, destacam-se a temperatura de operação, a descarga excessiva e a sobrecarga. Adicionalmente, verifica-se uma queda drástica na durabilidade da bateria quando ela é submetida a temperaturas fora dos limites estabelecidos pelo fabricante; já com a descarga excessiva, ocorre degradação dos compostos químicos internos afetando diretamente o seu funcionamento.

A mesma situação se aplica à sobrecarga, resultando em compostos prejudiciais tanto para o funcionamento quanto para a segurança do sistema (BALAGOPAL; CHOW, 2015).

Embora a bateria seja um equipamento seguro e contribua para a diminuição dos impactos ambientais, é imprescindível que seja constantemente supervisionada e gerida por um usuário ou um sistema de supervisão automática, também chamado de Sistema de Gerenciamento de Bateria (do inglês, *Battery Management System - BMS*) (PURWADI et al., 2014).

O Sistema de Gerenciamento de Baterias (BMS) tem a função de evitar que a bateria descarregue abaixo de uma tensão pré-estabelecida (*cut-off voltage*) e impedir que ela receba carga contínua após estar completamente carregada. Ele regula o fluxo de energia através da bateria, garantindo uma durabilidade prolongada (CHEN et al., 2016).

Alguns parâmetros, também referidos como estados operacionais, são empregados para ilustrar o estado atual da bateria. Um dos mais relevantes é o Estado de Carga (do inglês, *State of Charge - SoC*), que expressa a capacidade atual da bateria em relação à sua capacidade máxima. No entanto, o SoC não é uma representação exata da capacidade máxima da bateria. Pode ser medido, apenas estimado com base nas medições de corrente, de tensão e de temperatura presentes no sistema. Outros parâmetros também estimados são o Estado de Saúde (do inglês, *State of Health – SoH*) e o Estado de Função (do inglês, *State of Function – SoF*) (JOKIĆ et al., 2018).

As variações entre o clima e o tempo sob as quais a bateria está submetida dificultam a estimação dos parâmetros usados para representá-la. Sendo assim, faz-se necessário construir um modelo da bateria capaz de englobar o seu comportamento dinâmico para que haja uma otimização nas estimações, melhorando o funcionamento do dispositivo ao qual ela está associada (HAASE et al., 2017).

Existem diferentes métodos utilizados na modelagem da bateria, cada qual com suas vantagens e peculiaridades. Porém, por causa do comportamento altamente não-linear do sistema em questão, são exigidos modelos com elevada complexidade matemática, visando precisão nas estimações dos parâmetros independentemente dos fatores estáticos e dinâmicos envolvidos no processo. Com isso, quanto maior a complexidade do modelo, maior a dificuldade de sua aplicação (BALASINGAM; PATTIPATI, 2018).

Para realizar a estimação dos parâmetros como SoC e SoH, além de um modelo de bateria preciso, é necessário aplicar os dados, obtidos a partir das medições, em algoritmos robustos e confiáveis.

Dentre eles, o Filtro de Kalman se destaca como uma solução poderosa e eficiente. Em 1960, Rudolf Emil Kalman sugeriu um método fortemente baseado na teoria de probabilidade, mas que hoje, em aplicações digitais, pode ser implementado de maneira simples e eficiente (AUGER et al., 2013). O método é

amplamente empregado em diferentes áreas com destaque para controle de sistemas dinâmicos, comunicações e estimação de desempenho de baterias.

O Filtro de Kalman utiliza um conjunto de equações que podem ser aplicadas repetidamente durante a operação de um sistema, permitindo estimar os estados presentes com base nos impactos das variáveis do instante anterior. Essa abordagem busca minimizar o erro quadrático médio.

O filtro utiliza medições de grandezas físicas, como corrente e tensão, para estimar parâmetros que não podem ser medidos diretamente, como o Estado de Carga (SoC). Leva em consideração os efeitos de ruídos tanto de processo quanto de medição (PLETT, 2004).

O funcionamento do filtro é dividido em duas etapas principais: predição e atualização.

Na etapa de predição, os estados do sistema são estimados com base nos valores do instante anterior, determinando os valores previstos para o estado, a saída do sistema e as covariâncias dos erros associados.

Já na etapa de atualização, os valores preditos e as covariâncias são ajustados utilizando as medições reais do sistema físico e o ganho de Kalman. O resultado dessa correção é então utilizado como base para a próxima etapa de predição (PLETT, 2004).

Existem diferentes versões do Filtro de Kalman que podem ser utilizadas na estimativa de parâmetros. O Filtro de Kalman Padrão (SKF) é amplamente aplicado para estimar estados em sistemas lineares sujeitos a ruídos de processo e de medição.

As baterias apresentam comportamento não linear em sua operação, influenciado por fatores internos e externos, como a autodescarga e a temperatura ambiente (LIU et al., 2017). Para mitigar os efeitos desses fatores e reduzir o impacto dos ruídos na estimativa de estados, os filtros de Kalman oferecem uma solução eficaz para a análise de desempenho de baterias.

A evolução das baterias para veículos elétricos, com foco na sustentabilidade, destaca as baterias de LFP como uma opção viável, já que elas não contêm cobalto, um material frequentemente associado a práticas de mineração prejudiciais ao meio ambiente.

A adoção de baterias LFP em veículos elétricos é um marco importante para a mobilidade elétrica, com potencial para redefinir a percepção desses veículos. Essas

baterias oferecem maior segurança, ajudando a reduzir o risco de incêndios, uma preocupação comum em baterias de íons de lítio. Sua elevada durabilidade também contribui para a redução dos custos totais de propriedade, tornando-as mais atrativas para os consumidores. Além disso, as baterias LFP apresentam menor impacto ambiental, sendo mais sustentáveis devido à reduzida dependência de cobalto e outros materiais escassos, o que reforça os benefícios ambientais dos veículos elétricos.

Ao facilitar a democratização da mobilidade elétrica, essas baterias podem tornar os veículos elétricos mais acessíveis, promovendo uma adoção mais ampla e acelerando a transição dos veículos movidos a combustíveis fósseis.

Ao modelar baterias de íons de lítio e comparar métodos de estimativa do estado de carga (SoC) para veículos elétricos, é crucial considerar as limitações e desafios associados a essa química.

As baterias de íons de lítio são sensíveis a sobrecargas contínuas, descargas excessivas e temperaturas elevadas, o que pode comprometer sua segurança e desempenho. Além disso, os sistemas de alta tensão representam riscos de choque elétrico e térmico (WEICKERT, 2013).

O gerenciamento eficiente das baterias é influenciado por fatores como a operação reversa, o tempo de uso e a profundidade de descarga (DoD), especialmente em aplicações com alta frequência de ciclagem (SMITH et al., 2012).

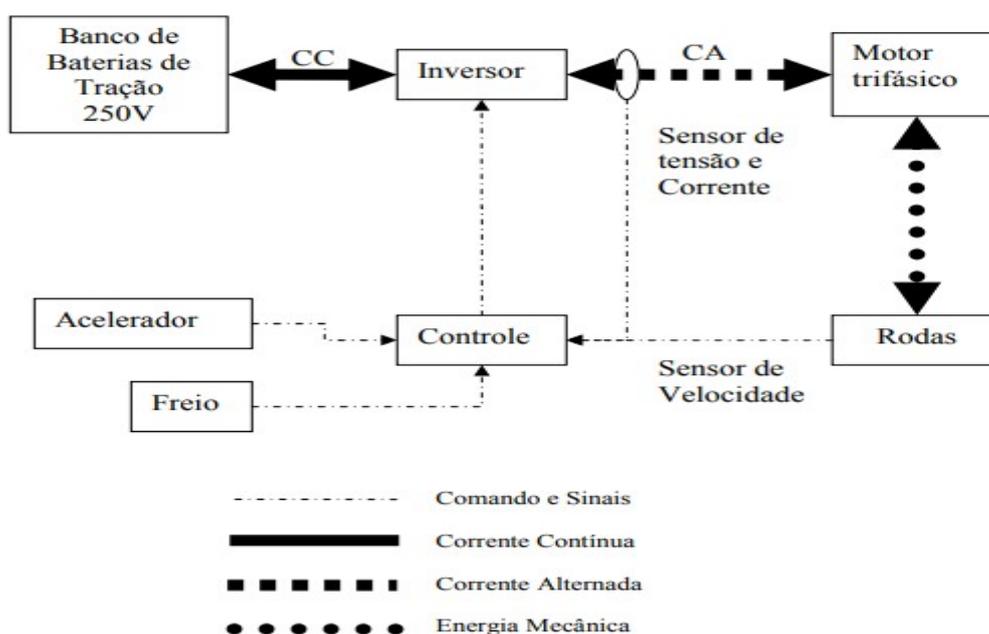
Esses desafios têm impulsionado o desenvolvimento do mercado de eletrificação de veículos, bem como a criação de software e hardware para gerenciar baterias de maneira eficaz.

Essa evolução atende às metas ambientais estabelecidas no Acordo de Paris, ao mesmo tempo em que promove o uso de veículos 100% elétricos, que não emitem CO<sub>2</sub> e contribuem para a mitigação das mudanças climáticas causadas por gases de efeito estufa.

Na operação de baterias de íons de lítio, enquanto alguns parâmetros podem ser medidos diretamente por sensores, outros, como o estado de carga (SoC) e o estado de saúde (SoH), precisam ser estimados por algoritmos (SU et al., 2021).

Conforme descrito por Barreto (1986), a operação de veículos elétricos, sejam eles baseados em motores CC ou CA, pode ser representada por diagramas de blocos, que auxiliam no entendimento e na aplicação de métodos avançados para otimizar o desempenho do sistema.

Figura 5. Diagrama de Blocos de um Veículo Elétrico



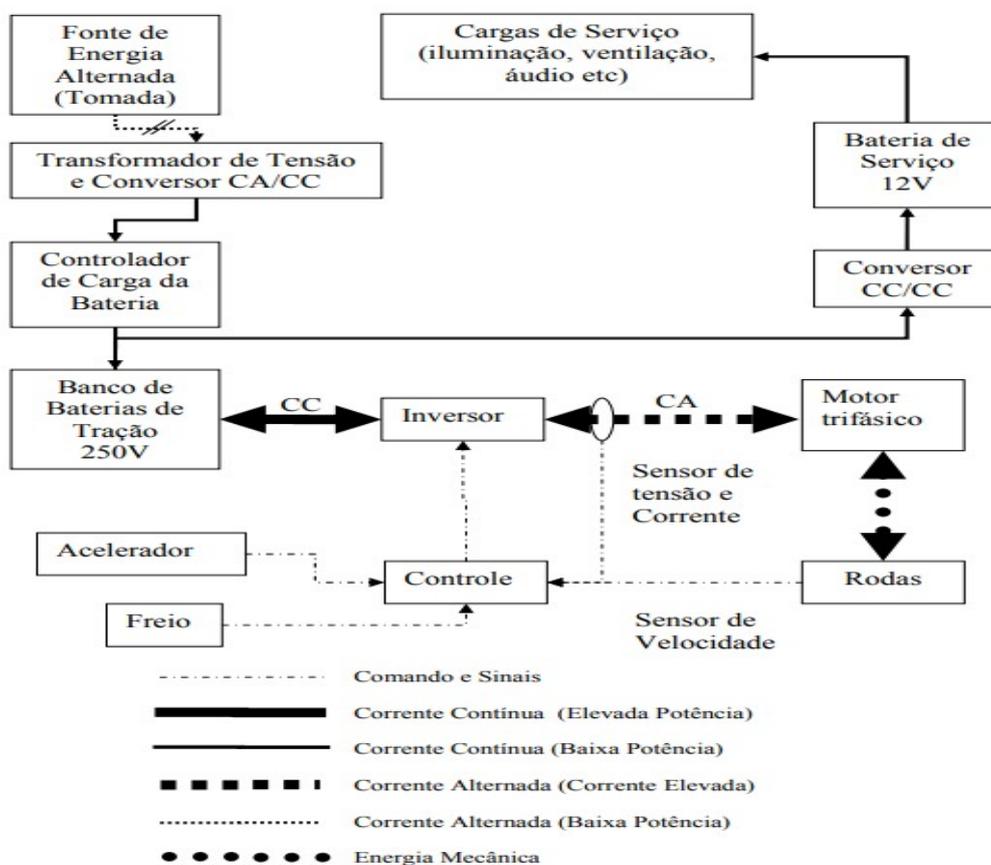
Fonte: Barreto (1986).

A presença de setas duplas entre o banco de baterias, o inversor, o motor trifásico e as rodas indicam que o fluxo de energia é bidirecional. Isso reflete a capacidade do sistema de recuperar parte da energia cinética do veículo durante a frenagem, armazenando-a no banco de baterias de tração.

Essa funcionalidade representa a principal modificação em relação ao diagrama proposto por Barreto (1986). Com base nesse diagrama, é possível ampliar a representação para incluir as interfaces presentes nos veículos modernos. Entre elas, destacam-se o sistema de carregamento do banco de baterias de tração e da bateria de serviço (12V), que armazena e fornece energia para o sistema elétrico convencional do veículo.

Esse sistema alimenta componentes como iluminação, ventilação, arrefecimento, áudio, alarme, entre outros, conforme ilustrado na Figura 6.

.Figura 6. Diagrama de Blocos de um veículo elétrico acrescido do conversor CA/CC e cargas de serviço



Fonte: Barreto (1986).

## 2.1 TIPOS DE VEÍCULOS

Atualmente, os veículos disponíveis no mercado abrangem diversas categorias, desde os tradicionais até os elétricos e híbridos, cada qual com características específicas, vantagens e desvantagens. É essencial compreender os tipos mais relevantes e amplamente utilizados na sociedade contemporânea.

Os veículos convencionais são equipados com motores de combustão interna (MCI) e sistemas de transmissão projetados para maximizar a eficiência do motor em diferentes velocidades de operação.

Os MCIs possuem um ou mais cilindros que atuam como câmaras de combustão, onde o ar e o combustível são comprimidos e queimados para gerar energia (FERRAZ; DONHA, 2004, p. 2). Segundo Videira (1997), esses motores

podem operar com combustíveis líquidos voláteis, como gasolina, álcool, diesel, querosene, benzol e óleos pesados, ou com gases como butano, propano e metano.

Os motores de combustão interna têm uma ampla gama de aplicações. Motores a gasolina são reconhecidos por sua leveza em relação à potência gerada, permitindo acelerações rápidas e desempenho eficiente em altas velocidades. Já os motores a diesel são amplamente utilizados na propulsão de veículos e máquinas pesadas, como navios, locomotivas, tratores, caminhões, ônibus, automóveis, lanchas e outras embarcações. Essa versatilidade os torna indispensáveis em diversas áreas de transporte e logística.

### **2.1.1 Veículos elétricos**

Os veículos elétricos, também conhecidos como Electric Vehicles (EVs), utilizam um ou mais motores elétricos para propulsão, seja de forma parcial ou integral.

A eletricidade, que atua como combustível desses veículos, pode ser obtida de diferentes maneiras (DELGADO et al., 2017, p. 15). Uma dessas formas é a conexão direta a uma fonte externa de energia elétrica, como por meio de plugs ou cabos aéreos.

Entre os tipos de veículos elétricos, destaca-se o Veículo Elétrico a Bateria (VEB), que é movido exclusivamente por baterias recarregáveis, alimentadas a partir de tomadas elétricas.

### **2.1.2 Veículo híbrido elétrico plug-in**

O Veículo Híbrido Plug-in (VHEP) é caracterizado pelo método de recarga de suas baterias, independentemente do sistema que aciona suas rodas. Assim, qualquer um dos três tipos de veículos híbridos pode ser equipado com essa tecnologia.

A recarga do plug-in é realizada conectando um cabo de energia ao veículo, seja em uma tomada doméstica comum ou em eletropostos, utilizando cabos específicos para essa finalidade.

No Brasil, os modelos de veículos híbridos plug-in disponíveis no mercado são limitados. Entre eles, destacam-se o BMW i8, o Porsche Cayenne S-Hybrid, o Porsche Panamera E-Hybrid e o Volvo XC90 T8 Hybrid (ANGELITO, 2018).

### **2.1.3 Veículo híbrido elétrico**

Os veículos híbridos podem ser classificados em três tipos principais: híbrido paralelo, híbrido série e híbrido misto. Nos híbridos paralelos, tanto o motor elétrico quanto o motor a combustão geram força para mover as rodas, operando simultaneamente, ou seja, em paralelo. Geralmente, o motor elétrico está conectado ao eixo dianteiro, enquanto o motor a combustão aciona o eixo traseiro. No entanto, também é possível que ambos estejam alinhados no mesmo eixo, embora essa configuração aumente os custos do sistema devido à necessidade de controladores eletrônicos mais sofisticados. Exemplos de veículos híbridos paralelos incluem o Honda Insight e o BMW i8, ambos com tecnologia plug-in.

### **2.1.4 Veículo elétrico carregado a célula de combustível**

Assim como as pilhas e baterias, as células de combustível são dispositivos que convertem energia química em eletricidade.

A principal diferença é que, nas células de combustível, o material ativo não é parte integrante do dispositivo, sendo continuamente fornecido por uma fonte externa.

As células mais comuns utilizam hidrogênio como fonte de energia. No processo, o ânodo promove a oxidação do hidrogênio, enquanto o cátodo facilita a redução do oxigênio, que atua como agente oxidante. Os íons gerados nos eletrodos se deslocam pelo eletrólito, enquanto os elétrons percorrem o circuito externo. O combustível e o oxidante não são diretamente combinados, evitando a combustão química, que resultaria em calor em vez de eletricidade. Isso permite que a maior parte da energia química seja convertida em energia elétrica, com mínimas perdas térmicas, diferentemente dos motores de combustão.

Além de mais eficientes, as células de combustível que utilizam hidrogênio são ambientalmente amigáveis, pois o único subproduto gerado é a água, não causando poluição. (MOTTA; JR.; PINTO, 2010).

## **2.2 TIPOS DE MODELOS DA BATERIA**

Existem vários tipos de baterias, que se distinguem pelo material utilizado na fabricação dos eletrodos e do eletrólito. A seguir, serão descritos brevemente os principais tipos de baterias adequadas para sistemas de energia, destacando as características específicas de cada uma. Informações detalhadas sobre os

elementos químicos envolvidos no processo, que são amplamente discutidos, foram resumidas para apresentar cada tecnologia de forma concisa.

### **2.2.1 Bateria de chumbo-ácido**

Há várias décadas, a bateria de Chumbo-Ácido tem sido amplamente utilizada, especialmente na indústria automobilística, consolidando-se como uma tecnologia bem estabelecida no mercado.

Neste modelo, o ânodo é composto por Chumbo metálico (Pb), o cátodo por Dióxido de Chumbo (PbO<sub>2</sub>) e o eletrólito é formado por ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>).

O principal benefício dessa bateria é seu custo de instalação, que tende a ser inferior ao de alternativas concorrentes, devido à sua maior maturidade tecnológica.

No entanto, ela apresenta várias desvantagens quando utilizada em sistemas de energia, como sua curta vida útil em ciclos de carga e descarga, baixa capacidade de armazenamento e eficiência inferior em comparação com outras tecnologias.

### **2.2.2 Bateria de íon-lítio**

Ao longo dos últimos 38 anos, as baterias de Íon-Lítio se tornaram amplamente utilizadas na indústria eletroeletrônica, impulsionando rapidamente o avanço dessa tecnologia. Esse progresso foi impulsionado principalmente pela crescente demanda por aprimoramento, exigida pelo mercado de dispositivos móveis.

O processo de reação eletroquímica nas células é baseado no fenômeno de intercalação iônica, no qual um íon, no caso o íon de Lítio, se desprende da estrutura do ânodo e se insere na estrutura do material que compõe o cátodo.

Nas primeiras baterias de Íon-Lítio, o ânodo era composto por grafite, o cátodo por óxido de lítio cobalto, e o eletrólito era uma mistura de solventes orgânicos e sais de lítio.

Diversas composições alternativas para os materiais do ânodo, cátodo e eletrólito têm sido testadas com o objetivo de melhorar o desempenho das células de Íon-Lítio. Isso resultou em uma série de variações da tecnologia original, como as células LMO (Óxido de Lítio Manganês), NMC (Óxido de Lítio Níquel Manganês Cobalto), NCA (Óxido de Lítio Níquel Cobalto Alumínio), LFP (Fosfato de Lítio Ferro) e LTO (Titanato de Lítio).

De maneira geral, as principais vantagens da tecnologia de Íon-Lítio são sua alta eficiência, freqüentemente superior a 90%, sua longa vida útil em ciclos de carga e descarga, elevada densidade energética, ausência de autodescargas e a inexistência do efeito memória.

As desvantagens dessa tecnologia estão principalmente relacionadas ao risco de explosão em casos de sobrecarga e superaquecimento, devido à presença de materiais orgânicos, o que exige investimentos em sistemas de monitoramento e segurança.

Outra desvantagem é o impacto da profundidade das descargas na vida útil do equipamento, o que torna necessário adotar estratégias operacionais que restrinjam o uso da capacidade total de armazenamento, geralmente limitando-a a 80%, a fim de garantir maior durabilidade do sistema

O alto custo da tecnologia de Íon-Lítio ainda é um dos principais obstáculos para sua ampla adoção comercial em sistemas de potência, especialmente em aplicações que exigem grandes capacidades de armazenamento de energia. Segundo estimativas da IRENA (Agência Internacional de Energia Renovável), o custo de implementação da tecnologia de Íon-Lítio deverá reduzir até 61% até 2030.

### **2.2.3 Baterias de sódio-enxofre**

As baterias de Sódio-Enxofre (NaS) utilizam um eletrólito sólido (beta-alumina) e eletrodos líquidos. O ânodo é composto por Sódio (Na) e o cátodo por Enxofre (S). Para que a reação eletroquímica ocorra, a temperatura da bateria deve ser mantida entre 300 e 400°C.

Essa tecnologia se destaca pela alta densidade energética, permitindo maior armazenamento de energia em dispositivos mais compactos, além de sua capacidade de realizar descargas contínuas por períodos prolongados, o que a torna mais adequada que a tecnologia de Íon-Lítio para aplicações de gestão de energia em sistemas de potência.

No entanto, o aspecto econômico dificulta sua aplicação comercial, pois, apesar do baixo custo inicial, os elevados custos operacionais relacionados à manutenção de um sistema capaz de manter a temperatura da bateria dentro da faixa necessária tornam a tecnologia pouco viável.

#### **2.2.4 Baterias de fluxo**

Esta tecnologia baseia-se exclusivamente no uso de materiais líquidos. Os dois compostos envolvidos na redução e oxidação são dissolvidos no eletrólito e armazenados em tanques separados.

A reação eletroquímica ocorre quando os dois eletrólitos são bombeados para o interior da célula, onde acontece a reação de oxirredução. Embora os eletrólitos nunca se misturem, são mantidos separados por uma membrana que permite apenas a transferência de íons entre os dois meios.

Dentro das baterias de fluxo, destacam-se as baterias de Redox de Vanádio (VRFB), cujas principais características incluem uma longa vida útil, superior a 12.000 ciclos de carga e descarga, e a capacidade de realizar descargas profundas sem impactar a durabilidade do sistema.

Entretanto, suas desvantagens incluem o risco de vazamento do líquido e a necessidade de sistemas de monitoração, bombeamento e gerenciamento do fluxo, o que acarreta custos elevados de manutenção e operação. Além disso, o alto custo do principal componente do sistema, o Vanádio, torna sua aplicação comercial menos competitiva em relação a outras tecnologias.

A energia específica, ou capacidade total da bateria, é calculada pela multiplicação da tensão pela capacidade específica total.

Para proteger a bateria, os fabricantes de carros elétricos limitam a capacidade disponível para uso, ou seja, a capacidade anunciada ao consumidor refere-se à capacidade útil da bateria.

As baterias têm sido e continuarão a ser a principal fonte de energia para veículos elétricos por um longo período.

Ao longo do último século, diversas tecnologias foram desenvolvidas e adotadas, em um processo constante de aprimoramento.

A tabela 1 apresenta informações sobre cada uma dessas tecnologias até o ano de 2010, detalhando o tipo de bateria, seus componentes básicos e suas principais vantagens e desvantagens.

Tabela 1. Comparativo de tecnologias de baterias até o ano de 2010.

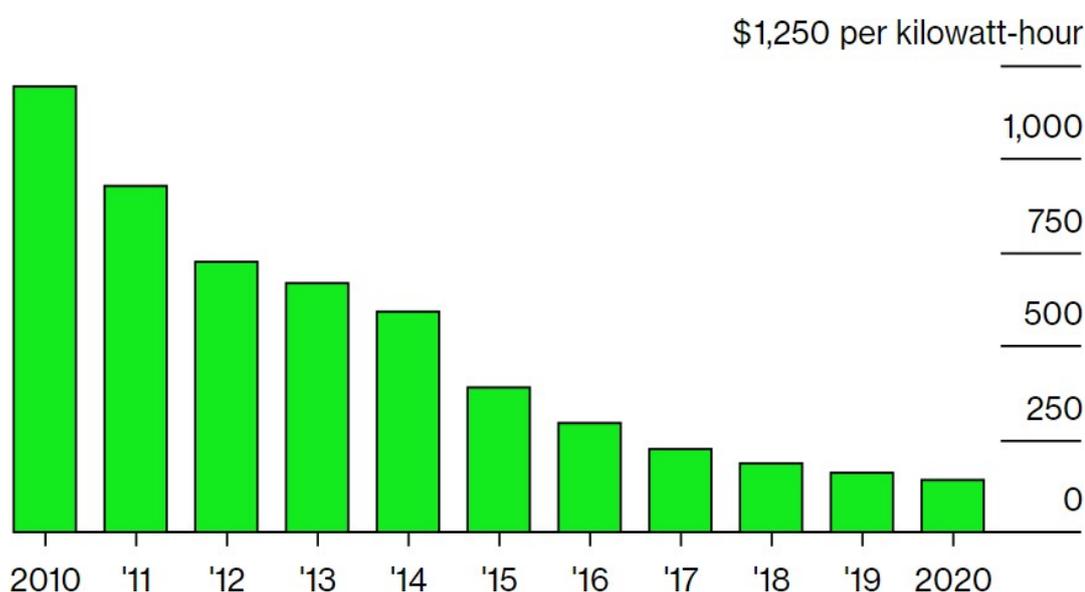
Tecnologia e componentes básicos	Vantagens	Desvantagens
<p>Ácido-Chumbo; Cátodo: Óxido de chumbo; Ânodo: Chumbo esponjoso; Eletrólito: Ácido sulfúrico diluído</p>	<p>Alta capacidade de produção global; Comparativamente baixa em custo; Tecnologia mais madura, usada a mais de 100 anos</p>	<p>Não pode ser descarregada abaixo de 20% da capacidade; Baixa densidade de energia e de potência; Tem baixo ciclo de vida se operada com baixa carga; Pode precisar de manutenção.</p>
<p>Níquel-hidreto metálico (NiMH); Cátodo: Hidróxido de Níquel; Ânodo: Liga de Níquel; Eletrólito: Solução alcalina</p>	<p>Dobro da capacidade específica normalizado em massa, Ah/kg) em relação a de ácido-chumbo; Segura para o meio ambiente; Reciclável; Operação segura em alta tensão; Ciclo de vida maior em relação a de ácido chumbo; Larga faixa de temperatura de operação; Segura para sobre carga e descargas.</p>	<p>Se descarregada rapidamente, tem vida útil reduzida para entre 200 e 300 ciclos; Sofre de efeito de memória, tem sua potência reduzida com o tempo.</p>
<p>Níquel-Zinco (Ni-Zn); Cátodo: Oxi-hidróxido de Níquel; Ânodo: Zinco; Eletrólito: Solução alcalina</p>	<p>Alta densidade de energia; Alta densidade de potência; Utiliza materiais de baixo custo; Pode operar mesmo em baixa capacidade; Segura para o meio ambiente; Faixa de temperatura de 10°C até 50°C;</p>	<p>Rápido acúmulo de detritos em sua estrutura, que trazem inseguranças quanto ao uso automotivo.</p>
<p>Níquel-Cádmio (Ni-Cd); Cátodo: Hidróxido de Níquel. Ânodo: Cádmio. Eletrólito: Solução alcalina</p>	<p>Longa vida útil; Pode ser totalmente descarregada sem ser danificada; Reciclável.</p>	<p>Caso não seja corretamente descartado, o Cádmio pode causar poluição ao meio ambiente; Elevado custo.</p>
<p>Lítio-íon (Li-ion); Cátodo: Mistura de óxidos de Lítio, Níquel, Manganês e Cobalto. Ânodo: Grafite. Eletrólito: Gel polímero (Li-Po) ou sal de Lítio, em solvente orgânico (Li-ion)</p>	<p>Alta densidade de energia, o dobro em relação à de Níquel-hidreto metálico; Alta densidade de potência; Elevada densidade de energia; Boa performance em elevadas temperaturas; Reciclável; Baixo efeito de memória; Vida útil longa, aproximadamente 1000 ciclos; As versões mais novas, com gel polímero, são mais seguras contra deformações.</p>	<p>Elevado custo; Tempo de recarga ainda longo, porém, melhor que os demais tipos.</p>

Fonte: Khaligh e Li (2010). Nota: Traduzido e adaptado pelo autor.

A Figura 7 mostra que a bateria de lítio-íon oferece muito mais vantagens do que desvantagens, com seu alto custo sendo um dos principais pontos negativos na época.

No entanto, de acordo com a Bloomberg, o preço por quilowatt-hora (kWh), ou o valor da energia específica, dessa bateria caiu drasticamente nos últimos anos, passando de 1.191 dólares em 2010 para 137 dólares em 2020 por kWh, uma redução de quase 90%.

Figura 7. Valor por Kwh, em dólar, das baterias de lítio-íon.



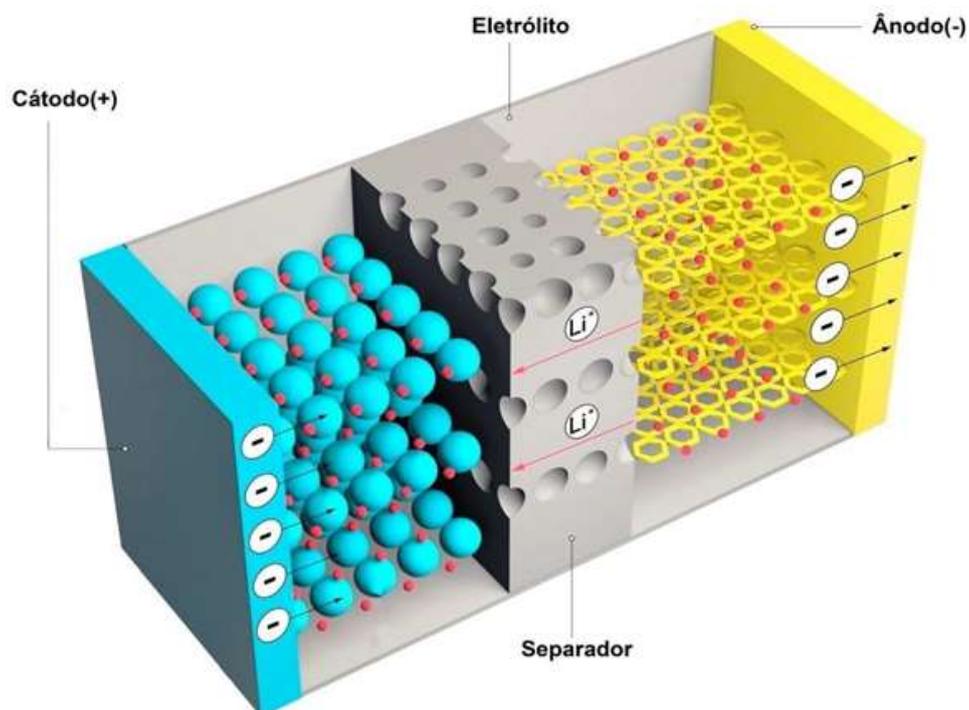
Fonte: Bloomberg (2020).

Segundo Rosolem et al. (2012), a célula de bateria, ou simplesmente bateria, é um dispositivo responsável por armazenar energia elétrica em compostos eletroquimicamente ativos (energia química).

Ela é composta por quatro elementos principais: cátodo (polo positivo), ânodo (polo negativo), eletrólito e separador, conforme ilustrado na Figura 8.

Quando várias células de bateria são conectadas em série e paralelo, formam um banco de baterias, sendo comum o uso do termo "bateria" para se referir a esse conjunto.

Figura 8. Principais elementos de uma célula de bateria.



Fonte: Sta-Eletronica (2021).

As células de bateria são especificadas em termos de tensão (medida em Volt, ou V) e capacidade específica, que representa a quantidade total de corrente que a célula pode fornecer por unidade de tempo até atingir sua tensão final de descarga. Essa capacidade é expressa na unidade ampère-hora (Ah).

Quando as células de bateria são conectadas em série, suas tensões são somadas, resultando em uma tensão total de série, enquanto a capacidade específica permanece a mesma. Já quando as células são conectadas em paralelo, suas capacidades específicas são somadas, mantendo a mesma tensão. Assim, segundo Li (2010). O banco de baterias fornece uma tensão total e uma capacidade específica total, dependendo da configuração das células.

### 2.3 MÉTODOS DE ESTIMAÇÃO

O Filtro de Kalman engloba diversas técnicas amplamente empregadas para estimar parâmetros que variam ao longo do tempo e que não podem ser obtidos diretamente em sistemas dinâmicos. Sua aplicação envolve o uso de equações

recursivas durante a operação do sistema, permitindo a estimativa de parâmetros atuais com base em valores passados e nos dados de entrada e saída do sistema.

Essa abordagem recursiva oferece maior tolerância a perturbações externas, pois realiza a autocorreção constante de erros ao longo da operação do sistema (CHEN et al., 2012).

Para que o Filtro de Kalman seja aplicado, o modelo da bateria deve ser representado no formato de espaço de estados em tempo discreto.

Assim, após a modelagem do sistema, é necessário determinar as equações de processo e de saída que descrevem seu comportamento.

Os estados do sistema considerados serão o SoC (*State of Charge*) e as tensões nos ramos RC,  $V_1$  e  $V_2$ , presentes no modelo elétrico.

Portanto, é necessário estabelecer as equações que descrevem o comportamento desses estados do sistema em tempo contínuo, para posterior discretização.

O estado de carga da bateria, o SoC, é o estado mais relevante do modelo e normalmente é determinado pelo método de Coulomb Counting.

A equação (1) que define o SoC da bateria em tempo contínuo é dada pela integração da corrente de entrada  $I$  do sistema ao longo do tempo, sendo  $SoC(t_1)$  o estado de carga da bateria em um instante inicial;  $C_n$  é a capacidade da bateria, que varia de acordo com a temperatura do teste e  $n$  é a quantidade de células.

$$SoC(t_2) = Soc(t_1) + \frac{n}{c_n} \int_{t_1}^{t_2} I(t) dt \quad (1)$$

$SoC(t)$ : Estado da carga no momento;

$n$ : Número de células ou um fator de escala;

$c_n$ : Capacidade normal da bateria;

$i_t$ : Corrente em função do tempo,

$\int_{t_1}^{t_2} I(t) dt$ : Integral do intervalo de  $t_1$  a  $t_2$ .

O método de Coulomb Counting exige medições precisas de corrente e uma boa inicialização do estado para reduzir os impactos de erros durante o processo de estimação. Por essa razão, esse método será combinado com um filtro de Kalman, reconhecido por sua capacidade de autocorriger o erro de covariância durante a operação do sistema.

Dessa forma, as equações (2) e (3) devem ser discretizadas de acordo com a expressão, com  $t_1 = k\Delta t$  e  $t_2 = (k + 1)\Delta t$ ,  $\Delta t$  sendo o período de amostragem.

A equação que define SoC da bateria, em tempo discreto, está expressa em:

$$SoC((k + 1)\Delta t) = Soc(k\Delta t) + \frac{n\Delta t}{C_n} I(k\Delta t) \quad (2)$$

$$SoC[k + 1] = Soc[k] + \frac{n\Delta t}{C_n} I[k] \quad (3)$$

$SoC$ : Estado de carga;

$k$ : Índice do passo de tempo discreto;

$\Delta t$ : Duração do intervalo de tempo;

$n$ : Número de células ou um fator de escala;

$c_n$ : Capacidade nominal da bateria,

$I$ : Corrente na etapa de tempo discreta.

As tensões nos ramos RC também são tratadas como estados do sistema, sendo necessário definir as expressões que descrevem seus comportamentos.

Assim, com base no modelo elétrico, nas leis de Kirchhoff e nas características transitórias do sistema, a tensão de saída  $Y$  e a corrente  $I$  que circula por ele podem ser expressas, em tempo contínuo, pelas equações (4) e (5).

$$Y = V_{oc} - V_1 - V_2 - R_{int}I \quad (4)$$

$$I = \frac{V_1}{R_1} + C_1 \frac{dV_1}{dt} = \frac{V_2}{R_2} + C_2 \frac{dV_2}{dt} \quad (5)$$

$Y$ : é a tensão de saída;

$V_{oc}$ : a tensão de circuito aberto;

$V_1$  e  $V_2$ : Tensões em pontos específicos do circuito;

$R_{int}$ : é a resistência interna do circuito;

$I$ : é a corrente;

$V_1$  e  $V_2$ : São as tensões nos resistores  $R_1$  e  $R_2$ , respectivamente;

$C_1$   $C_2$ : São as capacitâncias;

$\frac{dV_1}{dt}$  e  $\frac{dV_2}{dt}$ : são as derivadas de tempo das tensões nos capacitores;

Portanto, as tensões sobre os ramos RC podem ser expressas na forma de equações (6 e 7) diferenciais como apresentado (TOPAN et al., 2016).

$$\frac{dV_1}{dt} = -\frac{V_1}{R_1C_1} + \frac{I}{C_1} \quad (6)$$

$$\frac{dV_2}{dt} = -\frac{V_2}{R_2C_2} + \frac{I}{C_2} \quad (7)$$

Onde:

$\frac{dV_1}{dt}$  e  $\frac{dV_2}{dt}$ : Representam a taxa de variação da tensão  $V_1$  e  $V_2$  ao longo do tempo.

$\frac{V_1}{R_1C_1}$  e  $\frac{V_2}{R_2C_2}$ : Mostram a taxa de decaimento da tensão devido resistência e capacitância do circuito. Este termo indica que a tensão cai exponencialmente ao longo do tempo.

$\frac{I}{C_1}$  e  $\frac{I}{C_2}$ : Representam a contribuição da corrente  $I$  aplicada no circuito para o aumento da tensão.

### 3 REVISÃO NA LITERATURA

Nos últimos anos, tem-se observado um avanço significativo no mercado de veículos elétricos (EV), com várias marcas tradicionais do setor automotivo já oferecendo seus modelos elétricos para comercialização. Na Figura 9, são apresentados alguns dos veículos que estão disponíveis no mercado brasileiro, além de outros que podem ser importados.

Na Figura 9, é possível observar diversas características de cada veículo, como preço, garantia do conjunto de baterias, tempo de carregamento e autonomia.

Além disso, nota-se que todos os veículos utilizam baterias de íons de lítio, devido a suas vantagens como maior tensão, baixa auto descarga, longa vida útil e alta densidade de potência em comparação com outros tipos de baterias utilizadas em veículos elétricos, como as de chumbo-ácido (BERECIBAR et al., 2016; HANNAN et al., 2017; RAHMAN; ANWAR; IZADIAN, 2016; HAN et al., 2014; HU, 2011; HU et al., 2009; FARMANN et al., 2015; CHEN et al., 2013b).

As informações sobre o tempo de carregamento foram obtidas diretamente dos manuais dos fabricantes, consultados em março de 2019. Observa-se que o tempo de carregamento depende da capacidade da bateria, do tipo de carregador utilizado e da tensão aplicada. No entanto, não há uma padronização nas potências dos carregadores e nas tensões utilizadas nos manuais consultados, o que dificulta a comparação da eficácia dos sistemas de carregamento desenvolvidos pelas montadoras.

Figura 9 – Alguns dos veículos elétricos comercializados no Brasil.

Veículo	Valor [R\$]	Autonomia	Tempo de carregamento (0 – 100%)	Capacidade da Bateria	Garantia da Bateria	Tipo da Bateria
 Renault Zoe	150 mil	300 km	2h40min 22 kW	41 KWh	5 anos	Íons de lítio
 Chevrolet Bolt EV	175 mil	383 km* 520 km**	9h30 240 V	60 KWh	8 anos ou 160 mil km	Íons de lítio
 Nissan Leaf	178,4 mil	341 km* 389 km**	40 min 50 kW	40 KWh	8 anos ou 160 mil km	Íons de lítio
 Hyundai IONIQ Elétrico	140 mil	250 km	23 min 100 kW	28 KWh	8 anos ou 200 mil km	Íons de lítio
 BMW i3 REX	200 mil	180 km* 385 km**	3h30 11 kW	27 KWh	8 anos	Íons de lítio

\*NEDC: ciclo de condução composto de aproximadamente um terço de tráfego urbano e dois terços de condução extra urbana.

\*\*EPA: ciclo de condução composto de aproximadamente metade de tráfego urbano e metade de condução extra urbana.

Fonte: Adaptado de Renault (2018/19), Chevrolet (2017/19), Nissan (2019), Hyundai (2018/19).

O estado de carga (SoC) é um indicador utilizado para representar a quantidade de energia armazenada em uma bateria, sendo essencial calculá-lo com precisão para assegurar o funcionamento adequado do sistema de armazenamento e evitar danos internos e externos.

O Filtro de Kalman Unscented (UKF), por sua vez, é uma técnica eficaz para estimar o Soc. No entanto, algumas adaptações no seu algoritmo padrão podem ser necessárias para melhorar os resultados.

A utilização de métodos para estimar o SoC a partir de medições de corrente e tensão já está consolidada, mas a definição precisa de parâmetros e a estimativa confiável dos elementos elétricos que modelam o comportamento dinâmico da bateria, além dos ruídos de processo e de medição inerentes ao sistema, têm se mostrado cada vez mais essenciais para otimizar o desempenho do UKF.

Os autores utilizaram um modelo de circuito equivalente com dois ramos RC, sendo um ramo composto por um resistor em série com um capacitor, para representar o comportamento dinâmico da bateria.

O modelo genérico desenvolvido foi aplicado na análise do comportamento de uma bateria de lítio-íon.

Eles descreveram a implementação do Filtro de Kalman Unscented (UKF) e validaram o método com a aplicação de um protótipo de robô em ensaios experimentais.

Com o UKF, os resultados obtidos foram satisfatórios. No entanto, fatores externos que poderiam influenciar o desempenho da bateria, como a temperatura, não foram considerados.

Além disso, PIAO et al. (2010) propuseram a utilização do UKF para estimar o SoC em uma bateria de chumbo-ácido. Na equação de estado para o cálculo do SoC, levaram em conta a variação da capacidade de carga da bateria e do coeficiente de Coulomb, considerando os efeitos da temperatura e da taxa de descarga.

Eles representaram matematicamente o comportamento dinâmico da bateria utilizando uma equação derivada de um modelo combinado.

Para validar o método empregado, aplicaram um ciclo de teste padrão para simular a bateria em condições reais.

Os resultados obtidos foram satisfatórios, com tempo de convergência reduzido. No entanto, não consideraram os efeitos de fatores externos sobre o

desempenho da bateria, nem a estimação dos ruídos estatísticos presentes no sistema.

Embora uma estimativa precisa e confiável do SoC requeira um modelo adequado da bateria, He et al. (2013) utilizaram o UKF para estimar o estado de carga de baterias de lítio-íon, baseando-se em um modelo extremamente simplificado. O UKF foi escolhido, pois, segundo os autores, apresentou melhores resultados do que o EKF na estimativa de parâmetros em sistemas não lineares.

Os autores observaram as variações nos valores dos parâmetros do modelo, destacando a necessidade de atualização contínua dos parâmetros durante a estimativa.

Além disso, implementaram o método de Coulomb Counting como referência para comparar com a curva gerada pelo UKF.

Com o filtro, foram obtidos resultados satisfatórios tanto para simulações com correntes constantes quanto variáveis.

O diferencial deste trabalho está no cálculo dos parâmetros do modelo. No entanto, os impactos da temperatura no desempenho da bateria e a variação dos ruídos estatísticos foram desconsiderados.

Guo et al. (2017) propuseram a utilização de um UKF adaptado (AUKF) para estimar a resistência interna, o SoC e os ruídos estatísticos em baterias de lítio-íon.

Eles escolheram o modelo de circuito equivalente com um único ramo RC para simular o comportamento dinâmico da bateria.

Os parâmetros do modelo foram obtidos a partir de experimentos e considerados constantes, exceto pela resistência interna, que foi estimada utilizando o AUKF.

Para validar o método proposto, realizaram ensaios em uma plataforma de testes com um banco de baterias, coletando dados de tensão e corrente.

Um modelo de circuito equivalente com um único ramo RC, cujos parâmetros são independentes do SoC e dependem da temperatura, foi obtido de duas maneiras: usando o algoritmo *Recursive Least Square* (RLS) e o *Multi-Swarm Particle Swarm Optimization* (MPSO).

A estimativa dos parâmetros foi mais eficiente com o MPSO.

O terceiro modelo, um modelo combinado, foi calculado com base no algoritmo *Linear Least Square* (LLS) em diferentes temperaturas.

Os parâmetros do modelo da bateria foram obtidos a partir de dados coletados.

No entanto, o estudo não levou em consideração a estimação dos ruídos estatísticos.

Xiao et al. (2019) utilizaram o UKF e o EKF para estimar o SoC de uma bateria de lítio-íon, realizando simulações que consideraram a carga e descarga da bateria, tanto com corrente contínua quanto alternada, além do ciclo de teste New European Driving Cycle (NEDC). O modelo dinâmico da bateria adotado foi baseado em um circuito com dois ramos RC, e as variáveis de estado consideradas foram o SoC e as tensões nos ramos RC.

Os dados da bateria foram inicialmente coletados por meio de simulação (Matlab®) e, em seguida, contaminados com ruído antes de serem utilizados nos filtros. Após isso, foram comparadas a precisão e durabilidade dos dois métodos empregados sob diferentes condições iniciais e correntes de carga. Ambos os filtros apresentaram boa concordância em todos os cenários avaliados.

Para simular os efeitos da temperatura e de outros fatores externos na bateria, os parâmetros do modelo (capacidade e resistência interna) foram ajustados.

Os dois métodos demonstraram robustez semelhante.

Sem a necessidade de desenvolver um modelo de bateria, Qin et al. (2019) utilizaram uma rede neural não linear autorregressiva com entradas exógenas (NARXNN) associada ao UKF para estimar o SoC de uma bateria de lítio.

Assim, o UKF foi integrado ao processo de estimação, utilizando a corrente e a saída da rede neural como variáveis de entrada, com a equação de estado baseada no Coulomb Counting e a equação de medição derivada da saída da rede neural.

Com o método proposto, que combina a NARXNN com o UKF, foram obtidos resultados superiores em comparação com aqueles calculados apenas pela rede neural.

Mediouni et al. (2019) buscaram comparar a robustez e o desempenho do UKF com o EKF na estimação do SoC de uma bateria de lítio-íon, baseados no modelo de degradação de sua capacidade.

Para o modelo de circuito equivalente da bateria, foi considerado apenas um ramo RC, com todos os elementos sendo funções dependentes do SoC e da

temperatura. O modelo de degradação da capacidade da bateria envolveu o tipo de estresse aplicado, o número de ciclos de carga/descarga e os efeitos diretos da temperatura.

Para a simulação, os autores utilizaram o ciclo Urban Dynamometer Driving Schedule (UDDS) e outros ciclos de carga/descarga sob diferentes temperaturas, após uma série de ciclos de degradação na bateria.

A comparação entre o UKF e o EKF foi realizada em dois cenários: um com condições normais de operação em diferentes temperaturas e outro com corrente e tensão afetadas por ruídos. Em ambos os cenários, os erros médios absolutos e máximos foram utilizados como variáveis de comparação.

Os resultados mostraram que o UKF obteve melhor desempenho em relação ao EKF.

Não foi realizada a estimação dos ruídos estatísticos do sistema, sendo considerados constantes no estudo.

Resumo das Contribuições: O filtro de Kalman Unscented (UKF) tem sido objeto de pesquisa desde a década de 1990, e uma ampla gama de estudos sobre o tema pode ser observada.

Inicialmente, o UKF era principalmente utilizado em rastreamento de objetos e outras aplicações relacionadas a posicionamento e comunicação.

No entanto, nos últimos anos, com a crescente adoção da mobilidade elétrica e o aumento da geração de energia a partir de fontes renováveis, o UKF tem ganhado mais relevância em novos campos de aplicação.

Diversos estudos sobre o UKF começaram a ser aplicados na análise do comportamento dinâmico das baterias, que são componentes essenciais nos sistemas de armazenamento de energia.

A partir da revisão bibliográfica realizada, observou-se que, de modo geral, os trabalhos sobre estimação de estados em baterias focam principalmente no SoC.

Alguns estudos destacam a necessidade de estimar em tempo real os parâmetros dos modelos das baterias, enquanto outros os tratam como constantes ao longo do tempo.

A maioria dos trabalhos desconsidera a influência da temperatura nos cálculos, o que compromete a confiabilidade dos modelos.

Para alguns autores, o algoritmo padrão do UKF é adequado para a estimação, enquanto outros modificam o algoritmo para incluir variações nos ruídos

de processo e de medição, que são característicos dos sistemas não lineares, visando melhorar os resultados.

A partir da análise das pesquisas, observou-se que alguns estudos destacaram a superioridade do desempenho do UKF em relação a outros métodos, como o EKF, evidenciando a facilidade de implementação e a maior precisão do método proposto por seus desenvolvedores (JULIER; UHLMANN; 1997).

Por outro lado, alguns pesquisadores preferiram o EKF como a melhor solução para a estimação dos estados.

A maioria dos estudos adotou uma abordagem experimental para a coleta de dados sobre as baterias. No entanto, poucos se dedicaram à análise de veículos elétricos reais, limitando-se a investigar o comportamento de uma única bateria, em vez de um banco de baterias.

Com base na revisão bibliográfica, foi possível observar que a maioria das pesquisas utiliza modelos de baterias simples, com apenas um ramo RC ou modelos combinados mais complexos.

Além disso, muitos desses estudos não consideram os impactos da temperatura na estimação do SoC nem na determinação dos parâmetros do modelo.

Nos últimos anos, os estudos comparativos entre o UKF e outros métodos aplicados em baterias têm ganhado crescente relevância, permanecendo um campo promissor para novas investigações.

Assim, este estudo visa integrar as contribuições de diversas pesquisas, sugerindo um novo método de análise experimental que considere um modelo de bateria mais robusto, mas ainda aplicável na modelagem do sistema de energia.

O foco será, especialmente, nos efeitos da temperatura na estimativa do SoC e na constante monitorização dos parâmetros da bateria durante o funcionamento do sistema.

### 3.1 MÉTODOS PARA ESTIMAÇÃO DE SOC

Figura 10. Métodos de Estimação.



Fonte:Zhang 2018

A Contagem Ampère-Hora (Coulomb Counting) utiliza a integral da corrente de carga e descarga para estimar a capacidade restante da bateria. Sua implementação é simples e de baixa complexidade computacional, mas depende do conhecimento do estado inicial de carga e apresenta baixa precisão, além de ser sensível a erros de medição dos parâmetros (PURWADI et al., 2014).

A Voltagem Aberta de Circuito (OCV) baseia-se na relação entre a força eletromotriz e o SoC para estimar o estado da bateria. Embora ofereça alta precisão e complexidade computacional reduzida, possui limitações quanto ao número de aplicações, devido à necessidade de sensores de alta resolução para medir a tensão (ZHANG et al., 2018).

A estimativa baseada em Impedância e Resistência Interna usa valores fixos de impedância e resistência interna da bateria, juntamente com dados do estado e temperatura, para realizar a estimação.

Essa abordagem é fundamentada em características intrínsecas da bateria sob qualquer excitação de corrente, mas a dificuldade em medir a impedância e

resistência interna aumenta o custo de implementação, além de haver uma relação instável entre o SoC e a impedância (ZHANG et al., 2018).

O modelo Eletroquímico determina a quantidade de lítio nos eletrodos e usa equações diferenciais parciais para estimar o SoC.

Embora ofereça alta precisão teórica e seja útil para estimativas off-line (quando o equipamento está desligado), sua implementação é complexa, e a estimação em tempo real (online) enfrenta grandes desafios e não consegue refletir certas propriedades da bateria, como os efeitos de histerese (XIONG et al., 2018).

A determinação precisa do estado de carga em uma bateria é fundamental para otimizar a gestão energética dos dispositivos aos quais o sistema está conectado.

Esse processo deve ser realizado com exatidão para, além de indicar a carga armazenada em relação à capacidade total da bateria, evitar descargas profundas ou sobrecargas que possam prejudicar o sistema (MISYRIS et al., 2019).

Uma estimação precisa do SoC contribui para aumentar a durabilidade e melhorar o desempenho da bateria, prevenindo situações que possam comprometer a segurança dos usuários e dispositivos.

Ao contrário de outras grandezas da bateria, como a tensão de saída, corrente de descarga e temperatura, que podem ser medidas diretamente por sensores, o SoC não pode ser obtido de forma direta, sendo necessário o uso de métodos indiretos que possibilitem uma estimativa precisa e confiável (RAHIMI-EICHI et al., 2013).

Portanto, o SoC é determinado indiretamente por meio de medições diretas.

Existem diversos métodos descritos na literatura científica para estimar o SoC em sistemas de armazenamento de energia, que se diferenciam principalmente pela precisão da estimativa e pela complexidade de sua implementação.

(ZHANG et al., 2018) realizaram uma análise detalhada sobre o tema, categorizando os métodos em cinco principais grupos: convencional, filtro adaptativo, inteligência artificial adaptativa, observador não-linear e algoritmo híbrido.

A seguir, são apresentados alguns desses métodos organizados por categoria, destacando suas principais vantagens e desvantagens.

#### 1) Convencional

- Contagem Ampère-hora (Coulomb Counting): Esse método utiliza a integração da corrente de carga/descarga para calcular a capacidade remanescente da bateria. Destaca-se pela simplicidade de implementação e pela baixa complexidade computacional. No entanto, requer informações precisas sobre o estado inicial de carga e apresenta limitações em termos de precisão, sendo sensível a erros nos parâmetros medidos (PURWADI et al., 2014).

- Open Circuit Voltage (OCV): Este método baseia-se na relação entre a força eletromotriz e o SoC para estimar o estado de carga. Possui alta precisão e baixa complexidade computacional. Entretanto, sua aplicação é limitada, especialmente devido à necessidade de sensores de tensão de alta resolução para garantir medições adequadas (ZHANG et al., 2018).

- Impedância e Resistência Interna: Este método utiliza os valores de impedância e resistência interna da bateria, definidos com base nos estados e na temperatura, para estimar o SoC. Ele se fundamenta em características intrínsecas da bateria sob diferentes excitações de corrente. Contudo, a medição precisa desses parâmetros é complexa, o que aumenta o custo de implementação. Além disso, a relação entre o SoC e a impedância pode ser instável, o que limita a confiabilidade do método (ZHANG et al., 2018).

- Método Eletroquímico: Este método identifica a quantidade de lítio presente nos eletrodos e utiliza equações diferenciais parciais para estimar o SoC. Ele oferece alta precisão teórica e é particularmente útil para estimativas realizadas com o equipamento fora de operação (off-line). No entanto, apresenta elevada complexidade de implementação e grande dificuldade para realizar estimativas enquanto o sistema está em funcionamento (online) (XIONG et al., 2018).  
Baseado no Modelo da Bateria: Este método utiliza elementos de circuito elétrico para modelar o comportamento da bateria e, a partir disso, estimar o SoC. Apresenta boa precisão na estimativa dos estados com o sistema em funcionamento (online). Contudo, não considera certas características da bateria, como os efeitos de histerese (XIONG et al., 2018).

## 2) Filtro Adaptativo.

- O Filtro de Kalman Padrão utiliza equações recursivas para estimar os estados atuais com base nos estados anteriores. Apresenta excelente desempenho em sistemas lineares, além de corrigir erros de forma autônoma durante a operação.

No entanto, seu desempenho é insatisfatório quando aplicado a sistemas não lineares (PLETT, 2004).

- Filtro de Kalman Estendido: Utiliza a linearização por meio da série de Taylor para aplicar equações recursivas na estimativa dos estados atuais com base nos estados anteriores. É adequado para sistemas não lineares, porém apresenta baixa precisão quando aplicado a sistemas com alta não linearidade (LOUKIL et al., 2017).

- Filtro de Kalman Unscented: Utiliza a transformada Unscented para linearizar o sistema, aplicando equações recursivas para estimar os estados atuais com base nos estados anteriores. É eficaz em sistemas altamente não lineares, mas requer ajuste preciso dos parâmetros utilizados no processo de linearização (JULIER; UHLMANN, 1997).

### 3) Inteligência artificial adaptativa

- Rede Neural Artificial: Utiliza unidades de processamento interconectadas para representar modelos não lineares complexos. É altamente adaptável e pode ser aplicada a uma variedade de problemas. Não requer conhecimento físico dos parâmetros internos da bateria. No entanto, exige um grande banco de dados para o treinamento da rede, o que demanda alta capacidade computacional, especialmente em termos de memória do sistema (MOURA, 2019).

- Algoritmo Genético: Baseado no processo genético biológico, o algoritmo busca encontrar soluções aproximadas para problemas de otimização. É reconhecido por sua robustez e aplicabilidade em diversos tipos de problemas, mas requer precisão nos elementos específicos e um grande número de avaliações das funções internas (ZINI, 2009).

- Lógica Fuzzy: Utilizando um banco de dados apropriado, é capaz de representar um modelo não-linear complexo por meio de diferentes níveis (regras). Apresenta alta adaptabilidade e permite a criação rápida de um protótipo do sistema. No entanto, requer uma verificação cuidadosa das variáveis envolvidas e demanda um número elevado de simulações e testes (DA SILVA et al., 2019).

### 4) Observador não-linear.

- Observador Proporcional-Integral: É um controlador capaz de estimar simultaneamente estados e entradas desconhecidas, sem considerar os ruídos estatísticos de processo e medição. Apresenta uma estrutura simples e fácil de

implementar, com alta precisão e eficiência em sua aplicação. Contudo, ele não considera as partes não-linearidades do sistema e outros fatores, como entradas desconhecidas no modelo, podendo atribuir impactos incorretos a esses elementos no sistema (LIU, 2011).

- Observador de Modo Deslizante: Assegura a estabilidade e robustez do sistema diante de incertezas do modelo, utilizando um ganho de realimentação e outras técnicas no controle do regime. Apresenta uma alta taxa de convergência e boa precisão de estimação em comparação com outros métodos. No entanto, é significativamente influenciado pela variação de ruídos externos (ZHANG et al., 2009).

#### 5) Método híbrido

- EKF combinado com Contagem Ampère-hora: Esse método combina duas abordagens para melhorar a precisão da estimação dos estados, compensando as limitações de um com as vantagens do outro. O erro acumulado pela Contagem Ampère-hora durante a operação do sistema é corrigido automaticamente pelo Filtro de Kalman Estendido. No entanto, ainda apresenta baixa precisão em sistemas altamente não-lineares e exige um elevado esforço computacional.

- Após analisar as vantagens e desvantagens de cada método de estimação de estados e considerar as necessidades do sistema não-linear da bateria, concluiu-se que o método híbrido oferece maior precisão na estimativa do SoC, ao levar em conta os impactos dos ruídos externos e ajustar automaticamente os erros inerentes ao processo de estimação.

Figura 11. Metodologia do trabalho.



Fonte: Próprio Autor

#### 4 METODOLOGIA E RESULTADOS

Os principais conceitos relacionados à modelagem da bateria e aos métodos empregados na estimação de estados em sistemas não-lineares dinâmicos, objetivando assim, melhorar a compreensão sobre o tema, a estimação do estado de carga em uma bateria é fundamental para otimizar o gerenciamento de energia dos dispositivos aos quais esse sistema está associado.

Contudo, é necessário que esse processo seja realizado de maneira precisa para que, além de indicar a carga armazenada disponível em comparação com a carga total da bateria, sejam evitadas descargas profundas ou sobrecargas, que possam danificar o sistema (MISYRIS et al., 2019).

Portanto, uma boa estimacão aumenta a durabilidade e melhora o desempenho da bateria, evitando situaoes que põem em risco usuários e dispositivos.

Ao contrário de outras grandezas presentes na bateria que podem ser medidas por sensores, como, por exemplo, tensão de saida, corrente de descarga e temperatura, o SoC não pode ser obtido diretamente, exigindo o uso de métodos indiretos que viabilizem a sua estimacão de maneira precisa e confiável (RAHIMI-EICHI et al., 2013), assim, a partir de medioes diretas, o SoC é determinado indiretamente, existe uma série de técnicas empregadas na estimacão de SoC em sistemas de armazenamento de energia, disponibilizadas na bibliografia científica, variando principalmente em relação  precisão de estimacão ou na complexidade de implementaco, (ZHANG et al., 2018) realizaram uma revisão detalhada sobre o tema, no estudo, os autores organizaram os métodos em cinco categorias principais, sendo elas: convencional, filtro adaptativo, inteligência artificial adaptativa, observador não-linear e algoritmo híbrido

Devido às suas características, diferentes tecnologias de baterias  base de lítio foram amplamente estendidas nos últimos anos em todos os tipos de sistemas de armazenamento de energia (RAMADAN; BECHERIF; CLAUDE, 2017). Apesar das LIBs possuirem ótimas características, o aproveitamento dessa tecnologia em larga escala se intensificou apenas nas duas últimas décadas devido à complexidade do processo produtivo das células de lítio e ao alto custo de insumos, como lítio, manganês, cobalto e fosfato, que começaram a diminuir após os investimentos realizados estimularem a produo de veículos elétricos (MOHAMMADI; SAIF, 2023).

#### 4.1 ANÁLISE

Algumas características são fundamentais para determinar o tipo de armazenamento mais adequado para uma aplicao específica.

No processo de escolha de um sistema de armazenamento apropriado, as seguintes especificaoes tecnológicas devem ser levadas em considerao.

1. Capacidade de Armazenamento de Energia: Esta é uma das principais características a ser considerada quando a aplicao exige que o sistema de armazenamento gerencie a potência ao longo de um período contínuo. Ela

representa a quantidade de energia que o sistema pode armazenar, sendo medida em Wh ou em múltiplos dessa unidade;

2. Potência Máxima: Refere-se à potência instantânea máxima que o sistema pode absorver ou fornecer ao sistema de conexão, sendo medida em W ou em múltiplos dessa unidade;

3. Constante de Tempo: É a relação entre a Capacidade de Armazenamento de Energia e a Potência Máxima, normalmente expressa em horas ou frações de hora. Essa especificação pode ser interpretada como o tempo máximo durante o qual a bateria pode absorver ou fornecer potência à rede de maneira contínua;

4. Tempo de resposta: Refere-se ao tempo necessário para que o sistema, após ser acionado, comece a absorver ou injetar potência na rede à qual está conectado;

5. Densidade de Energia e Densidade de Potência: Representam a capacidade de armazenamento por unidade de massa ou volume. A densidade de energia é medida em Wh/kg ou Wh/L, enquanto a densidade de potência é medida em W/kg ou W/L. Esses parâmetros indicam o tamanho necessário do equipamento para armazenar uma quantidade específica de energia ou potência,

6. Eficiência: O aproveitamento da energia armazenada nem sempre é completo, pois, como em qualquer processo não ideal, ocorrem perdas.

Nos sistemas de armazenamento, essas perdas estão relacionadas aos processos de conversão de energia e, especificamente, nas baterias, ao processo de autodescarga, quando a bateria sofre descargas parciais ou vazias.

A eficiência é expressa como a porcentagem de energia aproveitada em relação à capacidade máxima de armazenamento.

#### **4.1.1 Tempo de vida útil**

Assim como qualquer equipamento elétrico, os sistemas de armazenamento têm uma estimativa de vida útil, que depende da durabilidade e desgaste de seus componentes. Com o tempo, à medida que o equipamento se deteriora, ele se torna mais propenso a falhas, pode apresentar redução de eficiência (devido ao aumento das perdas) e até mesmo perder capacidade de armazenamento. Essa característica pode ser expressa em anos ou em termos de ciclos completos de carga e descarga, os quais podem ser associados à curva de estresse e fadiga do material.

As especificações a seguir se referem a sistemas de armazenamento baseados em baterias. Alguns critérios operacionais estão relacionados a essas especificações, a fim de otimizar a capacidade de armazenamento do dispositivo e garantir maior durabilidade do equipamento.

1. Profundidade de Descarga (DOD): A profundidade de descarga é o percentual da capacidade de armazenamento utilizado durante uma descarga. Em alguns tipos de baterias, como as de íon-lítio, a estratégia de operação tem uma influência direta sobre a vida útil. Quando são permitidas descargas profundas (acima de 80%), ocorre um desgaste maior, o que pode reduzir o tempo de vida útil do equipamento;

2. Estado de Carga (SOC): Refere-se ao nível de carga do sistema, expresso como um percentual da capacidade total de armazenamento. Um sistema com Estado de Carga de 100% está totalmente carregado, enquanto um sistema com Estado de Carga de 0% está completamente descarregado;

3. Estado de Carga Mínimo: Manter um nível mínimo de carga é essencial para evitar o desgaste do equipamento. Esse limite, conhecido como efeito cutoff, corresponde à carga mínima necessária para permitir a continuidade das reações eletroquímicas na bateria. Abaixo desse nível, as reações tornam-se inviáveis, e a bateria, embora não completamente descarregada, não consegue fornecer energia ao sistema.

Geralmente, recomenda-se que a bateria opere com um Estado de Carga igual ou superior a 20%,

4. Estado de Saúde (SOH): Representa a capacidade de armazenamento do sistema em relação à sua capacidade nominal, expressa como um percentual. Esse parâmetro ganha relevância após longos períodos de uso, quando a bateria começa a perder capacidade devido à sua deterioração. Recomenda-se a substituição do equipamento por um novo quando o Estado de Saúde atinge níveis inferiores a 80%. O envelhecimento da bateria pode influenciar significativamente a precisão na estimativa do SoC, exigindo ajustes nos métodos de monitoramento para garantir eficiência e segurança no uso contínuo do sistema.

#### **4.1.2 Baterias de fluxo**

As baterias de fluxo são construídas utilizando materiais líquidos, sendo os dois compostos responsáveis pelas reações de redução e oxidação dissolvidos no

eletrólito e armazenados em tanques separados. Para que a reação eletroquímica ocorra, esses eletrólitos são bombeados para o interior da célula, onde acontece a oxirredução. Embora nunca se misturem, os eletrólitos permanecem separados por uma membrana que permite apenas a passagem de íons entre os meios.

Entre as baterias de fluxo, destacam-se as Redox de Vanádio (VRFB), conhecidas por sua longa vida útil, superior a 12.000 ciclos de carga e descarga, e pela capacidade de suportar descargas profundas sem comprometer sua durabilidade. No entanto, essas baterias apresentam desvantagens, como o risco de vazamento dos líquidos e a necessidade de sistemas adicionais para monitoramento, bombeamento e gerenciamento do fluxo interno, o que eleva os custos de manutenção e operação. Além disso, o alto custo do vanádio, principal componente do sistema, reduz a competitividade comercial dessa tecnologia em comparação com outras opções disponíveis.

Tabela 1. Valores de referência para as principais tecnologias de bateria.

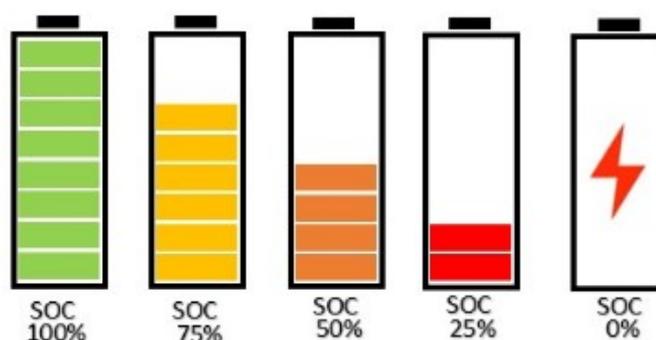
Características	Chumbo-ácido	Íon-Lítio	Sódio-Enxofre (NaS)	Bateria de Fluxo (VRFB)
Densidade de Energia (Wh/L)	50 - 100	200 - 735	140 - 300	15 - 70
Densidade de Potência (W/L)	10 - 700	100 – 10.000	120 - 160	1 - 2
Eficiência (%)	80 - 82	92 - 96	80 - 84	70
Auto-descarga (% por dia)	0.09 – 0.4	0.09 - 0.36	0.05 – 1.0	0 – 1.0
Profundidade de Descarga (%)	50 - 60	84 - 100	100	100
Vida Útil (Ciclos completos)	250 – 2.500	500 – 20.000	1.000 – 10.000	12.000 – 14.000
Custo de Instalação (USD/kWh)	105 - 473	200 – 1.260	263 - 735	315 – 1.050

Fonte: Irena (International Renewable Energy Agency)

A mudança do SoH impacta no cálculo do SoC ao longo do tempo, a partir do princípio que a capacidade de retenção de carga da bateria cai no decorrer do tempo, é racional imaginar que o maior impacto ocorre na autonomia do veículo, porque a potência demandada pelo sistema, permanece a mesma e a bateria consegue suprir.

Dessa forma, a autonomia do veículo cai diretamente proporcional com o decaimento do SoH, e para a leitura do SoC ser correta, é preciso realizar uma calibração da energia da bateria conforme a figura (12).

Figura 12. Percentual de Carga



Fonte: Plett 2015

O uso de baterias de lítio oferece a vantagem de uma longa vida útil. Para maximizar essa eficiência, é essencial estimar determinados parâmetros que refletem o comportamento da bateria durante os processos de carga e descarga.

Entre esses parâmetros, destaca-se o Estado de Carga (SOC), descrito por PLETT (2015) como uma estimativa percentual que varia de 0%, indicando que a célula ou bateria está totalmente descarregada, a 100%, representando sua carga completa. Conforme Andrea (2020), o SOC desempenha um papel crucial no monitoramento do desempenho da bateria.

O Estado de Saúde (SOH) reflete a condição das células da bateria em termos percentuais. Contudo, um dos principais desafios está na definição dos parâmetros utilizados para sua estimativa, como resistência real, capacidade efetiva e corrente real de autodescarga, que são, por natureza, difíceis de mensurar. Além disso, há o Estado de Vida (SOL), que estima o desempenho atual da bateria em comparação com seu estado original, antes de qualquer uso.

De acordo com Andrea (2020), as dificuldades relacionadas à definição de parâmetros para o SOH também se aplicam ao Estado de Vida (SOL).

Essas estimativas são apenas algumas das abordagens possíveis, podendo haver outras variáveis conforme as características específicas.

Diferentes tecnologias de baterias à base de lítio têm se expandido amplamente nos últimos anos para atender diversos tipos de sistemas de armazenamento de energia (Ramadan; Bencherif; Claude, 2017).

Embora as baterias de íon-lítio (LIBs) apresentem características excepcionais, sua adoção em larga escala ganhou força apenas nas últimas duas décadas.

Isso se deve à complexidade do processo de fabricação das células e ao elevado custo de insumos como lítio, manganês, cobalto e fosfato.

A redução desses custos foi impulsionada pelos investimentos destinados a estimular a produção de veículos elétricos (Mohammadi; Saif, 2023).

#### **4.1.3 Fluxo de medição de isolamento**

Neste teste, verifica-se a ausência de falhas no isolamento entre o sistema de alta tensão (AT) e o aterramento.

Para facilitar a compreensão, os pontos de medição estão identificados na Figura 13 com as respectivas denominações:

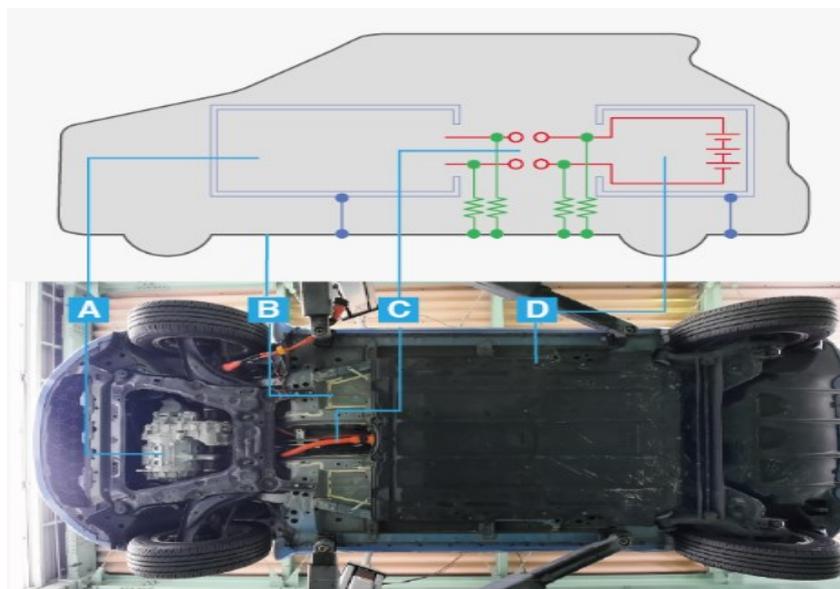
A: Inversor, motor etc.

B: Chassi

C: cabo de alta tensão

D: baterias HV

Figura 13. Pontos de Aterramento.



Fonte: <https://www.hioki.com/br-pt/>

1. Certifique-se de desligar o sistema de alta tensão (HV) do veículo, desconectando o plugue ou acionando o interruptor de serviço, antes de realizar qualquer teste ou medição elétrica.

2. Após confirmar a ausência de tensão no sistema e executar as medidas de segurança necessárias para garantir que o veículo está completamente desenergizado, prossiga com o teste de isolamento.

3. Durante a medição de isolamento, utilize uma tensão de teste superior à tensão nominal da bateria do veículo. Por exemplo, ao usar o testador de isolamento HIOKI para uma bateria HV de 400 V, selecione a faixa de 500 V. Lembre-se de que a tensão de teste pode variar conforme o modelo do veículo.

4. Avalie a qualidade do isolamento com base no valor mínimo de resistência de isolamento especificado pelo fabricante para o modelo do veículo.

Conforme apresentado na Tabela 3, os testes são realizados tanto no conector da bateria de alta tensão (lado da bateria HV) quanto no conector do inversor (lado do inversor). O procedimento envolve medir entre cada terminal do cabo de alta tensão (nos lados da bateria e do inversor) e o terra do chassi do veículo. Devido à presença de um diodo no lado do inversor, é necessário inverter a polaridade, realizando o teste duas vezes.

Tabela 3. Pontos de teste.

Ponto de teste	Terminal positivo do testador de isolamento (+)	Terminal negativo do testador de isolamento (-)
Lado da bateria HV	Terminal positivo do conector (+)	Chão
	Terminal negativo do conector (-)	Chão
Lado do inversor	Terminal positivo do conector (+)	Chão
	Terminal negativo do conector (-)	Chão
	Chão	Terminal positivo do conector (+)
	Chão	Terminal negativo do conector (-)

Fonte: <https://www.hioki.com/br-pt/>

Teste de isolamento no lado da bateria HV (figura A) e no lado do inversor (figura B).

Figura 14. Pontos de Isolamento



(A)



(B)

Fonte: <https://www.hioki.com/br-pt/>

#### 4.1.4 Para medições mais seguras e eficientes

Em seguida, o autor (Osamu Mawatari) utilizou o analisador de resistência de isolamento IR4059 da Hioki, examinando suas características e explicando por que ele é uma opção adequada para a medição do isolamento em veículos elétricos (BEV).

Para a faixa de alta tensão (500 V ou 1000 V), o IR4059 possui um mecanismo de segurança que exige que o técnico desbloqueie o dispositivo e selecione a tensão adequada, a fim de evitar a aplicação incorreta de alta tensão em equipamentos de baixa tensão, conforme ilustrado na figura (15).

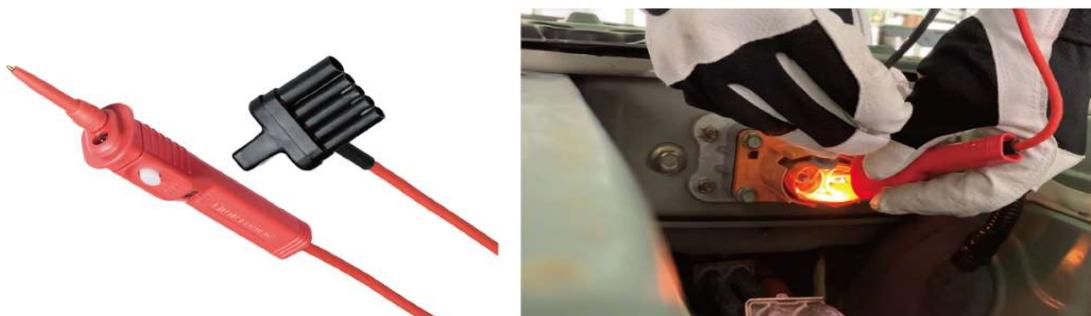
.Figura 15. Testador de Resistência



Fonte: <https://www.hioki.com/br-pt/>

O cabo de teste com interruptor remoto, modelo L9788-10, permite iniciar e interromper a medição diretamente com a ponta dos dedos, conforme ilustrado na figura (16). Ele possui um LED que facilita a visibilidade, proporcionando avaliações imediatas de aprovação ou rejeição durante o processo de medição.

Figura 16. Cabo Teste. Fonte



:<https://www.hioki.com/br-pt/>

Ao fixar o testador de isolamento ao veículo com a cinta magnética Z5020, é possível executar o teste de isolamento enquanto verifica a leitura ao nível dos olhos, conforme ilustrado na figura (17).

Figura 17. Cinta Magnética. Fonte



Fonte: <https://www.hioki.com/br-pt/>

A conexão Bluetooth® pode ser realizada ao instalar o Adaptador Wireless Z3210 no IR4059. Ao vincular o instrumento ao aplicativo GENNECT Cross para dispositivos móveis, é possível digitalizar e gerenciar as informações de medição. Ao armazenar esses dados e compará-los durante a verificação anual, é possível adotar medidas preventivas contra a deterioração do isolamento do BEV, como mostrado na figura (18).

Figura 18. Comunicação.



Fonte: <https://www.hioki.com/br-pt/>

## 4.2 DISCUSSÃO

Os profissionais técnicos desempenham um papel essencial na realização de testes elétricos e verificações mecânicas necessárias para a manutenção de veículos elétricos.

Em particular, o teste de resistência de isolamento é crucial para garantir a segurança do veículo. O IR4059 se destaca por suas funcionalidades seguras e de fácil manuseio, tornando as atividades técnicas mais eficientes.

Os veículos elétricos a baterias (Battery Electric Vehicles - BEVs) estão conquistando cada vez mais espaço no mercado automotivo, impulsionados por características como a potência instantânea do sistema convencional e a capacidade de substituir os veículos movidos a combustíveis fósseis.

A expansão dos BEVs no setor de transportes surge como uma alternativa atraente para reduzir as emissões de gases de efeito estufa e melhorar a eficiência energética global.

De acordo com o Global EV Outlook 2018 (AGENCY, 2019), até 2030, o mercado global de automóveis implantará com sucesso 117,6 milhões de BEVs nas estradas, o que contribuirá para uma redução de 262 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> (SHRIVASTAVA et al., 2019).

No BEV, a bateria é a principal fonte de energia e, frequentemente, o componente mais caro e complexo, já que sua autonomia depende diretamente de seu bom funcionamento.

Erros na estimativa do estado de carga, limitações na potência disponível devido a altas temperaturas de operação e o envelhecimento da bateria são fatores que podem comprometer seu desempenho (CHEN; FU; MI, 2013).

### 4.2.1 Aspectos de funcionamento das baterias

A armazenagem de energia em baterias ocorre por meio de reações eletroquímicas de oxirredução, que geram uma corrente elétrica devido à transferência de elétrons do elemento que sofre oxidação (perde elétrons) para o elemento que sofre redução (recebe elétrons), através de um meio condutor.

As baterias são compostas por células eletroquímicas conectadas em série ou em paralelo, que são os locais onde essas reações acontecem. Cada célula eletroquímica é composta por dois condutores, denominados eletrodos, separados por um meio de transferência chamado eletrólito.

Durante a descarga de uma bateria, processo em que a energia química é convertida em eletricidade, ocorre uma reação de ionização na célula. Nesse processo, o cátodo, um dos eletrodos, recebe elétrons do ânodo, o eletrodo oxidado.

O movimento dos elétrons do ânodo para o cátodo através do eletrólito gera uma diferença de potencial entre os eletrodos

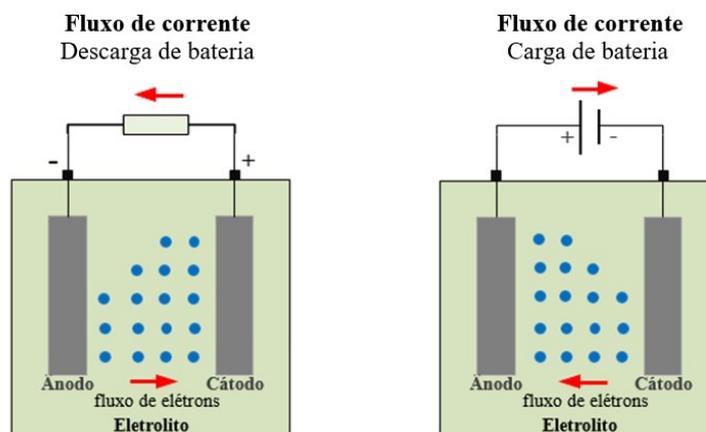
Essa diferença permite a conexão de um circuito externo, pelo qual uma corrente elétrica será gerada, fluindo devido à diferença de potencial nos pontos de conexão.

Durante o processo de carga da bateria, uma corrente elétrica é aplicada aos eletrodos, promovendo a reação inversa.

A Figura 19 ilustra o funcionamento dos processos de descarga e carga das baterias, respectivamente.

Pode-se observar que a direção do fluxo de corrente nos terminais da bateria é diferente nos dois processos.

Figura 19. Esquema de funcionamento do processo de descarga e carga das baterias



. Fonte de dados: Deloitte

## 5 CONCLUSÕES

Ao analisar os estudos existentes sobre o tema, é possível perceber uma lacuna no entendimento das interações complexas entre os diferentes fatores que influenciam a gestão da estimação de estado de carga para veículos elétricos. A contribuição para o meio acadêmico busca preencher essa lacuna do conhecimento científico que abrangem as novas tecnologias e desenvolvimento das células baterias que estão em alta no momento, oferecendo uma perspectiva mais abrangente e fornecendo percepções valiosas para futuras pesquisas e desenvolvimentos na área.

Dessa maneira, este trabalho apresenta um estudo bibliográfico sobre os métodos de estimação de estado de carga para veículos elétricos apontando as vantagens e desvantagens de cada método.

Os resultados obtidos nesta pesquisa revelam de maneira consistente os métodos e tendências mais adequados para estimação de estado de carga das baterias oferecendo um documento teórico com as práticas atuais.

Em conclusão, é essencial reconhecer que cada método apresenta suas próprias vantagens e limitações, e a escolha do mais adequado deve ser orientada pelas necessidades específicas da aplicação.

Este estudo não apenas contribui para a compreensão da performance relativa desses métodos, mas também ressalta a importância de considerar fatores práticos ao implementar soluções para estimar o SoC em sistemas de armazenamento de energia.

As conclusões fornecem uma base para futuras pesquisas e inovações práticas na área de gestão de baterias, com o objetivo de aprimorar a eficiência e a confiabilidade dos sistemas de armazenamento de energia que utilizam baterias de íon de lítio.

Para pesquisas futuras, recomenda-se a investigação de abordagens metodológicas alternativas, a realização de simulações computacionais de cada método e a condução de testes práticos, com o intuito de comparar o desempenho de cada abordagem.

## 6 REFERÊNCIAS

ALTERNATIVE FUELS DATA CENTER. **All-Electric Vehicles**. 2021. Disponível em: [https://afdc.energy.gov/vehicles/electric\\_basics\\_ev.html](https://afdc.energy.gov/vehicles/electric_basics_ev.html). Acesso em: 25 fev. 2021.

BALAGOPAL, B.; CHOW, M. **The state of the art approaches to estimate the state of health (SOH) and state of function (SOF) of lithium-ion batteries**. In: **INDUSTRIAL INFORMATICS (INDIN)**, 2015 IEEE 13th INTERNATIONAL CONFERENCE ON. Cambridge, 2015. p. 1302–1307.

BALASINGAM, B.; PATTIPATI, K. **Elements of a robust battery-management system: from fast characterization to universality and more**. IEEE Electrification Magazine, v. 6, n. 3, p. 34–37, 2018. ISSN 2325-5889.

BARRETO, Gilmar. **Veículo elétrico à bateria: contribuições à análise de seu desempenho e seu projeto**. 1986. 360 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

Baterias Recarregáveis. Disponível em: <http://sta-eletronica.com.br>.

BERECIBAR, M. et al. **Critical review of state of health estimation methods of Li-ion batteries for real applications**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 56, p. 572–587, 2016.

BLOOMBERG. **This is the dawning of the age of the battery**. 2020. Disponível em: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2020-12-17/this-is-the-dawning-of-the-age-of-the-battery?srnd=green>. Acesso em: 13 mar. 2021.

BRONDANI, M. de F. **Modelagem matemática do tempo de vida de baterias de lítio-íon polímero utilizando algoritmos genéticos**. 2015. Dissertação (Mestrado) – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul (Unijuí), Ijuí.

BURCH, I.; GILCHRIST, J.; HANCOCK, A. (ed.); WAALAND, G. (ed.). **Survey of global activity to phase out internal combustion engine vehicles**. [S. l.]: The Climate Center, 2018. Disponível em: <https://theclimatecenter.org/wp-content/uploads/2020/03/Survey-on-Global-Activities-to-Phase-Out-ICE-Vehicles-update-3.18.20-1.pdf>. Acesso em: 20 fev. 2021.

CHEN, Z. et al. **Online battery state of health estimation based on genetic algorithm for electric and hybrid vehicle applications**. Journal of Power Sources, v. 240, p. 184–192, 2013.

CONVERSION. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 34, n. 1, p. 109–119, 2019. Disponível em: <http://doi.org/10.1109/TEC.2018.2861994>.

DA SILVA, L. M.; DA SILVA, E. J. A.; FERREIRA, L. M.; GONÇALVES, R. M.; DA SILVA, B. Q. **Estado da arte dos fundamentos e ideias da lógica fuzzy aplicada às ciências e tecnologia**. Revista Brasileira de Geomática, v. 7, n. 3, p. 149–169, 2019. ISSN 2317-4285. Disponível em: <http://doi.org/10.3895/rbgeo.v7n3.9365>.

DELGADO, Fernanda et al. **Carros elétricos**. Caderno FGV Energia, ano 4, n. 7, maio 2017. Disponível em: <https://energia.fgv.br/sites/energia.fgv.br/files/estudo-carros-eletricos.pdf>. Acesso em: 28 set. 2018.

ESTEVEES, Gheisa R. T.; BARBOSA, Sônia R. C. S.; SILVA, Ênio P.; ARAÚJO, Paula D. **Estimativa dos efeitos da poluição atmosférica sobre a saúde humana: algumas possibilidades metodológicas e técnicas para a cidade de São Paulo**. In: ENCONTRO DA ANPPAS, 2, 2004, Indaiatuba. Anais... Belém: Associação Nacional de Pós-Graduação e Pesquisa em Ambiente e Sociedade, 2004.

FARMANN, A. et al. **Critical review of on-board capacity estimation techniques for lithium-ion batteries in electric and hybrid electric vehicles**. Journal of Power Sources, v. 281, p. 114–130, 2015.

FERRAZ, Clayton Vinícius; DONHA, Décio Crisol. **Sistemas controlados de propulsão de veículos automotores**. 2004. Disponível em: <https://www.siteexemplo.com>. Acesso em: 28 set. 2020.

GUO, H.; WANG, Z.; LI, Y.; WANG, D.; WANG, G. **State of charge and parameters estimation for lithium-ion battery using dual adaptive unscented Kalman filter**. In: 2017 29TH CHINESE CONTROL AND DECISION CONFERENCE (CCDC). Chongqing, 2017. p. 4962–4966. Disponível em: <http://doi.org/10.1109/CCDC.2017.7979374>.

HAN, X. et al. **A comparative study of commercial lithium-ion battery cycle life in electrical vehicle: aging mechanism identification**. Journal of Power Sources, v. 251, p. 38–54, 2014.

HANNAN, M. A. et al. **A review of lithium-ion battery state of charge estimation and management system in electric vehicle applications: challenges and recommendations**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 78, p. 834–854, 2017.

HE, W.; WILLIARD, N.; CHEN, C.; PECHT, M. **State of charge estimation for electric vehicle batteries using unscented Kalman filtering**. Microelectronics Reliability, 2014.

HU, Y. **Electro-thermal battery model identification for automotive applications**. Journal of Power Sources, v. 196, n. 1, p. 449–457, 2011.

HUSAIN, Iqbal. **Electric and hybrid vehicles: design fundamentals**. Boca Raton: CRC Press, 2003. 270 p.

WORLD BANK. **CO<sub>2</sub> emissions from transport (% of total fuel combustion)**. Disponível em: <https://data.worldbank.org/indicator/EN.CO2.TRAN.ZS>. Acesso em: 15 nov. 2018.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Global EV Outlook 2020: Entering the decade of electric drive?** 2020. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2020>. Acesso em: 11 fev. 2021.

JOKIĆ, I.; ZEČEVIĆ, Ž.; KRSTAJIĆ, B. **State-of-charge estimation of lithium-ion batteries using extended Kalman filter and unscented Kalman filter**. In: IEEE Information Technology (IT), 23rd International Scientific-Professional Conference on. Zabljak, 2018. p. 1–4. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/SPIT.2018.8350462>.

LIU, X. L.; CHENG, Z. M.; YI, F. Y.; QIU, T. Y. **SOC calculation method based on extended Kalman filter of power battery for electric vehicle**. In: IEEE Intelligent Systems and Knowledge Engineering (ISKE), 12th International Conference on. Nanjing, 2017. p. 1–4. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ISKE.2017.8258840>.

LIU, Y. **Robust Nonlinear Control Design with Proportional-Integral-Observer Technique**. 2011. Tese (Doutorado) – University of Duisburg-Essen, Duisburg.

LOUKIL, J.; MASMOUDI, F.; DERBEL, N. **State of charge estimation of lead acid battery using a Kalman filter**. In: IEEE Systems, Signals & Devices (SSD), 14th International Multi-Conference on. Marrakech, 2017. p. 308–312. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/SSD.2017.8167026>.

MEDIOUNI, H.; EL HANI, S.; EL HAROURI, K.; MARTINS, J.; GONÇALVES, R. J. **Robustness evaluation of unscented Kalman filter for state of charge estimation based on battery capacity degradation model**. In: IEEE Industrial Electronics Society, IECON 2019 - 45th Annual Conference on.

MISYRIS, G. S.; DOUKAS, D. I.; PAPADOPOULOS, T. A.; LABRIDIS, D. P.; AGELIDIS, V. G. **State-of-Charge Estimation for Li-Ion Batteries: A More Accurate Hybrid Approach**. In: IEEE Energy.

MOURA, J. J. P. **Modelo para Estimação do Estado de Carga de Baterias de Lítio-Íon Baseado em Redes Neurais Auto Regressivas Não-Lineares Com Entradas Externas**. 2019. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa.

MOTTA, Claudio J. A.; JR., Nilton Rosenbach; PINTO, Bianca Peres. **Coleção Química no Cotidiano: Química e Energia: Transformando Moléculas em Desenvolvimento**. São Paulo: Claudia Moraes de Rezende, 2010. v. 2. 104 p. Disponível em: . Acesso em: 9 jan. 2019.

PIAO, C.; SUN, Z.; LIANG, Z.; CHO, C. **SOC Estimation of Lead-Acid Batteries Based on UKF**. In: IEEE Electrical and Control Engineering, International Conference on. Wuhan, 2010. p. 1968–1972. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/iCECE.2010.484>.

PLETT, G. L. **Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs: Part 1. Background**. Journal of Power Sources, v. 134, n. 2, p. 252–261, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2004.02.031>.

PURWADI, A.; RIZQIAWAN, A.; KEVIN, A.; HERYANA, N. **State of Charge estimation**.

SUN, F.; HU, X.; ZOU, Y.; LI, S. **Adaptive unscented Kalman filtering for state of charge estimation of a lithium-ion battery for electric vehicles**. Energy, v. 36, n.

5, p. 3531-3540, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.03.059>. Acesso em: 13 dez. 2024.

QIN, X.; GAO, M.; HE, Z.; LIU, Y. **State of Charge Estimation for Lithium-Ion Batteries Based on NARX Neural Network and UKF**. 2019 IEEE 17th International Conference on Industrial Informatics (INDIN), Helsinki, 2019, p. 1706-1711. Disponível em: <http://doi.org/10.1109/INDIN41052.2019.8972319>. Acesso em: 13 dez. 2024.

Reliability, v. 53, n 6, p.840-847, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2012.11.010>. Acesso em: 13 dez. 2024.

STATISTA. **Number of passenger cars and commercial vehicles in use worldwide from 2006 to 2015**. 2017. Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/281134/number-ofvehicles-in-use-worldwide/>. Acesso em: 15 nov. 2018.

THE WORLD BANK GROUP, **CO<sub>2</sub> emissions from transport (% of total fuel combustion)** – Brazil. 2014a. Disponível em: <https://data.worldbank.org/indicator//EM.CO2.TRAN.ZS?end=2014&locations=BR&start=1960&view=chart>. Acesso em 30 mar. 2021.

THE WORLD BANK GROUP. **CO<sub>2</sub> emissions from transport (% of total fuel combustion)**. 2014b.

UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY. **Electric-Drive Vehicles**. 2017. Disponível em: [https://afdc.energy.gov/files/u/publication/electric\\_vehicles.pdf](https://afdc.energy.gov/files/u/publication/electric_vehicles.pdf). Acesso em: 15 fev. 2021.

CHAGAS, V. H. O. **Estimação do estado de carga em bateria de lítio com armazenamento em nuvem**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Eletrônica) – Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Departamento de Eletrônica e Sistemas.

WU, X.; LI, X.; DU, J. **State of Charge Estimation of Lithium-Ion Batteries Over Wide Temperature Range Using Unscented Kalman Filter**. IEEE Access, v. 6, p. 41993-42003, 2018. Disponível em: <http://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2860050>. Acesso em: 13 dez. 2024.

XIONG, R.; CAO, J.; YU, Q.; HE, H.; SUN, F. **Critical Review on the Battery State of Charge Estimation Methods for Electric Vehicles**. IEEE Access, v. 6, p. 1832-1843, 2018. Disponível em: <http://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2780258>. Acesso em: 13 dez. 2024.

XIAO, T.; SHI, X.; ZHOU, B.; WANG, X. **Comparative Study of EKF and UKF for SOC Estimation of Lithium-ion Batteries**. 2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia), Chengdu, 2019, p. 1570-1575. Disponível em: <http://doi.org/10.1109/ISGTAsia.2019.8880915>. Acesso em: 13 dez. 2024.

ZHANG, F.; LIU, G.; FANG, L. **Battery state estimation using Unscented Kalman Filter**. 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Kobe,

2009, p. 1863-1868. Disponível em: <http://doi.org/10.1109/ROBOT.2009.5152745>. Acesso em: 13 dez. 2024.

ZHANG, R.; XIA, B.; LI, B.; CAO, L.; LAI, Y.; ZHENG, W.; WANG, H.; WANG, W. **Lithium State of the Art of -Ion Battery SOC Estimation for Electrical Vehicles**. *Energies*, v. 11, artigo 1820, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en11071820>. Acesso em: 13 dez. 2024.

ZHANG, X.; WU, J.; KANG, G. **SOC estimation of Lithium battery by UKF algorithm based on dynamic parameter model**. 2016 IEEE 13th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI), Xi'an, 2016, p. 945-950. Disponível em: <http://doi.org/10.1109/URAI.2016.7734116>. Acesso em: 13 dez. 2024.

ZINI, E. de O. C. **Algoritmo Genético Especializado na Resolução de Problemas com Variáveis Contínuas e Altamente Restritos**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2009. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/87116>. Acesso em: 13 dez. 2024.