

## Sistema de gerenciamento de energia para baterias li-íon aplicadas em veículos elétricos

### Energy management system for li-ion batteries applied in electric vehicles

Jeferson Fraytag | <https://orcid.org/0000-0001-7664-6391>

Vinicius Guimarães Jutel

#### RESUMO

Os tradicionais veículos movidos a combustão interna utilizam combustíveis fósseis derivados do petróleo, sendo este uma fonte de energia não renovável, liberando na atmosfera gases poluentes capazes de interferir nas mudanças climáticas e contribuir para o aumento da temperatura média do planeta. Uma das possibilidades para minimizar a emissão de poluentes é a adoção de veículos com tração elétrica, que demandam sistemas de armazenamento de energia seguros, confiáveis e eficientes. No entanto, essa é apenas uma das alternativas entre diversas soluções em desenvolvimento voltadas à redução dos impactos ambientais do setor de transportes. Neste contexto, o objetivo principal deste trabalho consiste em analisar e implementar um sistema de armazenamento de energia, visando assim à definição do tipo mais eficiente para aplicações em um veículo de tração elétrica de baixo custo. Observou-se que as baterias Li-íon (íons de lítio) são atualmente as mais adequadas para este tipo de aplicação. Contudo, necessitam de um controle dedicado para proporcionar melhor desempenho, vida útil e garantia de segurança. Dessa forma, desenvolveu-se um circuito BMS (Battery Management System), responsável por gerenciar os processos de carga e descarga entre as séries de baterias. O BMS implementado demonstrou-se adequado, sendo capaz de garantir a operação satisfatória do sistema de armazenamento.

**Palavras-chave:** bateria; BMS; íons de lítio, sistema de armazenamento.

#### ABSTRACT

Conventional vehicles powered by internal combustion engines rely on fossil fuels derived from petroleum, a non-renewable energy source that releases pollutant gases into the atmosphere, contributing to climate change and the rise in the planet's average temperature. One of the possible strategies to mitigate pollutant emissions is the adoption of electric traction vehicles, which require energy storage systems that are safe, reliable, and efficient. However, this is only one among several emerging solutions aimed at reducing the environmental impact of the transportation sector. In this context, the main objective of this work is to analyze and implement an energy storage system, with the aim of identifying the most efficient type for application in a low-cost electric traction vehicle. It was observed that lithium-ion (Li-ion) batteries are currently the most suitable for this type of application. Nevertheless, they require dedicated control to ensure optimal performance, extended service life, and operational safety. To address this, a Battery Management System (BMS) circuit was developed to manage the charging and discharging processes between battery series. The implemented BMS proved to be appropriate, effectively ensuring the satisfactory operation of the storage system.

**Keywords:** battery; BMS; lithium-ion, storage system.

---

Recebido em: 15/03/2023. Aprovado em: 27/06/2025.

Avaliado pelo sistema duplo-anônimo. Publicado conforme as normas da ABNT.

DOI: <https://doi.org/10.35700/2316-8382.2025.v15.3544>

## 1 INTRODUÇÃO

Os tradicionais veículos movidos a combustão interna utilizam combustíveis fósseis derivados do petróleo, sendo este uma fonte de energia não renovável e responsável pela liberação de gases poluentes na atmosfera, os quais podem interferir nas mudanças climáticas e contribuir para o aumento da temperatura média do planeta (Chan, 2002). Uma solução para minimizar a emissão de poluentes é a utilização de veículos à base de tração elétrica, os quais demandam sistemas de armazenamento de energia cada vez mais adequados e eficientes. Nesse contexto, propõe-se uma pesquisa voltada à análise e implementação de um sistema de armazenamento de energia para veículos elétricos de baixo custo.

A maioria dos países, incluindo Estados Unidos, China, membros da União Europeia e nações da América Latina, possui uma frota de veículos terrestres predominantemente movida a combustíveis derivados do petróleo. Mais da metade do petróleo consumido pelo setor de transportes nesses locais é utilizada em veículos rodoviários, resultando na liberação de grandes quantidades de gases poluentes e nocivos ao meio ambiente (Chan, 2002). Tendo em vista o impacto significativo dos combustíveis fósseis e o aumento da preocupação com a conservação ambiental, o desenvolvimento de novas tecnologias de mobilidade vem crescendo em ritmo acelerado. Dentre essas tecnologias, destaca-se a área de pesquisa e desenvolvimento de veículos com tração elétrica. O crescimento da frota de veículos elétricos já é uma realidade em países como China, Noruega, Alemanha, Estados Unidos e Reino Unido, provocando profundas transformações na indústria automobilística e na mobilidade urbana. Segundo projeções da International Energy Agency (IEA), estima-se que até 2030 cerca de 16% da frota global de veículos de passeio será movida a energia elétrica, um avanço significativo considerando que, atualmente, esse índice representa apenas 0,2% do mercado (IEA, 2019).

A crescente demanda por mobilidade incentiva, dentre outras coisas, o desenvolvimento de estudos e aprimoramentos ligados ao sistema de armazenamento de energia, o qual representa um ponto fundamental na concepção de um veículo elétrico, influenciando diretamente as questões de eficiência e autonomia. Este tipo de veículo é composto basicamente por um ou mais motores elétricos conectados a um sistema de transmissão mecânica, além de um conjunto de sistemas responsáveis pelo controle de torque e velocidade. Tais sistemas, de modo geral, estão comumente associados a um banco de baterias, responsável por armazenar e fornecer energia ao conjunto elétrico do veículo (Kiehne, 2003). Atualmente, existem diferentes tecnologias de baterias disponíveis comercialmente, sendo que a escolha destas varia normalmente conforme a sua aplicabilidade. Contudo, outros aspectos também devem ser considerados na escolha de uma bateria, tais como: eficiência; ciclo de vida; viabilidade econômica; e densidade de energia (Andrea, 2010). Este último, por exemplo, é diretamente dependente dos materiais empregados na construção do elemento de armazenamento (Mit Electric Vehicle Team, 2008). Dentre as diferentes opções disponíveis, as de maior uso são as baterias de chumbo-ácido, níquel-cádmio (NiCd), hidreto metálico de níquel (NiMH) e as de íons de lítio (Li-íon). Cabe destacar que, além das baterias tradicionais, existem ainda sistemas de armazenamento baseados em ultracapacitores, que têm baixa densidade energética, alta densidade de potência e longo ciclo de vida (Fuchs, 2012).

O sistema de armazenamento de energia de um veículo elétrico deve possuir elevada eficiência, proporcionando autonomia e durabilidade (Linden *et al.*, 2002). Uma alternativa para isso consiste, por exemplo, na escolha de um sistema de armazenamento único ou, ainda, no emprego de sistemas híbridos que utilizam tanto baterias quanto ultracapacitores. Com isso, pode-se afirmar que a escolha correta do tipo de sistema de armazenamento de energia, bem como o projeto otimizado do mesmo, corresponde a um assunto relevante a ser estudado. Tendo em vista a crescente demanda na área de mobilidade elétrica, associada à necessidade de sistemas de armazenamento de energia adequados e eficientes, este trabalho propõe um estudo direcionado a analisar e implementar um sistema de armazenamento de energia para veículos elétricos. Para isso, serão considerados os diferentes tipos de baterias disponíveis comercialmente, analisando suas respectivas características, vantagens e desvantagens. Nessas análises, serão também considerados os sistemas eletrônicos de proteção e balanceamento de energia, visando obter maior eficiência no processo de armazenamento.

## 2 REVISÃO DE TECNOLOGIAS DA ÁREA

Existe atualmente uma grande variedade de sistemas de armazenamento de energia baseados em baterias, os quais apresentam diferentes características e aplicações. Neste contexto, desenvolveu-se uma revisão bibliográfica sobre alguns dos principais sistemas de armazenamento de energia, abordando aspectos construtivos, elétricos e energéticos, além do ciclo de vida médio de cada sistema, estabelecendo uma comparação direta entre eles. O Quadro 1 apresenta um comparativo geral que reúne as principais informações dos sistemas de armazenamento de energia analisados.

Conforme pode ser observado, as baterias de chumbo-ácido, por exemplo, possuem tensão nominal de 2,0 V por célula, com energia específica de 30 a 50 Wh/kg, sendo uma das menores entre as diferentes baterias. Essa característica torna sua aplicação inadequada para veículos elétricos, os quais demandam alta capacidade de armazenamento de energia com o menor peso e volume possível (Hannan, 2018). Já as baterias de níquel-cádmio (Ni-Cd) apresentam desempenho superior quando comparadas às de chumbo-ácido; entretanto, uma grande desvantagem é que elas sofrem o “efeito memória”, que corresponde à diminuição da capacidade de armazenar energia ao longo dos ciclos de trabalho (Battery University, 2021). Esse efeito também está presente nas baterias de níquel-metal-hidreto (Ni-MH), o que reduz drasticamente sua vida útil caso não sejam realizadas descargas profundas periódicas (Ambrosio, 2001).

Quadro 1 - Comparativo geral entre os principais tipos de baterias analisadas.

Tipo de Bateria	Tensão Nominal (V)	Energia Específica (Wh/kg)	Resistência Interna (mΩ)	Ciclos de Vida	Principais Características
Chumbo Ácido	2	30 a 50	≤ 7mΩ	200 a 300	Relativamente barata e com baixa autodescarga. Utiliza materiais tóxicos, baixa energia específica e tensão nominal, alto tempo de recarga, baixo ciclo de vida para descargas profundas
Ni-Cd	1,2	45 a 80	≤ 25mΩ	1500	Alto ciclo de vida, baixo tempo de recarga, operação segura. Utiliza materiais tóxicos, efeito memória, baixa

					energia específica e tensão nominal, autodescarga alta.
Ni-MH	1,2	60 a 120	≤ 25mΩ	300 a 500	Não utiliza materiais tóxicos, energia específica moderada, baixo tempo de recarga. Efeito memória, baixa tensão nominal, ciclo de vida limitado, autodescarga elevada.
Li-íon LFP	3,2	90 a 120	≤ 20mΩ	1000 a 2000	Suporta alta corrente de carga, alto ciclo de vida, não utiliza materiais tóxicos, preço menor comparado a outras Li-íon. Energia específica moderada, menor tensão por célula entre as Li-íon analisadas.
Li-íon NMC	3,6	150 a 220	≤ 25mΩ	1000 a 2000	Alta energia específica, alto ciclo de vida, alta tensão por célula. Utiliza materiais tóxicos; alto custo.
Li-íon NCA	3,6	200 a 260	≤ 20mΩ	500	Alta energia específica, maior potência específica entre as li-íon, alta tensão por célula. Utiliza materiais tóxicos; alto custo, maior risco de segurança.

Fontes: Linden (2002); Omar (2010); Brand (2013); Hannan (2018); Ziegler e Trancik, (2021).

Considerando o propósito inicial deste trabalho, conclui-se que as características apresentadas pelas baterias de íons de lítio (Li-íon) as tornam mais favoráveis para aplicação em veículos de tração elétrica, visto que esse tipo de bateria possui alta densidade de energia e não apresenta o efeito memória. Assim, essa tecnologia será explorada com mais detalhes.

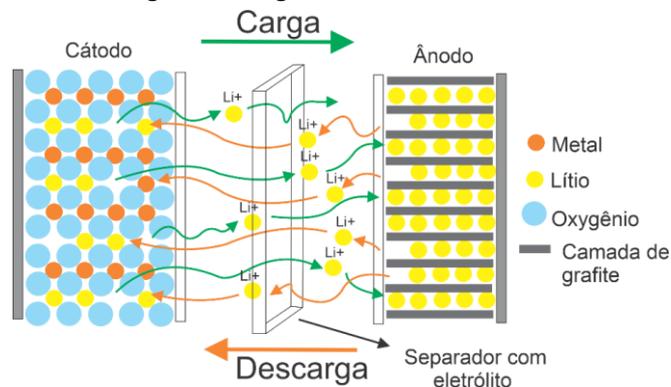
## 2.1 Baterias de íons de lítio

As baterias de íons de lítio (Li-íon) são a tecnologia mais avançada para aplicações que demandam grande armazenamento de energia, alta potência, baixo peso e volume reduzido. A comercialização de baterias recarregáveis de lítio teve início em 1991, quando foram desenvolvidas pela Sony e aplicadas inicialmente nos telefones celulares produzidos pela empresa (Ziegler; Trancik, 2021). Atualmente, as baterias de íons de lítio são encontradas em muitos dispositivos portáteis, como smartphones, relógios, notebooks, tablets, ferramentas elétricas, entre outros. Devido à constante evolução tecnológica, existem muitos tipos de baterias de íons de lítio, com diferentes materiais utilizados em sua composição química, o que altera suas características energéticas, tornando-as versáteis para diversas aplicações (IEEE, 2025). No setor de transporte rodoviário, por exemplo, as baterias de íons de lítio tornaram os veículos elétricos mais eficientes, sendo capazes de percorrer longas distâncias com apenas uma carga.

A célula de Li-íon é formada por um cátodo de lítio-metal-óxido, com variações nos metais utilizados, e um ânodo composto por grafite e lítio dispostos em camadas, possibilitando o armazenamento dos íons de lítio. O eletrólito deste tipo de bateria é formado por sais de lítio dissolvidos em solvente orgânico. Em células com eletrólito líquido, um separador microporoso, normalmente feito de polietileno ou polipropileno, é colocado entre os eletrodos para evitar curtos-circuitos. Já as baterias do tipo Li-íon polímero utilizam eletrólito em gel, que permite a passagem dos

íons de lítio e faz o isolamento dos eletrodos positivo e negativo. A Figura 1 apresenta o deslocamento dos íons de lítio no processo de carga e descarga de uma célula (Linden *et al.*, 2002).

Figura 1 - Passagem de íons de lítio no processo de carga e descarga de uma célula.



Fonte: Adaptado de Hannan (2018).

Apesar das vantagens descritas anteriormente, as baterias de íons de lítio (Li-íon) apresentam riscos se forem utilizadas fora de sua área de operação segura. Dessa forma, faz-se necessária a utilização de um sistema de gerenciamento, comumente chamado de BMS (Battery Management System), capaz de evitar que esse tipo de bateria tenha redução da vida útil ou sofra degradação superior à projetada, além de mitigar os riscos associados a um evento de pior caso, como, por exemplo, uma explosão. A Figura 2 apresenta uma bateria do tipo bolsa com inchaço excessivo, a qual estava em uso fora das recomendações técnicas.

Figura 2 - Inchaço excessivo de uma bateria Li-íon tipo bolsa para notebooks.



Fonte: PCMAG (2021).

## 2.2 Battery Management System

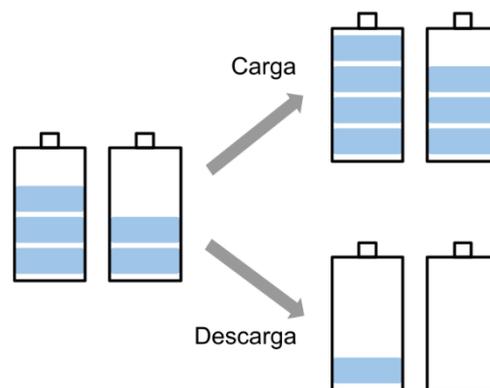
O BMS (Battery Management System) é o sistema de gerenciamento da bateria, com a função de torná-la segura e mais eficiente. Esse componente tem grande influência no desempenho das baterias, principalmente em veículos elétricos ou híbridos, que possuem uma característica de uso agressivo da bateria (Krishna, 2024). A partir do monitoramento de tensão, corrente e temperatura, o BMS controla a bateria, evitando problemas como sobrecargas, subcargas, correntes acima do

permitido, temperaturas elevadas, além de equilibrar a tensão de cada célula da bateria (Xing *et al.*, 2011), (Binsalim *et al.*, 2024). Além disso, o BMS pode ser utilizado para medir a saúde da bateria, estimando a quantidade de carga total que ainda pode ser armazenada ao longo de sua vida útil.

### 2.3 Balanceamento de Carga

O balanceamento de carga é necessário para evitar sobrecargas ou subcargas nas células das baterias de Li-íon, visto que essas podem apresentar divergências entre si. Essas diferenças tornam-se evidentes após ciclos de carga e descarga, ou com o passar do tempo, devido ao envelhecimento. A Figura 3 exemplifica o processo de carga e descarga para duas células, no qual o carregamento da bateria ocorre até que uma das células atinja a carga máxima (100%), independentemente de quantas o atinjam simultaneamente. Em um sistema alimentado por duas células, a operação será encerrada assim que a primeira for totalmente carregada. Caso o processo continue, essa célula sofrerá sobrecarga e, conseqüentemente, a vida útil será reduzida ou ela se tornará inutilizável. Esse problema também será observado durante a descarga das células (Ricart, 2015).

Figura 3 - Esquema ilustrando o ciclo de carga e descarga em baterias com células desbalanceadas.



Fonte: Autoria própria.

Como solução para garantir uma carga e descarga completas do sistema de maneira segura, diversos métodos de balanceamento foram desenvolvidos. As formas de realizar esse balanceamento dividem-se basicamente em passivos e ativos. O balanceamento passivo utiliza resistores para dissipar a energia excedente, enquanto o balanceamento ativo transfere a energia excedente de uma célula para outra com menor carga, por meio de capacitores, indutores e transformadores. O controle ativo tem a vantagem de apresentar menores perdas de energia no processo de balanceamento; entretanto, seu projeto e implementação são mais complexos em comparação com a técnica passiva.

### 3 DESENVOLVIMENTO DO BMS

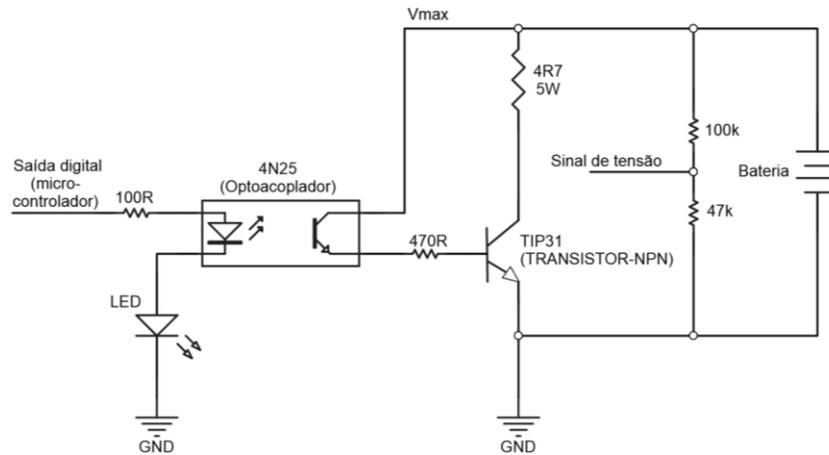
Neste trabalho, é realizado o desenvolvimento de um BMS do tipo centralizado com balanceamento passivo, devido à maior simplicidade e aos menores custos envolvidos nesse tipo de sistema. As funções do BMS implementadas são: monitoramento de tensão, corrente, temperatura e balanceamento de carga. Essas funções são executadas por diferentes sistemas eletrônicos, gerenciados por um microcontrolador. O banco de baterias utilizado é composto por seis células, ligadas em três paralelos e duas séries (3p2s).

#### 3.1 Circuito de Balanceamento

O circuito de balanceamento tem como objetivo equalizar as tensões entre as células ou séries de células durante o processo de carga do banco de baterias. Esse equilíbrio é essencial para evitar que uma ou mais séries ultrapassem o limite de tensão seguro antes que as demais estejam completamente carregadas, o que poderia comprometer a durabilidade e a segurança do sistema. O balanceamento é realizado por meio da dissipação controlada de energia das séries que atingem tensão superior ao valor nominal. Para isso, são utilizados resistores de potência devidamente dimensionados, capazes de descarregar a energia excedente da célula ou série até que sua tensão retorne ao valor nominal. Esse processo ocorre de forma automática durante a carga, garantindo que todas as séries atinjam o mesmo nível de tensão ao final, promovendo maior eficiência e vida útil ao conjunto de baterias.

A Figura 4 ilustra o circuito de balanceamento adotado. Nesse sistema, a descarga da bateria é acionada por um sinal digital proveniente de um microcontrolador, que polariza o transistor TIP31 até a saturação, fechando o circuito de descarga através de um resistor de potência de 4,7  $\Omega$  e 5 W. Esse resistor é responsável por limitar a corrente drenada, assegurando a proteção tanto da bateria quanto dos demais componentes do circuito. Simultaneamente, a tensão da bateria é monitorada de forma contínua por meio de um divisor resistivo composto por resistores de 100 k $\Omega$  e 47 k $\Omega$ . Esse divisor reduz a tensão a um nível adequado para leitura por uma entrada analógica do microcontrolador. O sinal resultante, identificado como "Sinal de tensão", permite avaliar o estado da bateria e, quando necessário, interromper automaticamente a descarga ao se atingir uma tensão mínima segura, preservando a integridade do sistema.

Figura 4 - Circuito de balanceamento utilizado para cada célula de bateria.



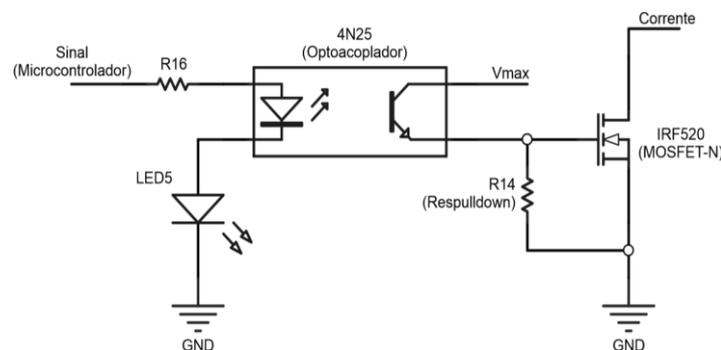
Fonte: Autoria própria.

### 3.2 Circuito de Carga/Descarga

O circuito apresentado na Figura 5 tem como função controlar o fluxo de corrente entre uma fonte e o banco de baterias (durante a carga) ou das baterias para outro sistema (durante a descarga). Esse controle é realizado por meio de um MOSFET do tipo IRF520, que atua como uma chave eletrônica. A corrente de carga/descarga é monitorada continuamente por um sensor de efeito Hall, modelo ACS712. Em caso de sobrecarga, o sistema interrompe o sinal de controle, desativando o MOSFET e cessando o fluxo de corrente, protegendo assim os componentes do circuito.

Esse controle é essencial para garantir o funcionamento seguro do banco de baterias, sendo que a carga deve ser interrompida quando o nível máximo de energia for atingido, e a descarga deve cessar ao se atingir o limite mínimo permitido. Sensores adicionais de temperatura são empregados para monitorar em tempo real o estado das células e garantir a operação dentro dos limites seguros.

Figura 5 - Circuito de carga/descarga do sistema de gerenciamento.

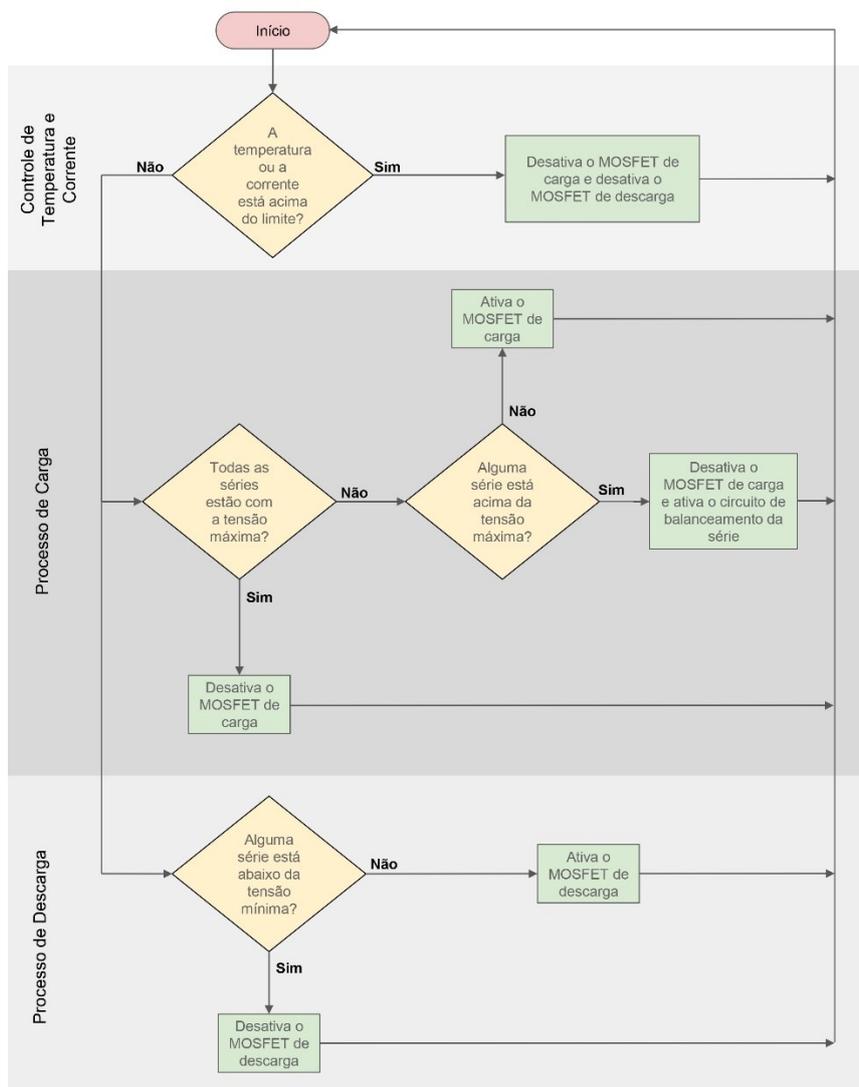


Fonte: Autoria própria.

### 3.3 Fluxograma de Operação

O algoritmo de gerenciamento empregado no sistema pode ser analisado por meio do fluxograma da Figura 6, que é responsável por controlar os processos de carga e descarga, considerando os limites de operação das baterias. De modo geral, observa-se que a carga é desligada quando as baterias atingem sua tensão máxima, além de ser aplicado o balanceamento das baterias caso alguma delas atinja o valor máximo de tensão antes das outras células do conjunto. No processo de descarga, ocorre apenas o corte caso alguma bateria do conjunto atinja o valor mínimo de tensão.

Figura 6 - Fluxograma de funcionamento do algoritmo empregado aos sistemas de carga e descarga.



Fonte: Autoria própria.

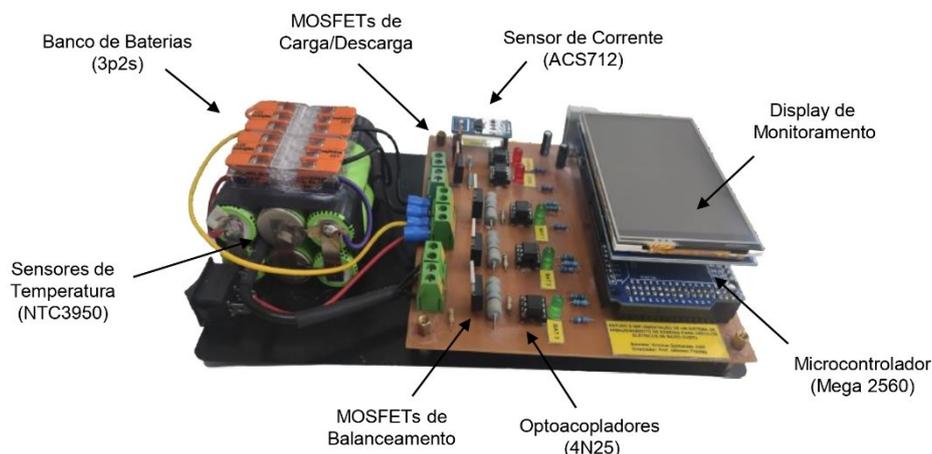
Caso uma situação de superaquecimento ocorra, o sistema desativa tanto a carga quanto a descarga como medida de proteção. Contudo, esse estado é temporário. O sistema de gerenciamento de baterias (BMS) opera em loop contínuo, monitorando constantemente os valores de temperatura, corrente e tensão. Assim que a temperatura retornar a níveis seguros, conforme os parâmetros definidos no algoritmo para o tipo específico de bateria, o processo de carga é automaticamente reativado. Dessa forma, as baterias que ainda não atingiram o nível de carga completo continuarão a receber carga normalmente após o restabelecimento das condições seguras, garantindo que todas atinjam seu nível ideal de carga. Isso assegura tanto a proteção do sistema quanto o pleno carregamento das células.

## 4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

O desenvolvimento experimental foi baseado em um banco de baterias de íons de lítio (modelo 18650) com três células em paralelo e duas em série (3p2s). As células de armazenamento apresentam limites de tensão entre 2,5 V (tensão mínima) e 4,2 V (tensão máxima), com valor nominal de 3,7 V e capacidade de 2.200 mAh cada (Hannan, 2018).

As medições instantâneas de tensão foram realizadas utilizando as entradas analógicas de um microcontrolador, onde o sistema de controle foi programado para monitorar continuamente as tensões, corrente e temperatura, aplicando os limites de operação conforme o tipo de bateria. Os dados foram registrados ao longo do tempo e os gráficos foram gerados a partir dessas leituras. A Figura 7 apresenta o protótipo do sistema de gerenciamento desenvolvido experimentalmente.

Figura 7 - Protótipo do BMS desenvolvido experimentalmente.

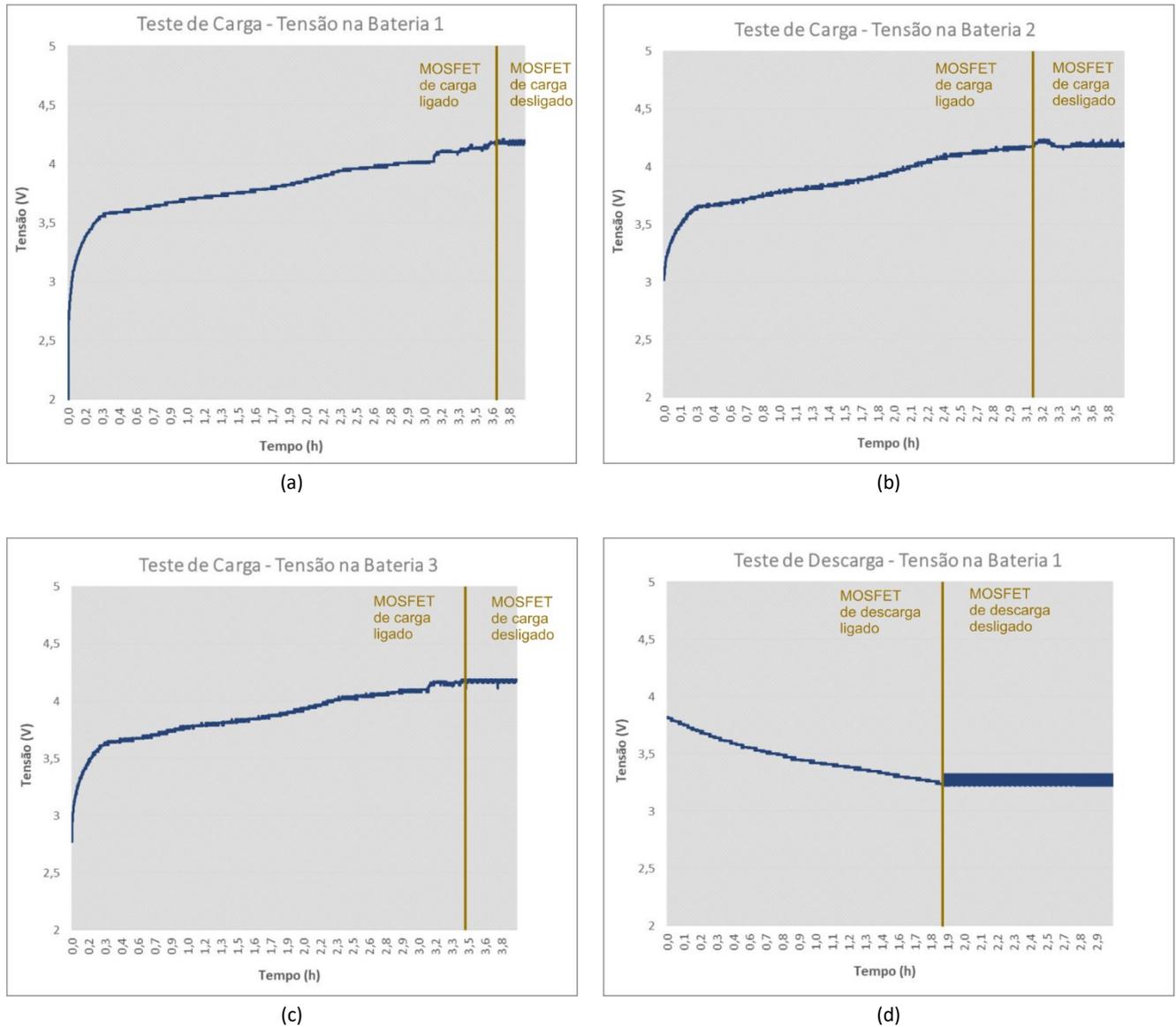


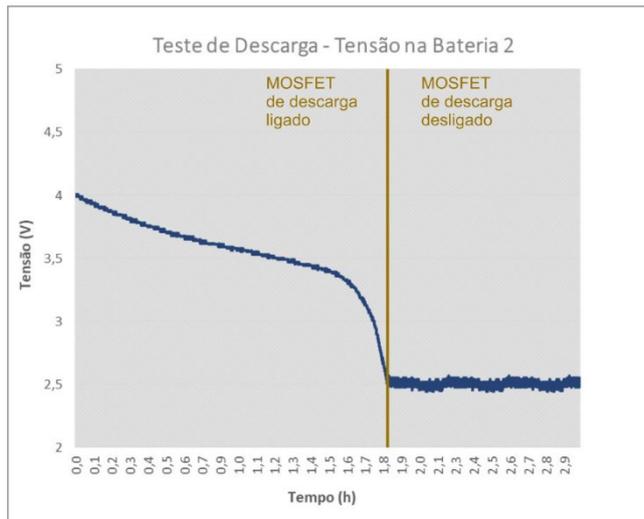
Fonte: Autoria própria.

## 4.1 Testes de Carga e Descarga

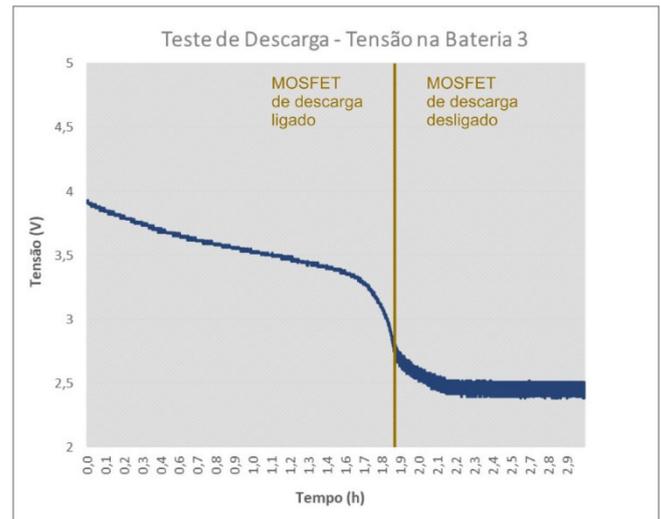
A Figura 8 apresenta os gráficos de tensão instantânea das baterias durante os processos de carga (gráficos a, b, c) e descarga (gráficos d, e, f), permitindo a avaliação do comportamento dinâmico do sistema de gerenciamento (BMS) frente ao controle de tensão e atuação dos MOSFETs.

Figura 8 - Tensão instantânea das baterias nos processos de carga (a, b, c) e descarga (d, e, f).





(e)



(f)

Fonte: Autoria própria.

Nos testes de carga (a, b, c), observa-se um aumento gradual da tensão em cada uma das baterias até atingir o valor limite estabelecido no algoritmo de controle (4,2 V). No ponto indicado nos gráficos, ocorre a desativação do MOSFET de carga, demonstrando que o sistema identificou corretamente a condição de tensão máxima e respondeu de forma adequada, interrompendo a carga para evitar sobrecarga. O comportamento das três baterias é consistente, validando o funcionamento do BMS quanto ao desligamento seguro após o limite superior de tensão ser alcançado.

Nos testes de descarga (d, e, f), verifica-se inicialmente uma redução progressiva da tensão nas baterias com o MOSFET de descarga ativado. Quando a tensão atinge o valor mínimo de operação definido, o MOSFET de descarga é desativado, interrompendo o processo de descarga. Este comportamento é claramente visível nos gráficos, onde a queda de tensão é interrompida abruptamente após a atuação do BMS. A resposta do sistema indica que a proteção contra descarga profunda está operando corretamente, evitando danos às células.

Com isso, observa-se que os resultados experimentais confirmam a efetividade do BMS desenvolvido quanto à proteção dos limites de operação das baterias. A atuação precisa dos MOSFETs nos pontos de tensão definidos demonstra que o sistema é capaz de garantir a integridade das células durante os ciclos de carga e descarga. Mesmo sendo um protótipo em pequena escala, os testes validam seu desempenho e indicam viabilidade para aplicação em sistemas de maior porte, desde que devidamente ajustado.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou uma análise comparativa das principais tecnologias de armazenamento de energia, com foco nas baterias de íons de lítio, evidenciando suas vantagens em termos de eficiência, segurança e sustentabilidade para aplicações em veículos elétricos. Dentre os aspectos técnicos abordados, destaca-se a necessidade do uso de estratégias de balanceamento,

fundamentais para manter as tensões entre as células dentro de limites seguros, evitando perdas de capacidade e promovendo maior durabilidade e desempenho do sistema.

O protótipo de BMS desenvolvido e testado neste estudo demonstrou, ainda que em escala reduzida, a viabilidade do controle de carga, descarga e balanceamento de forma eficaz. Os testes realizados validaram a funcionalidade do sistema, apontando para seu potencial de aplicação em sistemas maiores, desde que devidamente dimensionado. A característica modular da solução proposta favorece sua adaptação a diferentes configurações de bancos de baterias, garantindo flexibilidade, escalabilidade e equilíbrio entre custo e confiabilidade.

Assim, conclui-se que a escolha criteriosa da tecnologia de baterias, associada à implementação de sistemas de gerenciamento robustos e eficientes, é um fator essencial para o avanço da mobilidade elétrica. Tais soluções tecnológicas não apenas elevam a segurança operacional e a eficiência energética, como também fortalecem a transição energética ambientalmente responsável e alinhada aos princípios da sustentabilidade.

## REFERÊNCIAS

AMBROSIO, Renato Canha; TICIANELLI, Edson Antonio. Baterias de níquel-hidreto metálico, uma alternativa para as baterias de níquel-cádmio. **Química Nova**, v. 24, n. 2, p. 243–246, 2001.

ANDREA, D. **Battery Management System for Large Lithium-Ion Battery Packs**. Boston: Artech House, 2010.

BATTERY UNIVERSITY. **What's the best battery?** Disponível em: <https://batteryuniversity.com/article/whats-the-best-battery>. Acesso em: 17 nov. 2021.

BINSALIM, H. *et al.* Battery management system for enhancing the performance and safety of lithium-ion batteries. *In: LEARNING AND TECHNOLOGY CONFERENCE (L&T)*, 21., 2024. **Proceedings** [...]. Arábia Saudita: Effat University, 2024.

BRAND, Martin *et al.* Electrical safety of commercial Li-ion cells based on NMC and NCA technology compared to LFP technology. **World Electric Vehicle Journal**, v. 6, n. 3, p. 572–580, 2013.

CHAN, C. C. The state of the art of electric and hybrid vehicles. **Proceedings of the IEEE**, v. 90, n. 2, p. 247–275, fev. 2002.

FUCHS, G. **Technology Overview on Electricity Storage**. Aachen: ISEA - Aachen University, 2012.

HANNAN, Mahammad A. *et al.* State-of-the-art and energy management system of lithium-ion batteries in electric vehicle applications: Issues and recommendations. **IEEE Access**, v. 6, p. 19362–19378, 2018.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Global EV Outlook 2019 – Scaling up the Transition to Electric Mobility**. 2019. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2019>. Acesso em: 17 nov. 2021.

IEEE POWER AND ENERGY SOCIETY. **IEEE Guide for the Characterization and Evaluation of Lithium-Based Batteries in Stationary Applications (IEEE 1679.1-2025)**. New York: IEEE, 2025.

KIEHNE, H. A. **Battery Technology Handbook**. 2. ed. New York: Marcel Dekker, Inc., 2003.

KRISHNA, T. N. V. *et al.* Powering the future: advanced battery management systems (BMS) for electric vehicles. **Energies**, v. 17, n. 14, p. 3360, jul. 2024.

LINDEN, David *et al.* **Handbook of Batteries**. 3. ed. rev. New York: McGraw-Hill, 2002.

MIT ELECTRIC VEHICLE TEAM. **A Guide to Understanding Battery Specifications**. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2008.

OMAR, Noshin *et al.* Evaluation of performance characteristics of various lithium-ion batteries for use in BEV application. *In*: IEEE VEHICLE POWER AND PROPULSION CONFERENCE (VPPC), 2010, Lille, France. **Proceedings** [...]. Lille, France: IEEE, 2010. p. 1–6.

PCMAG. **Help, my laptop battery is swollen! Now what?** Disponível em: <https://www.pcmag.com/how-to/help-my-laptop-battery-is-swollen-now-what>. Acesso em: 17 nov. 2021.

RICART, I. A. M. **Implementação e avaliação do balanceamento integrado em baterias de íon-lítio**. 2015. Projeto de Graduação – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

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

ZIEGLER, Micah S.; TRANCIK, Jessika E. Re-examining rates of lithium-ion battery technology improvement and cost decline. **Energy & Environmental Science**, v. 14, n. 4, p. 1635–1651, 2021.