

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

YARA KAROLINE GARCIA

**Estudo da viabilidade técnica de substituição das células
do banco de baterias de Íon-Lítio do veículo
Mitsubishi i-MiEV - ano 2010**

FLORIANÓPOLIS, 2026.

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

YARA KAROLINE GARCIA

**Estudo da viabilidade técnica de substituição das células
do banco de baterias de Íon-Lítio do veículo
Mitsubishi i-MiEV - ano 2010**

Pré-projeto do Trabalho de Conclusão de
Curso submetido ao Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia de Santa
Catarina como parte dos requisitos para
aprovação na unidade curricular TCC22009.

Orientador:
Prof. Adriano de Andrade Bresolin, Dr. Eng.

FLORIANÓPOLIS, 2026.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Garcia, Yara Karoline
ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA DE SUBSTITUIÇÃO
DAS CÉLULAS DO BANCO DE BATERIAS DE ÍON-LÍTIO DO
VEÍCULO MITSUBISHI i-MiEV - ANO 2010 / Yara Karoline
Garcia; orientação de Adriano de Andrade Bresolin.
- Florianópolis, SC, 2026.

79 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal
de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado
em Engenharia Elétrica. Departamento Acadêmico
de Eletrotécnica.

Inclui Referências.

1. Células de Íon Lítio. 2. Veículos Elétricos.
3. Banco de Baterias. I. Bresolin, Adriano de Andrade.
II. Instituto Federal de Santa Catarina. III. ESTUDO DE
VIABILIDADE TÉCNICA DE SUBSTITUIÇÃO DAS CÉLULAS
DO BANCO DE BATERIAS DE ÍON-LÍTIO DO VEÍCULO
MITSUBISHI i-MiEV - ANO 2010.

**ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA DE SUBSTITUIÇÃO DAS
CÉLULAS DO BANCO DE BATERIAS DE ÍON-LÍTIO DO VEÍCULO
MITSUBISHI I-MIEV - ANO 2010**

YARA KAROLINE GARCIA

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro(a) Eletricista e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis 23 de julho, 2026.

Banca Examinadora:

Adriano de Andrade Bresolin, Dr. Eng

Prof. Andre Luiz Fuerback, Dr. Eng IFSC

Prof. Daniel Godoy Costa, Msc. Eng. IFSC

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), por meio do projeto CELESC/IFSC - "Converte II: Inserção de veículos elétricos na frota pública através da conversão de veículos comerciais leves" - convênio nº PD-05697-0124/2024.

A autora agradece o apoio do Programa de P&D da ANEEL e da concessionária de energia CELESC (Centrais Elétricas de Santa Catarina) pelo suporte ao projeto de pesquisa e desenvolvimento denominado Converte II, do qual participei como aluna/pesquisadora.

RESUMO

O crescimento da mobilidade elétrica estimulou o desenvolvimento de sistemas de armazenamento cada vez mais eficientes, tornando as baterias de íon-lítio componentes fundamentais para o desempenho e a autonomia dos veículos elétricos, devido à sua elevada densidade energética, boa eficiência e capacidade de proporcionar níveis satisfatórios de autonomia. Entretanto, assim como ocorre em qualquer sistema eletroquímico, essas baterias estão sujeitas a processos de degradação ao longo do tempo. O envelhecimento natural das células e a repetição dos ciclos de carga e descarga resultam na redução gradual da capacidade de armazenamento de energia, impactando diretamente o desempenho e a autonomia do veículo. Diante desse cenário, o presente trabalho teve como objeto de estudo o sistema de baterias de um veículo elétrico Mitsubishi i-MiEV, ano 2010, pertencente à frota da CELESC (Centrais Elétricas de Santa Catarina). O objetivo principal consistiu em analisar detalhadamente a arquitetura elétrica do conjunto de baterias, os sistemas responsáveis pelo monitoramento e gerenciamento das células e os procedimentos necessários para a substituição do banco de baterias original. Inicialmente, foi realizado um levantamento bibliográfico abordando a evolução histórica das baterias, os princípios de funcionamento da tecnologia de íons de lítio, os sistemas de gerenciamento de baterias (BMS) e as unidades de monitoramento (BMU), bem como os principais mecanismos de degradação observados em aplicações voltadas à mobilidade elétrica. Na etapa seguinte, foi efetuada a desmontagem do banco de baterias do veículo, permitindo a análise de sua estrutura interna, dos dispositivos de proteção empregados e da disposição dos módulos que compõem o conjunto. Com base nas informações obtidas durante essa análise, foi desenvolvido o dimensionamento de um novo banco de baterias. A proposta consistiu na utilização de células com tensão nominal compatível com o sistema original e dimensões adequadas para a instalação no compartimento existente, porém com capacidade de armazenamento superior. Dessa forma, buscou-se aumentar a quantidade de energia disponível sem comprometer a compatibilidade com os sistemas eletrônicos originalmente instalados no veículo. Os resultados obtidos demonstraram que a substituição das células apresenta viabilidade técnica, preservando a arquitetura elétrica original e mantendo a comunicação com os sistemas de gerenciamento do veículo. Os cálculos realizados indicaram um aumento significativo da capacidade energética do banco de baterias, contribuindo para a ampliação da autonomia operacional do Mitsubishi i-MiEV. Além disso, procurou-se documentar detalhadamente os procedimentos de desmontagem, inspeção e análise do sistema, constituindo uma referência técnica que poderá auxiliar futuras intervenções e estudos relacionados a veículos elétricos com características semelhantes.

Palavras-chave: Células de Íon Lítio. Veículos Elétricos. Banco de Baterias.

ABSTRACT

The growth of electric mobility has driven the development of increasingly efficient energy storage systems, making lithium-ion batteries essential components for the performance and driving range of electric vehicles due to their high energy density, good efficiency, and ability to provide satisfactory autonomy. However, like any electrochemical system, these batteries are subject to degradation over time. The natural aging of the cells and the repeated charge-discharge cycles gradually reduce their energy storage capacity, directly affecting vehicle performance and driving range. In this context, the present study focuses on the battery system of a 2010 Mitsubishi i-MiEV electric vehicle belonging to the fleet of Centrais Elétricas de Santa Catarina (CELESC). The main objective was to conduct a detailed analysis of the battery pack electrical architecture, the systems responsible for cell monitoring and management, and the procedures required to replace the original battery pack. Initially, a literature review was carried out covering the historical development of batteries, the operating principles of lithium-ion technology, Battery Management Systems (BMS), Battery Monitoring Units (BMU), and the main degradation mechanisms associated with electric mobility applications. Subsequently, the vehicle's battery pack was dismantled, allowing the evaluation of its internal structure, protection devices, and module arrangement. Based on the information obtained during this analysis, a new battery pack was designed. The proposed solution consisted of using cells with a nominal voltage compatible with the original system and dimensions suitable for installation in the existing compartment, but with a higher energy storage capacity. The aim was to increase the amount of available energy while maintaining compatibility with the vehicle's original electronic systems. The results demonstrated the technical feasibility of replacing the cells while preserving the original electrical architecture and maintaining communication with the vehicle's battery management systems. The calculations performed indicated a significant increase in the battery pack's energy capacity, contributing to an improvement in the operational driving range of the Mitsubishi i-MiEV. Furthermore, this study provides detailed documentation of the battery pack disassembly, inspection, and analysis procedures, serving as a technical reference for future interventions and studies involving electric vehicles with similar characteristics.

Keywords: Lithium-ion Cells. Electric Vehicles. Battery Pack.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Pilha criada por Alessandro Volta	17
Figura 2 – Modelo da pilha criada por Daniell	18
Figura 3 – Pilha de lítio/dióxido de manganês.....	23
Figura 4 – Princípio de funcionamento baterias de Íon Lítio	24
Figura 5 – Veículo elétrico Mitsubishi i-MiEV	41
Figura 6 – Estado de Conservação do i-MiEV - Recebimento no EMoL	43
Figura 7 – i-MiEV - Bateria de tração	45
Figura 8 – Telas do Scanner: Estado das células de cada pack da bateria	46
Figura 9 – Localização do banco de baterias sob o assoalho do i-MiEV	49
Figura 10 – Localização da porta OBD-II utilizada para diagnóstico do veículo	51
Figura 11 – <i>High Voltage Disconnect</i> (HVD)	52
Figura 12 – Banco de baterias instalado sob o veículo depois da remoção.....	52
Figura 13 – Remoção dos cabos e barras laterais da carcaça.....	53
Figura 14 – Vista geral do interior do banco de baterias após a abertura	54
Figura 15 – Sistema de gerenciamento térmico localizado sobre os <i>packs</i> dianteiros	55
Figura 16 – Dispositivos de proteção elétrica e conexões de potência	56
Figura 17 – Barramentos de interligação e componentes associados ao sistema HVD	56
Figura 18 – Módulos de monitoramento, conectores e chicotes de comunicação	57
Figura 19 – Etapas iniciais da desmontagem dos <i>packs</i> de baterias	58
Figura 20 – Desconexão dos módulos de monitoramento e terminais de potência ..	59
Figura 21 – Placas eletrônicas de monitoramento e conexões internas do pack	60
Figura 22 – Comparação da energia armazenada entre as configurações original e proposta	68
Figura 23 – Comparação da capacidade nominal das células utilizadas nas configurações original e proposta	68
Figura 24 – Comparação entre a autonomia original e a autonomia estimada para a configuração proposta.....	69

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BMS	<i>Battery Management System</i>
BMU	<i>Battery Monitoring Unit</i>
CC	Corrente Contínua
CELESC	Centrais Elétricas de Santa Catarina
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
EMoL	Laboratório de Eletromobilidade
HC	Hidrocarbonetos
HVD	<i>High Voltage Disconnect</i>
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IFSC	Instituto Federal de Santa Catarina
LFP	<i>Lithium Iron Phosphate</i>
LiFePO ₄	Fosfato de ferro-lítio
NMC	Níquel-Manganês-Cobalto
NOx	Óxidos de Nitrogênio
OBD-II	<i>On-Board Diagnostics II</i>
SEI	<i>Solid Electrolyte Interphase</i>
SoC	<i>State of Charge</i>
SoH	<i>State of Health</i>
UPS	<i>Uninterruptible Power Supply</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	Justificativa	11
1.2	Definição do Problema	12
1.3	Objetivos.....	12
1.3.1	Objetivo Geral	12
1.3.2	Objetivos Específicos	13
1.4	Estrutura do Trabalho.....	13
2	HISTÓRICO DAS BATERIAS	16
2.1	A Pilha de Daniell (1836).....	18
2.2	Pilhas de Grove (1839).....	19
2.2.1	Célula de Combustível (1839).....	20
2.3	Bateria de Gaston Planté (1859)	20
2.4	Baterias de Lítio (1960)	21
2.5	Baterias de Íon Lítio (1986).....	23
2.5.1	Baterias de Lítio Fosfato de Ferro (LFP).....	26
3	FUNDAMENTOS DOS SISTEMAS DE BATERIAS DE ÍON-LÍTIO	27
3.1	Configurações dos Bancos de Baterias.....	28
3.1.1	Associação em Série	29
3.1.2	Associação em Paralelo.....	29
3.1.3	Associação em Série-Paralelo	30
3.2	Gerenciamento de Baterias (<i>Battery Management System – BMS</i>).....	31
3.3	Unidade de Monitoramento de Baterias (<i>Battery Monitoring Unit – BMU</i>)	33
3.4	Carga e Descarga das Baterias de Íon-Lítio	35
3.5	Processos de Degradação das Baterias de Íon-Lítio	37
4	DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA	40
4.1	Características do Mitsubishi i-MiEV	41
4.2	Análise do veículo i-MiEV - Mitsubishi	43
4.3	A bateria do veículo i-MiEV - Mitsubishi	44
4.4	Desmontagem e Caracterização do Banco de Baterias.....	47
4.4.1	Configuração Geral do Sistema	48
4.4.2	Remoção do Banco de Baterias.....	50
4.4.3	Abertura da Carcaça e Inspeção Inicial do Banco de Baterias	53
4.4.4	Desmontagem dos Componentes Internos do Banco de Baterias	54
4.4.5	Remoção dos <i>Packs</i> e Levantamento das Informações de Projeto	58
4.5	Análise das células originais	61
4.6	Dimensionamento do novo banco de baterias	63
4.7	Compatibilidade com BMS e BMU	65
4.8	Estimativa de ganho de autonomia	66
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	71
	REFERÊNCIAS	75

1 INTRODUÇÃO

Um dos grandes problemas mundiais é a emissão de CO₂ na atmosfera, o que é considerado um dos grandes causadores dos efeitos estufa e suas consequências climáticas. Diversas soluções têm sido apresentadas em todo o mundo visando a redução das emissões de CO₂. Uma alternativa já presente em muitos países, seria a substituição dos veículos movidos à combustíveis fósseis por veículos com baixa emissão de poluentes.

A transição energética vem ocorrendo cada vez de forma mais rápida, impulsionada tanto pelas metas climáticas globais quanto pelas diretrizes estabelecidas na COP28, que apontam a necessidade de triplicar a capacidade de geração através de fontes renováveis até 2030. No entanto, não se trata apenas de ampliar a oferta de energia, é preciso garantir que o sistema elétrico opere com maior flexibilidade e segurança. Nesse contexto, o armazenamento por meio de baterias assume um papel estratégico ao contribuir para a integração de fontes renováveis intermitentes, reduzindo perdas de geração e melhorando a confiabilidade no controle da rede elétrica (RENEWABLE ENERGY AGENCY, 2025).

Paralelamente, a crescente preocupação com a sustentabilidade tem promovido transformações significativas no setor automotivo. Nesse cenário, os veículos elétricos ganham destaque como uma alternativa viável para a redução das emissões nos sistemas de mobilidade. Conforme a Agência Internacional de Energia, esses veículos apresentam elevado potencial para a descarbonização, principalmente quando associados ao uso de fontes renováveis (RENEWABLE ENERGY AGENCY, 2025). Dessa forma, as baterias de íon-lítio assumem papel central, uma vez que se destacam pela elevada densidade de energia, boa eficiência e por sua capacidade de recarga (GÜNTHER, 2017).

Com o passar do tempo e após vários ciclos de uso, essas baterias sofrem um processo natural de desgaste, que resulta na redução da capacidade e no aumento da resistência interna. No contexto automotivo, considera-se que baterias com cerca de 80% da capacidade original já não atendem totalmente às exigências dos veículos elétricos. Ainda assim, elas podem continuar sendo utilizadas em outras aplicações, especialmente em sistemas estacionários de armazenamento de energia, prática conhecida como “segunda vida” (GAO et al., 2024a).

Os avanços alcançados pela tecnologia de íons de lítio ao longo dos últimos anos permitiram o desenvolvimento de células com maior capacidade de armazenamento de energia, melhor eficiência e desempenho superior quando comparadas às tecnologias disponíveis na época em que muitos dos primeiros veículos elétricos foram fabricados (KURZWEIL, 2010). Como consequência, tornou-se possível avaliar a substituição dos bancos de baterias originais por novas células eletricamente compatíveis, mas capazes de armazenar uma quantidade significativamente maior de energia. Essa alternativa pode proporcionar aumento da autonomia do veículo sem a necessidade de modificações expressivas em sua arquitetura elétrica original, desde que sejam mantidas as características elétricas fundamentais do sistema, especialmente a tensão nominal e a compatibilidade com os sistemas de gerenciamento existentes (COWONTECH, 2021).

Entretanto, a implementação dessa solução exige um conhecimento detalhado das características construtivas e elétricas do sistema de baterias original. Além disso, é fundamental compreender suas limitações operacionais e os requisitos necessários para garantir a compatibilidade com os sistemas de monitoramento e gerenciamento das baterias, responsáveis pela segurança, proteção e correto funcionamento do conjunto (PLETT, 2015).

Diante desse contexto, o presente trabalho tem como objetivo estudar o banco de baterias de um veículo elétrico Mitsubishi i-MiEV 2010, pertencente à frota da CELESC. Para isso, será realizada a desmontagem do conjunto de baterias, permitindo a análise de sua estrutura interna, dos componentes que o constituem e das principais características elétricas do sistema original. Também será elaborado um procedimento técnico para a abertura do *pack* de baterias, contribuindo para suprir a limitada disponibilidade de informações técnicas relacionadas a esse modelo.

Com base nos dados obtidos durante essa etapa, será realizado o dimensionamento de um novo banco de baterias utilizando células com dimensões físicas compatíveis e tensão equivalente às originais, porém com maior capacidade de armazenamento de energia. A proposta busca ampliar a autonomia do veículo, preservando a compatibilidade com os sistemas eletrônicos existentes, especialmente com o *Battery Management System* (BMS), evitando intervenções significativas na configuração original do veículo (COWONTECH, 2021).

1.1 Justificativa

Estima-se no Brasil que em 2024 existiam aproximadamente 63 milhões de carros, 730 mil ônibus, estimadamente 28 milhões de motocicletas (IBGE, 2024), apesar de os veículos elétricos terem tido um aumento de 85% em relação ao ano de 2023, estes ainda representam somente de 7% a 8% dos veículos vendidos que foram vendidos no ano de 2024 (BARROS, 2025), os demais sendo veículos a combustão representando entre 92% até 93% (IEA, 2025). Os veículos a combustão são responsáveis pela liberação de diversos gases de efeito estufa que são prejudiciais ao meio ambiente, com o grande aumento destes veículos nos centros urbanos estes passaram a ser um problema ainda maior a saúde pública, segundo a OMS aproximadamente 90% da população está exposta a níveis de poluentes acima do recomendado, levando a estimadamente 4 milhões de mortes prematuras em decorrência da poluição do ar (CETESB, 2024).

Entre os gases poluentes presentes, tem-se o monóxido de carbono (CO) este é produto do combustível não queimado, seus danos à saúde ocorrem pela inalação, reduz a capacidade de oxigenação do sangue. Os óxidos de nitrogênio (NOx) que tem origem quando o nitrogênio entra em contato com o oxigênio, bem como os hidrocarbonetos (HC), que são a parcela parcialmente ou não queimada do motor, ambos entram em contato com a atmosfera e contribuem para promover as chuvas ácidas. Já a fuligem que seriam as partículas líquidas e sólidas, devido a sua mínima constituição estas permanecem suspensas na atmosfera e quando inaladas, podem penetrar nas defesas do organismo atingindo os alvéolos pulmonares (CETESB, 2024).

Com o objetivo tanto de preservar a natureza, como melhorar a saúde da população passou a ser de grande importância a substituição dos veículos a combustão por veículos elétricos, tendo em vista que estes vêm ascendendo cada vez mais no mercado automobilístico mundial, portanto é possível compreender a importância da sustentabilidade durante todo prazo de vida útil e após este ciclo. Atentando-se aos dados relacionados a poluição é notável a relevância da análise de cada referida parte dos veículos para que seja possível torná-los cada vez mais eficientes, componentes com maior longevidade e que sejam minimamente poluentes em relação a descarte, ou seja que haja espaço para aproveitamento de seus

componentes no mercado, seja para desenvolver um novo veículo, ou para ter um novo fim dentro da indústria.

Além das questões ambientais e da saúde pública, existe o desafio técnico relacionado à manutenção e atualização de veículos elétricos mais antigos. Muitos desses veículos possuem baterias com elevado grau de degradação ou dificuldade de reposição no mercado. Nesse contexto, torna-se relevante o desenvolvimento de metodologias para substituição de bancos de baterias, preservando a compatibilidade com os sistemas eletrônicos originais e ampliando a autonomia operacional. O Mitsubishi i-MiEV 2010 pertencente à CELESC apresenta essas características, tornando-se um importante estudo de caso para avaliação de soluções de *retrofit* aplicadas à mobilidade elétrica.

1.2 Definição do Problema

Os veículos elétricos pioneiros, como o Mitsubishi i-MiEV 2010, enfrentam atualmente dificuldades relacionadas à disponibilidade de peças de reposição, especialmente no que se refere ao banco de baterias. A substituição direta dos módulos originais nem sempre é viável devido ao custo, à obsolescência tecnológica e à limitada oferta de componentes compatíveis no mercado.

Dessa forma, surge a necessidade de investigar alternativas que permitam a substituição do banco de baterias mantendo a compatibilidade com o sistema elétrico original do veículo e com o *Battery Management System* (BMS). Além disso, torna-se necessário avaliar o potencial de aumento de autonomia por meio da utilização de módulos com maior capacidade energética, sem comprometer os requisitos de segurança, desempenho e integração eletrônica do veículo.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Avaliar a viabilidade técnica da substituição das células do banco de baterias do veículo elétrico Mitsubishi i-MiEV ano 2010 por células de maior capacidade, preservando a arquitetura original do sistema. Para isso, foram

analisadas as características construtivas e elétricas do banco de baterias, bem como a compatibilidade mecânica, elétrica e eletrônica entre as células originais e as células propostas, buscando aumentar a capacidade de armazenamento de energia e a autonomia potencial do veículo sem comprometer o funcionamento dos sistemas de gerenciamento e monitoramento originalmente empregados pelo fabricante.

1.3.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos, pode-se destacar:

- a) Desenvolver e documentar um procedimento seguro para abertura e desmontagem do *pack* de baterias do Mitsubishi i-MiEV;
- b) Levantar as características construtivas, elétricas e dimensionais do banco de baterias original;
- c) Identificar os requisitos de compatibilidade entre o novo banco de baterias e o BMS original do veículo;
- d) Selecionar módulos ou células com tensão nominal compatível e maior capacidade energética em relação ao sistema original;
- e) Realizar os cálculos de dimensionamento do novo banco de baterias, considerando tensão, corrente, capacidade e energia armazenada;
- f) Estimar o ganho de autonomia proporcionado pela substituição do banco de baterias;
- g) Avaliar os aspectos de segurança elétrica e operacional envolvidos na substituição do sistema de armazenamento de energia.

1.4 Estrutura do Trabalho

No primeiro capítulo é apresentada a introdução do trabalho, abordando o crescimento da mobilidade elétrica e a importância dos sistemas de armazenamento de energia para veículos elétricos. Também são discutidos os desafios relacionados à degradação das baterias ao longo do tempo e a necessidade de soluções que permitam a recuperação da autonomia desses veículos. Além disso, são

apresentados a justificativa, a definição do problema e os objetivos que orientam o desenvolvimento da pesquisa.

O segundo capítulo apresenta uma revisão histórica sobre a evolução das baterias, desde a pilha voltaica desenvolvida por Alessandro Volta até as modernas baterias de íons de lítio utilizadas atualmente nos veículos elétricos. São abordados os principais avanços tecnológicos que contribuíram para o aumento da capacidade de armazenamento de energia, da eficiência e da confiabilidade dos sistemas eletroquímicos ao longo da história.

No terceiro capítulo é apresentada a fundamentação teórica necessária para a compreensão dos sistemas de armazenamento de energia empregados em veículos elétricos. Inicialmente são discutidas as configurações de bancos de baterias e suas formas de associação em série, paralelo e série-paralelo. Em seguida, são apresentados os sistemas de gerenciamento e monitoramento de baterias, destacando as funções desempenhadas pelo Battery Management System (BMS) e pelas Battery Monitoring Units (BMU). Por fim, são abordados os processos de carga, descarga e degradação das baterias de íons de lítio, fornecendo embasamento para a análise do sistema estudado.

O quarto capítulo descreve a metodologia adotada para o desenvolvimento do trabalho. Inicialmente são apresentadas as características do veículo elétrico Mitsubishi i-MiEV, ano 2010, pertencente à frota da CELESC, bem como a arquitetura original de seu banco de baterias. Na sequência, são detalhados os procedimentos desenvolvidos para a desmontagem do conjunto, a análise das células originais e a documentação técnica elaborada durante o processo, em razão da limitada disponibilidade de informações sobre a desmontagem desse modelo. Ao final do capítulo, são apresentados o dimensionamento do novo banco de baterias, a análise de compatibilidade com os sistemas BMS e BMU e a estimativa do ganho de autonomia obtido com a utilização de células de maior capacidade.

No quinto capítulo são apresentadas as considerações finais do trabalho, destacando os principais resultados obtidos, as contribuições técnicas relacionadas ao procedimento de desmontagem, ao dimensionamento do novo banco de baterias e à proposta de modernização do sistema de armazenamento de energia do Mitsubishi i-MiEV. Por fim, são apresentadas as limitações do estudo e sugestões para

trabalhos futuros voltados à validação experimental da solução proposta e ao desenvolvimento de novas pesquisas sobre a modernização de veículos elétricos de primeira geração.

2 HISTÓRICO DAS BATERIAS

O início da teoria envolvendo baterias se dá através da criação da pilha voltaica realizada por Alessandro Volta da Universidade de Paiva em 1800, este experimento foi realizado após diversas percepções adquiridas por meio de experimentos, como a de unir dois pedaços de diferentes metais e levá-los até a boca produzia uma sensação diferenciada a que ele atribuiu como “gosto da eletricidade” (TRASATTI, 1999). A pilha voltaica é considerada o primeiro dispositivo capaz de produzir corrente elétrica de forma contínua a partir de reações químicas. Seu desenvolvimento representou um marco na história da eletricidade, pois forneceu as bases científicas para o avanço dos sistemas eletroquímicos de armazenamento de energia. A partir desse princípio, tornaram-se possíveis os estudos e aperfeiçoamentos que levaram ao surgimento das baterias secundárias e das tecnologias de armazenamento eletroquímico amplamente utilizadas na atualidade (REDDY; LINDEN, 2011).

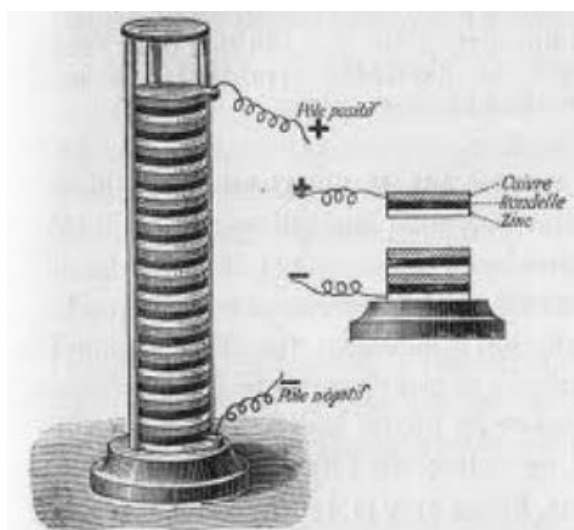
Com o objetivo de comprovar a inexistência de uma eletricidade animal, na qual seu rival Luigi Galvani acreditava, devido a um experimento com um sapo, onde o animal estava sem a pele e as vísceras, somente os membros inferiores interligados pelo nervo crural exposto. Utilizou a máquina elétrica criada por Francis Hauskbee que era capaz de gerar energia eletrostática, interligada passando por um braço condutor até um fio de cobre, ele a utilizou para que fosse possível gerar a carga eletrostática, que após um certo acúmulo, realizou a interligação do fio de cobre até o sapo, foi quando verificou ao encostar fio carregado a perna do sapo está se movia. As controvérsias entre Galvani e Volta representaram um marco para o desenvolvimento da eletroquímica, uma vez que impulsionaram as investigações experimentais que acabaram contribuindo para a compreensão dos fenômenos relacionados à geração de corrente elétrica por meio de reações químicas (TRASATTI, 1999).

Em 1791 Galvani publicou o livro chamado de “Eletricidade Animal”, onde realizou mais experimentos que segundo o próprio comprovavam a existência da eletricidade que existia de uma eletricidade provinda dos animais (TRASATTI, 1999). Já Alessandro Volta buscava um jeito de comprovar que a eletricidade pelos

cabos metálicos, assim através da observação da constituição das enguias elétricas que ele teve a ideia de realizar a pilha, a qual pode-se observar na Figura 1.

Sabendo que as enguias possuem estrutura laminar, interligadas por fluído, Alessandro se utilizou de discos metálicos intercalados por um papel banhado em solução salina (ácida), com fios metálicos interligados na parte superior e inferior, então adicionando na boca ele percebeu que sentia o mesmo “gosto da eletricidade”, onde teve a possibilidade de derrubar a teoria da eletricidade animal (TRASATTI, 1999). A associação sucessiva de pares metálicos permitiu o aumento da diferença de potencial total do sistema, tornando possível a obtenção de tensões superiores às observadas em experimentos isolados. Este princípio permanece presente nos dias atuais em bancos de baterias, nestes onde, células individuais são conectadas em série para obtenção dos níveis de tensão requeridos pela aplicação (REDDY; LINDEN, 2011).

Figura 1 – Pilha criada por Alessandro Volta



Fonte: Pacheco (2013).

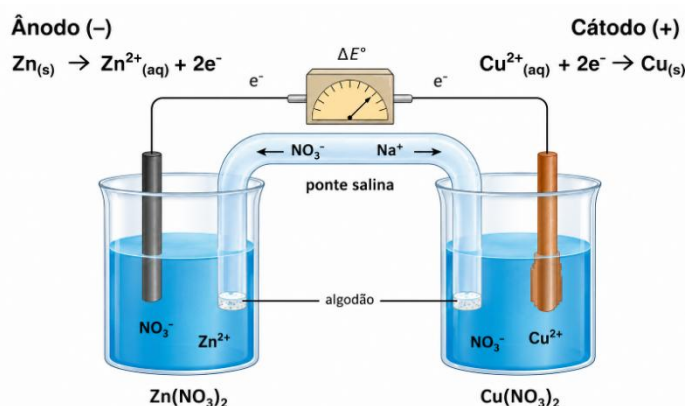
Assim foi dada a origem da primeira pilha, que foi desenvolvida a partir de dois tipos de metais, os primeiros metais utilizados foram a prata e o zinco e sua tensão dependia do número de elementos contidos na pilha, devido a ação dos ácidos o zinco era corroído, fazendo com que bolhas de hidrogênio fossem produzidas, esse efeito fazia com que a pilha de Volta não tivesse capacidade de produzir eletricidade

por mais que alguns minutos (COSTA, 2021). O acúmulo de hidrogênio sobre os eletrodos caracteriza o fenômeno conhecido como polarização, que aumenta a resistência interna da célula e acaba reduzindo gradativamente sua capacidade de fornecimento de corrente elétrica. Essa limitação foi um dos principais fatores que motivaram o desenvolvimento de novas configurações eletroquímicas ao longo do século XIX, culminando no surgimento de baterias mais eficientes e duráveis (KURZWEIL, 2010).

2.1 A Pilha de Daniell (1836)

Através do estudo da eletroquímica, aplicando a reação de oxirredução John Frederic Daniell em 1836, desenvolveu uma pilha constituída por um eletrodo de zinco e outro de cobre em recipientes separados entre estes uma ponte salina que servia para manter o equilíbrio iônico entre as soluções. A utilização de eletrólitos distintos, permitiu minimizar o fenômeno da polarização observado na pilha de Volta, aumentando a estabilidade da tensão fornecida e melhorando significativamente o desempenho eletroquímico do sistema (KURZWEIL, 2010). O objetivo de Daniell era que seu invento mantivesse a constância nas correntes pelo maior tempo possível, ele tentou diversos modelos que chegaram a durar 8 horas, até chegar na chamada pilha de Daniell Figura 2, a qual segundo relatos do próprio podia operar por entre 15, 20 até 24 horas ininterruptas, sua tensão era de 1,1 V (COSTA, 2021).

Figura 2 – Modelo da pilha criada por Daniell



Fonte: Costa (2021).

A pilha de Daniell tornou-se uma das principais fontes de energia elétrica do século XIX, sendo amplamente empregada em sistemas telegráficos e em aplicações laboratoriais devido à sua confiabilidade e capacidade de fornecer corrente elétrica de forma mais contínua. Além disso, seu princípio de funcionamento contribuiu para o desenvolvimento das futuras células galvânicas e dos sistemas modernos de armazenamento eletroquímico de energia (REDDY; LINDEN, 2011).

2.2 Pilhas de Grove (1839)

William Robert Grove foi professor de filosofia experimental no Instituto de Londres por conta de suas contribuições no mundo das baterias. Para criar a pilha de Grove tomou como base a pilha de Daniell, somente realizou a substituição do eletrodo de cobre da pilha por platina envolta de um tubo poroso, que continha ácido nítrico na parte interna (MORUS, 1991), esta reação produzia nitrogênio gasoso que é nocivo a saúde e sua tensão reduzia substancialmente na descarga, sua tensão chegava a 1,9 V (KURZWEIL, 2010).

Em comparação com a pilha de Daniell, a pilha de Grove apresentava como principal diferencial a capacidade de fornecer uma tensão elétrica mais elevada, sendo considerada uma das fontes de energia mais potentes disponíveis no século XIX. Essa característica ampliou suas possibilidades de aplicação, especialmente em pesquisas científicas e experimentos que exigiam maiores diferenças de potencial elétrico. Contudo, fatores como o elevado custo da platina utilizada em sua construção e a liberação de gases tóxicos durante seu funcionamento dificultaram sua adoção em larga escala. Essas limitações estimularam o desenvolvimento de novas tecnologias eletroquímicas que buscavam aliar melhor desempenho, maior segurança e menor custo de produção (KURZWEIL, 2010).

Além das contribuições para o avanço das baterias, William Robert Grove também se destacou por seus estudos sobre células a combustível. Seus trabalhos pioneiros estabeleceram fundamentos importantes para uma tecnologia que atualmente vem sendo empregada em sistemas de geração de energia e em aplicações voltadas à mobilidade sustentável (VARGAS, 2006).

2.2.1 Célula de Combustível (1839)

Grove teve essa ideia enquanto realizava experimentos com a eletrólise da água, pensando em como seria o processo reverso desta reação de hidrogênio com oxigênio, como produto desta reação, teria água e energia ao mesmo tempo. O conceito envolto das células de combustível é que um dispositivo eletroquímico capaz de converter a energia fornecida por um combustível químico e um oxidante em forma de energia vapor e água. Na época o valor da tensão encontrado foi irrisório (VARGAS, 2006).

Embora os primeiros experimentos realizados por Grove apresentassem limitações em termos de eficiência e aplicação prática, eles foram fundamentais para o desenvolvimento das células a combustível modernas. Seus estudos demonstraram que a energia elétrica poderia ser produzida a partir da combinação controlada de reagentes, estabelecendo os princípios que serviriam de base para essa tecnologia. Diferentemente das baterias convencionais, que armazenam internamente os materiais necessários para a geração de energia, as células a combustível dependem do fornecimento contínuo de combustível e oxidante, mantendo a produção de eletricidade enquanto esses reagentes estiverem disponíveis (LARMINIE; DICKS, 2003).

Atualmente, as células a combustível são vistas como uma alternativa promissora no contexto da transição energética. Seu uso tem sido estudado e ampliado em aplicações como sistemas estacionários de geração de energia, veículos elétricos movidos a hidrogênio e sistemas de alimentação de emergência. Entre os principais benefícios dessa tecnologia destacam-se a elevada eficiência energética, as baixas emissões de poluentes durante a operação e a possibilidade de utilização de hidrogênio obtido a partir de fontes renováveis, características que contribuem para a redução dos impactos ambientais associados à geração de energia (BARBIR, 2013).

2.3 Bateria de Gaston Planté (1859)

As células da bateria de Gaston Planté se constituíam em duas placas de chumbo e dióxido de chumbo imersos em uma solução de ácido sulfúrico. Considerada a primeira bateria recarregável. Em uma bateria, cada célula chumbo-

ácido fornecia aproximadamente 2V. Planté após observar as reações decorrentes do ácido que tinham reações inversas ocorrendo e em sobrecarga a água presente levava a eletrólise e a reação na placa positiva fazia com que oxigênio fosse produzido e na placa negativa hidrogênio. Devido a este trabalho Planté investigou e foi o primeiro a observar a polarização galvânica e meio oxidante (KURZWEIL, 2010).

O surgimento da bateria chumbo-ácido representou um importante avanço na história do armazenamento de energia, pois introduziu a possibilidade de recarregar e reutilizar uma mesma bateria em diversos ciclos de carga e descarga. Essa característica marcou a transição das pilhas primárias para as baterias secundárias, ampliando significativamente as possibilidades de aplicação dos sistemas eletroquímicos de armazenamento de energia (REDDY; LINDEN, 2011).

Nas décadas seguintes, a tecnologia chumbo-ácido passou por constantes aperfeiçoamentos, consolidando-se em aplicações como sistemas de partida automotiva, telecomunicações, fontes de alimentação ininterrupta (UPS) e armazenamento estacionário de energia. Mesmo diante do avanço de tecnologias mais recentes, como as baterias de íons de lítio, as baterias chumbo-ácido continuam sendo amplamente utilizadas devido ao seu baixo custo, elevada confiabilidade e longo histórico de utilização em aplicações industriais e comerciais (KURZWEIL, 2010).

2.4 Baterias de Lítio (1960)

As pilhas de lítio foram desenvolvidas a partir da exploração espacial na década de 1960, isso se devia pela necessidade de pequenos eletroquímicos que pudessem armazenar uma grande quantia de energia. Na constituição destas células o lítio e o sódio eram catodos, já substâncias contendo flúor, cloro e oxigênio eram anodos (WHITTINGHAM, 1976).

O interesse pelo lítio cresceu à medida que suas propriedades eletroquímicas passaram a demonstrar grande potencial para aplicações que exigiam elevados níveis de armazenamento de energia. Em comparação com as tecnologias disponíveis na época, as baterias baseadas nesse elemento apresentavam maior capacidade de armazenar energia em relação à sua massa, característica que

despertou atenção especialmente em setores como o aeroespacial e o de dispositivos eletrônicos portáteis, onde peso e desempenho eram fatores determinantes (REDDY; LINDEN, 2011).

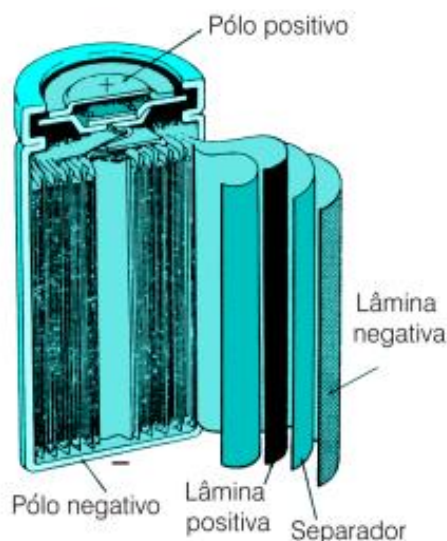
O lítio acabou se destacando no meio das baterias devido ao fato de apresentar excelentes características para um dos eletrodos da bateria por ser o mais leve dos metais, possuindo densidade de $0,53\text{ g cm}^{-3}$, seu potencial para eletrodo padrão também ser negativo $-3,05\text{ V}$, logo foi bem visado para compor o ânodo em células de baterias que detinham um alto potencial de energia específica (WHITTINGHAM, 1976).

As propriedades do lítio o tornaram um dos materiais mais promissores para aplicações em armazenamento de energia. Além de apresentar baixa densidade e elevado potencial eletroquímico, esse elemento possui alta capacidade específica teórica, característica que favorece o desenvolvimento de baterias mais leves e com maior capacidade de armazenamento. Como resultado, as células baseadas em lítio passaram a oferecer densidades energéticas significativamente superiores às obtidas pelas baterias chumbo-ácido e níquel-cádmio, que predominavam em diversas aplicações até aquele período (REDDY; LINDEN, 2011).

Pelo fato de o lítio metálico ser muito reativo com água e ar, todas as pilhas possuem sal de lítio misturados solventes em um ambiente totalmente vedado, seus elementos eram configurados na forma de tiras enroladas, um exemplo destas é a pilha de lítio/dióxido manganês Figura 3, que fornece uma tensão de 3 até 3,5 V (REDDY; LINDEN, 2011).

Embora apresentasse vantagens significativas em termos de armazenamento de energia, o uso do lítio metálico também trouxe importantes desafios relacionados à segurança. Sua elevada reatividade favorecia a formação de estruturas dendríticas durante os ciclos de carga e descarga, o que aumentava o risco de curtos-circuitos internos e comprometia a confiabilidade das células. Diante dessas limitações, pesquisadores passaram a buscar alternativas mais seguras, resultando no desenvolvimento de sistemas baseados na intercalação reversível de íons de lítio em materiais hospedeiros. Essa abordagem representou um avanço fundamental e serviu de base para o surgimento das modernas baterias de íons de lítio (THE NOBEL PRIZE, 2019).

Figura 3 – Pilha de lítio/dióxido de manganês



Fonte: Bocchi (2000).

2.5 Baterias de Íon Lítio (1986)

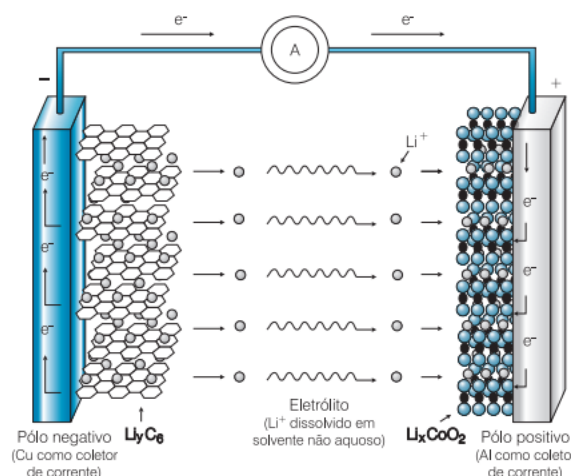
O nome íon Lítio se deve ao fato de utilizar apenas íons de lítio nas células, estes se encontram no eletrólito na forma de sais de lítio e são misturados em solventes não aquosos. Desde 1990 as baterias recarregáveis de íon lítio são utilizadas em diversos aparelhos eletrônicos, como celulares e computadores, também podendo ser utilizada em carros elétricos. As baterias consideradas recarregáveis são aquelas que suportam no mínimo 300 ciclos completos de carga e descarga mantendo ao menos 80% de sua vida útil (PLETT, 2015).

As baterias de íons-lítio tornaram-se a tecnologia de armazenamento eletroquímico mais utilizada atualmente, resultado da combinação de características como elevada densidade energética, boa capacidade de fornecimento de potência, alta eficiência e reduzida autodescarga. Essas vantagens contribuíram para sua ampla adoção em diferentes aplicações, desde dispositivos eletrônicos portáteis até veículos elétricos e sistemas estacionários de armazenamento de energia, consolidando sua importância no cenário tecnológico atual (REDDY; LINDEN, 2011).

Devido ao fato de ser composta por íons de lítio, durante o seu funcionamento os íons se deslocam do ânodo, para o cátodo e os elétrons migram pelo circuito externo Figura 4, devido a isso os eletrodos são constituídos por materiais de estrutura aberta, seu cátodo é constituído de um óxido de estrutura lamelar (PLETT, 2015).

Do ponto de vista construtivo, as baterias de íons de lítio são formadas por quatro elementos principais: o ânodo, o cátodo, o separador e o eletrólito, responsável pelo transporte dos íons entre os eletrodos. Durante os processos de carga e descarga, os íons de lítio movimentam-se através do eletrólito entre o ânodo e o cátodo, enquanto os elétrons percorrem o circuito externo, permitindo o fornecimento ou o armazenamento de energia elétrica. Em aplicações automotivas, as células individuais são agrupadas em módulos e interligadas em diferentes configurações de série e paralelo, formando o banco de baterias responsável pelo armazenamento de energia do veículo (REDDY; LINDEN, 2011).

Figura 4 – Princípio de funcionamento baterias de Íon Lítio



Fonte: Bocchi (2000).

Em 2019, os cientistas John B. Goodenough, M. Stanley Whittingham e Akira Yoshino receberam o Prêmio Nobel por suas contribuições revolucionárias para as baterias de lítio. Goodenough demonstrou que cerca de metade dos íons de lítio poderiam ser extraídos e inseridos nos materiais de cobalto de lítio ou niquelato de

Lítio sem afetar sua estrutura, tornando-os excelentes para o cátodo das baterias. Whittingham foi pioneiro ao introduzir materiais de intercalação capazes de armazenar energia. Por sua vez, Yoshino liderou a pesquisa para criar uma bateria recarregável com eletrólito não aquoso, resultando no protótipo funcional das baterias de Íon-Lítio em 1986. Essas inovações foram destacadas pelo Prêmio Nobel de 2019, reconhecendo avanços que contribuem para reduzir as emissões provenientes da queima de combustíveis fósseis (THE NOBEL PRIZE, 2019).

As contribuições de Stanley Whittingham, John Goodenough e Akira Yoshino foram fundamentais para o desenvolvimento das modernas baterias de íons de lítio. Os avanços obtidos por esses pesquisadores permitiram a criação de sistemas baseados na intercalação reversível de íons de lítio em materiais hospedeiros, eliminando a necessidade do uso direto do lítio metálico. Essa inovação representou um importante avanço em termos de segurança, durabilidade e viabilidade comercial, tornando possível a ampla disseminação das baterias de íons de lítio nas mais diversas aplicações tecnológicas (REDDY; LINDEN, 2011).

Atualmente as pesquisas na área buscam a melhor química para as baterias de Íon Lítio de forma se obter a maior capacidade de armazenamento, com segurança e rapidez no carregamento e que sejam economicamente viáveis (GAO et al.,2024). Neste quesito as químicas NMC (Níquel-Manganês-Cobalto) e a LFP (Lítio Fosfato de Ferro) têm dominado o mercado, com ênfase nas LFP devido a sua maior segurança e menor custo, apesar de apresentarem uma menor capacidade armazenamento que as NMCs. Considerando que as células LFP apresentam uma vida útil de ciclo de carga maior, além de 15% a 20% menos emissões de carbono (PADHI; NANJUNDASWAMY; GOODENOUGH,1997).

A escolha da tecnologia de bateria para veículos elétricos envolve diversos fatores além da composição química das células. Características como capacidade de armazenamento de energia, vida útil, segurança operacional e compatibilidade com os sistemas de gerenciamento desempenham papel fundamental no desempenho e na confiabilidade do conjunto. Em projetos de substituição de bancos de baterias, como o desenvolvido neste trabalho, é necessário analisar não apenas a química utilizada, mas também parâmetros como tensão nominal, capacidade, dimensões físicas e integração com o *Battery Management System* (BMS) original. Esses

cuidados são essenciais para garantir o funcionamento adequado dos sistemas eletrônicos do veículo e preservar as condições seguras de operação (PLETT, 2015).

2.5.1 Baterias de Lítio Fosfato de Ferro (LFP)

Um importante avanço na evolução das baterias de íons de lítio ocorreu em 1997, quando Padhi, Nanjundaswamy e Goodenough apresentaram o fosfato de ferro-lítio (LiFePO_4) como material catódico. A estrutura cristalina do tipo olivina demonstrou elevada estabilidade química e térmica, tornando essa tecnologia uma alternativa mais segura em relação às baterias que utilizavam óxidos de cobalto como material ativo (PADHI; NANJUNDASWAMY; GOODENOUGH, 1997).

Com o passar dos anos as baterias LFP conquistaram espaço em aplicações que demandam confiabilidade elevada, como também uma vida útil longa. Embora apresentem menor densidade energética quando comparadas às baterias NMC, oferecem vantagens importantes, como maior estabilidade térmica, menor suscetibilidade à fuga térmica, maior durabilidade em ciclos de carga e descarga e menor dependência de matérias-primas críticas, como o cobalto. Essas características favoreceram sua adoção em sistemas estacionários de armazenamento de energia e mais recentemente, em veículos elétricos (REDDY; LINDEN, 2011).

3 FUNDAMENTOS DOS SISTEMAS DE BATERIAS DE ÍON-LÍTIO

As baterias de íon-lítio ocupam atualmente uma posição de destaque no setor da mobilidade elétrica, sendo a principal tecnologia empregada nos veículos elétricos modernos. Essa ampla utilização está relacionada principalmente à sua capacidade de armazenar grandes quantidades de energia em volumes relativamente reduzidos, além de apresentar elevada eficiência e bom desempenho durante os ciclos de carga e descarga. Graças a essas características, as baterias de íon-lítio tornaram-se elementos fundamentais para viabilizar a expansão dos veículos elétricos e atender às crescentes demandas por autonomia e eficiência energética (REDDY; LINDEN, 2011).

Entretanto, o funcionamento de um veículo elétrico envolve muito mais do que a simples utilização de células eletroquímicas capazes de armazenar energia. Para que o sistema opere de forma segura e eficiente, é necessário que essas células sejam organizadas em conjuntos capazes de fornecer os níveis de tensão e potência exigidos pelo veículo. Além disso, diversos sistemas eletrônicos atuam continuamente no monitoramento e controle das condições de operação do banco de baterias, assegurando que seus componentes permaneçam dentro de limites adequados de funcionamento (PLETT, 2015).

Outro aspecto importante está relacionado ao fato de que as baterias não mantêm suas características originais indefinidamente. Ao longo do tempo, fatores como temperatura, condições de uso, intensidade das correntes elétricas e repetição dos ciclos de carga e descarga provocam alterações graduais nos materiais que compõem as células. Como consequência, ocorre uma redução progressiva da capacidade de armazenamento de energia e do desempenho do sistema, fenômeno conhecido como degradação. Esse processo influencia diretamente a autonomia, a eficiência e a vida útil dos veículos elétricos, tornando seu estudo essencial para o desenvolvimento de soluções mais confiáveis e duráveis (PLETT, 2015; GAO ET AL., 2025).

Nesse contexto, compreender a estrutura, o funcionamento e o comportamento das baterias de íon-lítio tornam-se fundamental para a análise dos sistemas de armazenamento empregados na mobilidade elétrica. Esse conhecimento fornece a base necessária para avaliar as características do banco de baterias do

Mitsubishi i-MiEV estudado neste trabalho, bem como para fundamentar a proposta de substituição das células originais por uma solução capaz de ampliar a capacidade energética do veículo sem comprometer a compatibilidade com os sistemas eletrônicos existentes.

3.1 Configurações dos Bancos de Baterias

O banco de baterias é um dos principais componentes de um veículo elétrico, sendo responsável pelo armazenamento da energia que será utilizada pelo sistema de propulsão e pelos demais sistemas embarcados. Para atender às exigências de tensão, potência, capacidade energética e autonomia, não é suficiente utilizar uma única célula eletroquímica. Por esse motivo, as células são agrupadas de forma organizada, formando estruturas capazes de fornecer a energia necessária para o funcionamento seguro e eficiente do veículo (PLETT, 2015).

A arquitetura dos sistemas de armazenamento utilizados na mobilidade elétrica é normalmente organizada em níveis hierárquicos. No primeiro nível encontram-se as células eletroquímicas, que constituem a menor unidade funcional de armazenamento de energia. Essas células são agrupadas para formar módulos, que correspondem ao segundo nível estrutural do sistema. Por fim, diversos módulos são interligados para compor o *pack* de baterias, conjunto responsável pelo armazenamento e fornecimento de energia ao veículo elétrico. Essa organização modular facilita processos de fabricação, manutenção, substituição de componentes e monitoramento operacional, além de contribuir para uma melhor distribuição térmica e elétrica do sistema (REDDY; LINDEN, 2011).

A forma como as células são conectadas exerce influência direta sobre as características elétricas do banco de baterias. Dependendo dos requisitos da aplicação, as conexões podem ser realizadas em série, em paralelo ou por meio da combinação dessas duas configurações. A escolha da topologia adequada determina os níveis de tensão, corrente e energia disponíveis para o sistema de tração, impactando diretamente o desempenho e a autonomia do veículo (PLETT, 2015).

3.1.1 Associação em Série

Na associação em série, o terminal positivo de uma célula é conectado ao terminal negativo da célula seguinte, formando uma cadeia de elementos eletroquímicos. Nessa configuração, a tensão total do banco corresponde à soma das tensões individuais das células, enquanto a capacidade elétrica permanece igual à capacidade de uma única célula (SANTOS, 2020).

A tensão total do banco pode ser determinada pela Equação (1).

$$V_{total} = n \times V_{célula} \quad (1)$$

Onde:

V_{total} = tensão total do banco de baterias (V);

n = número células conectadas em série;

$V_{célula}$ = tensão nominal de cada célula (V).

Essa configuração é amplamente empregada em veículos elétricos, pois permite atingir os elevados níveis de tensão exigidos pelos sistemas de tração elétrica, reduzindo as correntes de operação e consequentemente as perdas elétricas nos condutores. Em aplicações automotivas, a associação em série é fundamental para fornecer a tensão necessária ao funcionamento dos motores elétricos e dos sistemas auxiliares do veículo (SANTOS, 2020; 2011).

3.1.2 Associação em Paralelo

Na associação em paralelo, todos os terminais positivos são conectados entre si, assim como os terminais negativos. Nessa configuração, a tensão do conjunto permanece igual à tensão de uma única célula, enquanto a capacidade de armazenamento de energia e a capacidade de fornecimento de corrente aumentam proporcionalmente ao número de células conectadas (REDDY; LINDEN, 2011).

A capacidade total do banco pode ser obtida pela Equação (2).

$$C_{total} = n \times C_{célula} \quad (2)$$

Onde:

C_{total} = capacidade total do banco (Ah);

n = número células conectadas em paralelo;

$C_{célula}$ = capacidade nominal da célula (Ah).

Esse arranjo é utilizado quando se deseja aumentar a autonomia do sistema ou sua capacidade de fornecimento de corrente sem alterar a tensão nominal de operação. Além disso, a associação em paralelo permite distribuir a corrente entre várias células, reduzindo os esforços individuais e contribuindo para o desempenho do sistema de armazenamento de energia (REDDY; LINDEN, 2011).

3.1.3 Associação em Série-Paralelo

Na prática, a maioria dos veículos elétricos utiliza uma configuração híbrida conhecida como associação série-paralelo. Nessa arquitetura, grupos de células são inicialmente conectados em paralelo para atingir a capacidade desejada e posteriormente esses grupos são conectados em série para alcançar a tensão requerida pelo sistema de tração. Essa solução permite adequar simultaneamente os níveis de tensão, corrente e energia às necessidades da aplicação, tornando-se a configuração predominante na indústria automotiva (BRESOLIN, 2023)

A energia armazenada em um banco de baterias pode ser estimada pela Equação (3).

$$E = V \times C \quad (3)$$

Onde:

E = energia armazenada (Wh);

V = tensão nominal do banco (V);

C = capacidade do banco (Ah).

A partir dessa relação, observa-se que o aumento da tensão ou da capacidade resulta em maior quantidade de energia disponível para o sistema. Em projetos de modernização ou substituição de bancos de baterias, é comum preservar a tensão nominal originalmente definida pelo fabricante e promover alterações apenas na capacidade das células empregadas. Essa estratégia permite ampliar a energia armazenada e consequentemente a autonomia do veículo, sem comprometer a compatibilidade com a eletrônica embarcada e com os sistemas de gerenciamento originalmente projetados para o conjunto (REDDY; LINDEN, 2011).

Entretanto, o desempenho de um banco de baterias não depende apenas de seus parâmetros elétricos. Aspectos relacionados ao comportamento térmico, ao balanceamento das células, à distribuição de correntes, à integridade mecânica da

estrutura e aos requisitos de segurança operacional também desempenham papel fundamental no funcionamento do sistema. Em aplicações automotivas, esses fatores tornam-se ainda mais relevantes devido à exposição constante a ciclos de carga e descarga, vibrações mecânicas, acelerações, frenagens regenerativas e variações de temperatura ambiente (PLETT, 2015).

Dessa forma, a configuração adequada do banco de baterias envolve muito mais do que a simples definição do número de células conectadas em série ou em paralelo. Ela influencia diretamente a autonomia, a eficiência energética, a confiabilidade, a segurança operacional e a vida útil do veículo elétrico (SANTOS, 2020).

3.2 Gerenciamento de Baterias (*Battery Management System – BMS*)

As baterias de íons de lítio tornaram-se a principal tecnologia empregada nos veículos elétricos modernos como resultado de sua elevada densidade energética, capacidade de armazenar grandes quantidades de energia em volumes relativamente reduzidos, como também sua alta eficiência. Entretanto, essas vantagens estão associadas a uma característica importante: as células de íons de lítio operam de forma segura apenas dentro de faixas específicas de tensão, corrente e temperatura. Quando esses limites são ultrapassados, podem ocorrer processos acelerados de degradação, redução da vida útil das células e em situações mais severas, falhas que comprometem a segurança do sistema. Por esse motivo, a operação de um banco de baterias não depende apenas das células eletroquímicas, mas também de sistemas eletrônicos capazes de monitorar continuamente suas condições de funcionamento (PLETT, 2015; REDDY; LINDEN, 2011).

Nesse contexto, destaca-se o Sistema de Gerenciamento de Baterias (*Battery Management System – BMS*), responsável por supervisionar e controlar o funcionamento do banco de baterias. O BMS pode ser entendido como o “sistema nervoso” do conjunto de armazenamento de energia, uma vez que recebe informações das células, processa esses dados e toma decisões que garantem a operação segura e eficiente do sistema. Sua função principal consiste em assegurar que todas as células operem dentro dos limites especificados pelo fabricante, preservando seu desempenho, confiabilidade e vida útil (PLETT, 2015).

Para cumprir essa função, o BMS realiza o monitoramento contínuo das tensões individuais das células, das correntes de carga e descarga e das temperaturas dos módulos. A partir dessas informações, o sistema é capaz de identificar condições anormais de operação, atuando na proteção do banco de baterias contra eventos como sobretensão, subtensão, sobrecorrente, curto-circuito e sobretemperatura. Essas estratégias de proteção são fundamentais para evitar danos permanentes às células e minimizar os processos de envelhecimento que ocorrem naturalmente ao longo do tempo (EDGE et al., 2021).

Além das funções de proteção, o BMS desempenha papel fundamental na estimativa de parâmetros que influenciam diretamente a operação do veículo elétrico. Entre os mais importantes estão o Estado de Carga (*State of Charge* – SoC), que representa a quantidade de energia disponível na bateria em determinado momento, e o Estado de Saúde (*State of Health* – SoH), utilizado para indicar o nível de degradação do sistema em relação às suas condições originais de fabricação. Essas informações permitem acompanhar o desempenho do banco de baterias ao longo de sua vida útil e auxiliam na tomada de decisões relacionadas à operação e manutenção do sistema (HU et al., 2012; PLETT, 2015).

Outra função essencial do BMS está relacionada ao balanceamento das células. Embora as células de um mesmo banco sejam fabricadas para apresentar características semelhantes, pequenas diferenças de fabricação, condições térmicas e envelhecimento fazem com que elas não se comportem exatamente da mesma forma ao longo do tempo. Como consequência, algumas células podem atingir seus limites de carga ou descarga antes das demais, reduzindo a capacidade efetivamente disponível do conjunto. Para minimizar esse problema, o BMS executa estratégias de balanceamento que buscam equalizar as tensões e condições operacionais entre as células, promovendo uma utilização mais uniforme do banco de baterias e contribuindo para o aumento de sua vida útil (PLETT, 2015).

Nos veículos elétricos, o BMS também desempenha um importante papel na integração entre o sistema de armazenamento de energia e os demais sistemas eletrônicos embarcados. Informações relacionadas ao estado da bateria, autonomia disponível, condições de operação e eventuais falhas são continuamente transmitidas para os módulos de controle do veículo. Essa comunicação permite que estratégias

de gerenciamento energético sejam implementadas em tempo real, contribuindo para a eficiência do sistema de tração, para a otimização do consumo de energia e para a segurança operacional do veículo como um todo (MOVASSAGH et al., 2021).

Dessa forma, o BMS não atua apenas como um sistema de proteção das baterias, mas como um elemento fundamental para o desempenho global do veículo elétrico. Sua capacidade de monitorar, controlar e proteger o banco de baterias influencia diretamente a autonomia, a eficiência energética, a confiabilidade e a vida útil do sistema de armazenamento de energia, tornando-o um dos componentes mais importantes da arquitetura elétrica dos veículos elétricos modernos.

3.3 Unidade de Monitoramento de Baterias (*Battery Monitoring Unit* – BMU)

À medida que os sistemas de armazenamento de energia evoluíram e passaram a incorporar um número cada vez maior de células em um mesmo banco de baterias, tornou-se inviável realizar o monitoramento individual de todos esses elementos utilizando apenas uma unidade central de controle. Em aplicações como veículos elétricos, onde os bancos de baterias operam com elevadas tensões e armazenam grandes quantidades de energia, a precisão das medições e a rapidez na identificação de falhas tornam-se fatores essenciais para garantir a segurança e o desempenho do sistema. Por esse motivo, muitos fabricantes adotam arquiteturas distribuídas de monitoramento compostas por unidades locais denominadas *Battery Monitoring Units* (BMU), responsáveis por supervisionar grupos específicos de células e transmitir essas informações ao sistema de gerenciamento (PLETT, 2016).

As BMUs podem ser entendidas como unidades eletrônicas dedicadas à aquisição e ao processamento inicial das informações provenientes das células ou módulos sob sua responsabilidade. Entre os principais parâmetros monitorados destacam-se as tensões individuais das células, as temperaturas dos módulos e a identificação de possíveis condições anormais de operação. Após a coleta dessas informações, os dados são transmitidos ao Sistema de Gerenciamento de Baterias (*Battery Management System* – BMS), que utiliza essas medições para executar estratégias de proteção, controle e gerenciamento energético do banco de baterias (MOVASSAGH et al., 2021).

A utilização de unidades de monitoramento distribuídas oferece diversas vantagens quando comparada aos sistemas totalmente centralizados. Como as BMUs são instaladas próximas às células monitoradas, ocorre uma redução significativa da quantidade e do comprimento dos cabos de medição, minimizando interferências eletromagnéticas e aumentando a confiabilidade dos sinais adquiridos. Além disso, essa arquitetura facilita a localização de falhas, melhora a capacidade de diagnóstico do sistema e permite um monitoramento mais preciso das condições individuais de cada célula ou módulo (REDDY; LINDEN, 2011).

Outro benefício importante está relacionado à escalabilidade dos sistemas de armazenamento de energia. Em bancos de baterias compostos por dezenas ou centenas de células, a utilização de BMUs permite que o monitoramento seja distribuído de forma organizada entre diferentes módulos, simplificando a arquitetura eletrônica e tornando o sistema mais robusto e confiável. Essa característica é particularmente importante em aplicações automotivas, nas quais elevadas tensões e grandes quantidades de energia exigem elevados níveis de supervisão e controle (PLETT, 2016).

O funcionamento integrado entre BMS e BMUs possibilita que cada célula seja monitorada continuamente durante as operações de carga, descarga e armazenamento. A partir dessas informações, o sistema é capaz de identificar rapidamente desvios de tensão, variações excessivas de temperatura e diferenças de comportamento entre as células, permitindo a adoção de medidas preventivas antes que ocorram danos ao banco de baterias. Como consequência, essa arquitetura contribui diretamente para o aumento da segurança operacional, da confiabilidade e da vida útil do sistema de armazenamento de energia (EDGE et al., 2021).

Além da supervisão das condições operacionais, as informações fornecidas pelas BMUs desempenham papel fundamental nos processos de balanceamento das células. Pequenas diferenças de fabricação, envelhecimento ou condições térmicas podem provocar desequilíbrios entre as células ao longo do tempo. Quando essas diferenças não são corrigidas, determinadas células podem atingir seus limites de carga ou descarga antes das demais, reduzindo a capacidade efetivamente disponível do banco de baterias. O monitoramento individual realizado pelas BMUs permite ao BMS identificar essas diferenças e atuar para equalizar as condições de operação do

conjunto, contribuindo para uma utilização mais uniforme das células e para a maximização da vida útil do sistema (PLETT, 2015).

Nos sistemas modernos de armazenamento de energia, a comunicação entre as BMUs e o BMS normalmente ocorre por meio de redes eletrônicas dedicadas, permitindo a troca contínua de informações entre os diferentes módulos do banco de baterias. Dessa forma, dados relacionados às condições das células, temperaturas, tensões e possíveis falhas podem ser compartilhados em tempo real, permitindo que o sistema tome decisões rápidas e precisas para proteger o conjunto e otimizar sua operação (MOVASSAGH et al., 2021).

Dessa forma, as BMUs constituem um elemento essencial na arquitetura dos sistemas de armazenamento de energia utilizados em veículos elétricos. Sua capacidade de monitorar individualmente as células, fornecer informações precisas ao sistema de gerenciamento e auxiliar na identificação precoce de falhas contribui significativamente para a segurança operacional, o desempenho energético e a durabilidade dos bancos de baterias, tornando possível a utilização confiável de sistemas compostos por grande quantidade de células interconectadas (REDDY; LINDEN, 2011).

3.4 Carga e Descarga das Baterias de Íon-Lítio

O funcionamento das baterias de íons de lítio está fundamentado em reações eletroquímicas reversíveis que permitem o armazenamento e a liberação de energia elétrica de forma eficiente. Durante esses processos, ocorre a movimentação dos íons de lítio entre os eletrodos da célula, fenômeno conhecido como intercalação e desintercalação. Essa característica é uma das principais responsáveis pela elevada eficiência energética e pela capacidade de recarga que tornaram essa tecnologia amplamente utilizada em dispositivos eletrônicos, sistemas de armazenamento de energia e veículos elétricos (REDDY; LINDEN, 2011).

Durante o processo de descarga, que corresponde ao fornecimento de energia para uma carga externa, os íons de lítio migram do ânodo para o cátodo através do eletrólito, enquanto os elétrons percorrem o circuito externo, produzindo a corrente elétrica necessária para alimentar o sistema conectado à bateria. Em

veículos elétricos, essa energia é utilizada principalmente para alimentar o motor de tração e os demais sistemas auxiliares do veículo. Durante a recarga ocorre o processo inverso, no qual uma fonte externa fornece energia elétrica ao sistema, promovendo o retorno dos íons de lítio para o ânodo e restabelecendo a capacidade de armazenamento da bateria (PLETT, 2015).

Embora o princípio de funcionamento seja relativamente simples, os processos de carga e descarga devem ocorrer dentro de limites rigorosamente controlados. As baterias de íons de lítio apresentam elevada densidade energética, mas também são sensíveis a condições inadequadas de operação. Tensões excessivas durante a carga podem provocar reações químicas indesejadas, enquanto descargas profundas podem causar danos permanentes aos materiais ativos dos eletrodos. Da mesma forma, correntes excessivas podem resultar em aquecimento elevado, acelerando o envelhecimento das células e reduzindo sua vida útil (HU et al., 2012).

Ao longo do processo de descarga, a tensão da célula diminui gradualmente à medida que a energia armazenada é consumida. Durante a carga, ocorre o comportamento oposto, com a elevação progressiva da tensão até o limite estabelecido pelo fabricante. O acompanhamento contínuo desses parâmetros é realizado pelo Sistema de Gerenciamento de Baterias (BMS), responsável por monitorar as condições operacionais do banco de baterias e impedir situações de sobrecarga, subtensão ou sobrecorrente que possam comprometer a integridade das células (PLETT, 2015).

Além dos parâmetros elétricos, a temperatura exerce influência direta sobre o desempenho e a eficiência das baterias de íons de lítio. Em temperaturas elevadas, as reações químicas tornam-se mais intensas, podendo acelerar processos de envelhecimento e degradação. Por outro lado, em temperaturas reduzidas ocorre uma diminuição da mobilidade dos íons de lítio no interior da célula, aumentando a resistência interna e reduzindo temporariamente a capacidade disponível. Dessa forma, a faixa de temperatura de operação constitui um dos fatores mais importantes para garantir o desempenho adequado e a segurança do sistema (EDGE et al., 2021).

Outro aspecto importante está relacionado à eficiência energética do processo. Devido à elevada reversibilidade das reações eletroquímicas, as baterias

de íons de lítio apresentam eficiências de carga e descarga superiores às observadas em diversas tecnologias de armazenamento de energia. Entretanto, parte da energia é inevitavelmente dissipada na forma de calor devido à resistência interna das células, tornando o gerenciamento térmico um elemento essencial para aplicações que demandam elevados níveis de potência, como os veículos elétricos (REDDY; LINDEN, 2011).

Portanto, os processos de carga e descarga não se limitam apenas à transferência de energia para dentro ou para fora da bateria. Eles envolvem uma série de fenômenos eletroquímicos, elétricos e térmicos que influenciam diretamente o desempenho, a segurança e a vida útil do sistema. A compreensão desses processos é fundamental para o correto dimensionamento, monitoramento e operação dos bancos de baterias utilizados em aplicações automotivas e sistemas modernos de armazenamento de energia.

3.5 Processos de Degradação das Baterias de Íon-Lítio

As baterias de íons de lítio destacam-se entre as tecnologias de armazenamento de energia atualmente disponíveis devido à sua elevada densidade energética, alta eficiência e longa vida útil. Entretanto, assim como qualquer sistema eletroquímico, seu desempenho não permanece constante ao longo do tempo. Durante sua operação, diversos fenômenos químicos, eletroquímicos e mecânicos ocorrem no interior das células, provocando alterações graduais em suas características originais. Como consequência, observa-se uma redução progressiva da capacidade de armazenamento de energia e um aumento da resistência interna, fatores que afetam diretamente a autonomia, a potência disponível e a eficiência do sistema (EDGE et al., 2021).

De forma geral, a degradação das baterias de íons de lítio pode ser compreendida como o conjunto de processos que provocam a perda gradual de desempenho das células ao longo de sua vida útil. Diferentemente do que muitas vezes se imagina, essa degradação não ocorre apenas quando a bateria está sendo utilizada. Mesmo quando permanece armazenada e sem realizar ciclos de carga e descarga, as reações químicas internas continuam ocorrendo lentamente, contribuindo para o envelhecimento do sistema (O'KANE et al., 2022).

Os processos de degradação normalmente são classificados em duas categorias principais: envelhecimento por ciclagem (*cycle aging*) e envelhecimento cronológico (*calendar aging*). O envelhecimento por ciclagem está associado às sucessivas operações de carga e descarga realizadas durante a utilização da bateria. A cada ciclo ocorre uma pequena perda de desempenho decorrente do desgaste natural dos materiais que compõem os eletrodos e o eletrólito. Já o envelhecimento calendárico está relacionado à passagem do tempo e ocorre independentemente da utilização da bateria, sendo influenciado principalmente pela temperatura de armazenamento e pelo estado de carga em que a célula permanece durante longos períodos (O'KANE et al., 2022).

Entre os principais fenômenos responsáveis pela degradação das baterias de íons de lítio destaca-se o crescimento da camada de interface eletrolítica sólida, conhecida como *Solid Electrolyte Interphase* (SEI). Essa camada é formada naturalmente na superfície do ânodo durante os primeiros ciclos de operação e desempenha papel fundamental na estabilização das reações eletroquímicas da célula. Entretanto, seu crescimento contínuo ao longo da vida útil consome parte dos íons de lítio disponíveis para o processo de armazenamento de energia, reduzindo gradualmente a capacidade da bateria e aumentando sua resistência interna (EDGE et al., 2021).

Outro mecanismo importante está relacionado à degradação dos materiais ativos presentes nos eletrodos. Durante os ciclos de carga e descarga, os materiais que compõem o ânodo e o cátodo são submetidos a constantes expansões e contrações decorrentes da movimentação dos íons de lítio. Ao longo do tempo, essas variações podem provocar alterações estruturais, perda de material ativo e redução da capacidade de armazenamento da célula. Paralelamente, também podem ocorrer processos de degradação do eletrólito, aumentando a resistência interna e reduzindo a eficiência energética do sistema (O'KANE et al., 2022).

A velocidade com que esses processos ocorrem depende diretamente das condições de operação da bateria. Fatores como profundidade de descarga, correntes elevadas de carga e descarga, temperaturas extremas e permanência prolongada em estados elevados de carga tendem a acelerar os mecanismos de envelhecimento. Por essa razão, o controle adequado dos parâmetros elétricos e térmicos constitui um dos

principais objetivos dos sistemas de gerenciamento de baterias, que buscam minimizar a degradação e prolongar a vida útil do conjunto (PLETT, 2015).

Nas baterias de fosfato de ferro-lítio (LiFePO_4 ou LFP), utilizadas neste trabalho, os processos gerais de degradação seguem os mesmos princípios observados em outras químicas de íons de lítio. Contudo, essa tecnologia apresenta características que favorecem uma maior durabilidade quando comparada a sistemas baseados em óxidos de níquel, manganês e cobalto. A elevada estabilidade estrutural do material catódico, associada à sua maior estabilidade térmica e química, contribui para reduzir a velocidade de degradação e aumentar a segurança operacional do sistema. Além disso, as baterias LFP apresentam menor suscetibilidade a eventos de fuga térmica (*thermal runaway*), característica particularmente importante em aplicações automotivas e sistemas de armazenamento de grande porte (PADHI; NANJUNDASWAMY; GOODENOUGH, 1997).

A compreensão dos processos de degradação das baterias de íons de lítio é fundamental para a avaliação do estado de conservação de um banco de baterias e para a definição de estratégias adequadas de manutenção, substituição ou modernização. O conhecimento desses fenômenos também permite compreender as limitações impostas pelo envelhecimento das células e auxilia no desenvolvimento de soluções capazes de aumentar a vida útil dos sistemas de armazenamento de energia, garantindo maior confiabilidade, segurança e desempenho ao longo de sua operação.

4 DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA

A recuperação de veículos elétricos que apresentam degradação em seus sistemas de armazenamento de energia requer uma análise detalhada do banco de baterias original, considerando tanto suas características construtivas quanto seus aspectos elétricos. Em situações como essa, a simples substituição das células não é suficiente, sendo necessário compreender a arquitetura desenvolvida pelo fabricante, os sistemas responsáveis pelo monitoramento e gerenciamento das baterias e os procedimentos necessários para a desmontagem e posterior remontagem do conjunto.

Nesse contexto, foi estudado um veículo elétrico Mitsubishi i-MiEV, ano de fabricação 2010, pertencente à frota da Centrais Elétricas de Santa Catarina (CELESC) e encaminhado ao Laboratório de Eletromobilidade (EMoL) do Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC). O veículo encontrava-se fora de operação devido à degradação do sistema de armazenamento de energia, condição que comprometeu seu funcionamento e motivou a realização deste estudo.

Antes da definição de uma nova configuração de baterias, tornou-se necessário compreender detalhadamente a estrutura do sistema original. Para isso, foi realizada a desmontagem completa do banco de baterias, permitindo o acesso aos componentes internos, a identificação da configuração adotada pelo fabricante e o levantamento das características elétricas e dimensionais do conjunto. Paralelamente, todas as etapas executadas foram registradas e documentadas, resultando na elaboração de um procedimento técnico de desmontagem e remontagem. Além de auxiliar no desenvolvimento deste trabalho, esse material poderá servir como referência para futuras intervenções, manutenções e reconstruções de sistemas semelhantes.

A partir das informações obtidas durante a análise do conjunto original, foi realizado o dimensionamento de uma nova configuração de baterias. A proposta consistiu na utilização de células compatíveis com a arquitetura elétrica do veículo, mantendo os requisitos necessários para comunicação com os sistemas de monitoramento e gerenciamento existentes, porém com maior capacidade de armazenamento de energia. Dessa forma, buscou-se recuperar as condições de

funcionamento do veículo e proporcionar um aumento de sua autonomia operacional, permitindo seu retorno às atividades da concessionária.

Nas seções seguintes são descritas as etapas de desmontagem do banco de baterias, os procedimentos utilizados para caracterização do sistema original e os cálculos empregados no dimensionamento da nova configuração proposta.

4.1 Características do Mitsubishi i-MiEV

O Mitsubishi i-MiEV (Mitsubishi innovative Electric Vehicle) - Figura 5, foi um dos primeiros veículos elétricos produzidos em larga escala e disponibilizados comercialmente em diferentes mercados ao redor do mundo. Lançado inicialmente no Japão em 2009, o modelo representou um importante marco no processo de eletrificação da mobilidade urbana, demonstrando a viabilidade da utilização de veículos movidos exclusivamente por energia elétrica em aplicações do dia a dia. Seu desenvolvimento esteve alinhado à crescente busca por alternativas capazes de reduzir as emissões de poluentes e diminuir a dependência de combustíveis fósseis no setor de transportes (MITSUBISHI MOTORS, 2015).

Figura 5 – Veículo elétrico Mitsubishi i-MiEV



Fonte: Adaptado de Mitsubishi Motors Corporation (2024).

O sistema de propulsão do i-MiEV é composto por um motor elétrico alimentado por um banco principal de baterias de íon-lítio de alta tensão, responsável

pelo fornecimento da energia necessária para a movimentação do veículo. Além do sistema principal de armazenamento, o veículo possui uma bateria auxiliar de 12 V destinada à alimentação dos módulos eletrônicos, sistemas de controle, iluminação e demais equipamentos auxiliares. A arquitetura elétrica também inclui componentes como inversor de potência, carregador embarcado e conversor CC-CC (DC-DC), responsáveis pelo gerenciamento e pela distribuição da energia entre os diferentes subsistemas do veículo (MITSUBISHI MOTORS, 2015).

O veículo analisado neste estudo corresponde a um Mitsubishi i-MiEV ano 2010 que, após anos de utilização e longos períodos em que permaneceu fora de operação, passou a apresentar degradação significativa em seu sistema de armazenamento de energia. Como consequência, o banco de baterias original deixou de atender às condições necessárias para o funcionamento adequado do veículo, comprometendo sua utilização e autonomia operacional.

Diante desse cenário, tornou-se necessário realizar uma análise detalhada do sistema original, abrangendo a identificação de seus componentes, a caracterização de sua arquitetura elétrica e o levantamento de suas características construtivas. Para isso, foram desenvolvidos procedimentos específicos para a remoção do banco de baterias, abertura dos *packs* e inspeção dos módulos internos. Todas as etapas executadas foram registradas e documentadas, resultando na elaboração de guias técnicos de desmontagem e remontagem que poderão auxiliar futuras atividades de manutenção e intervenção no sistema.

A partir das informações obtidas durante a caracterização do conjunto original, foi proposta uma nova configuração de baterias utilizando células com tensão nominal compatível com a arquitetura empregada pelo fabricante, porém com capacidade de armazenamento superior.

Essa solução foi desenvolvida com o objetivo de substituir as células degradadas, recuperar as condições de funcionamento do veículo e aumentar sua autonomia operacional, preservando a compatibilidade com os sistemas eletrônicos de monitoramento e gerenciamento originalmente instalados.

4.2 Análise do veículo i-MiEV - Mitsubishi

O veículo i-MiEV Mitsubishi pertencente à frota da Centrais Elétricas de Santa Catarina (CELESC), foi recebido pelo Laboratório de Mobilidade Elétrica (EMoL) do Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC) no início do mês de novembro de 2025 para análise e manutenção. Características dos problemas apresentados:

- Veículo sem manutenção elétrica - Nenhum sistema elétrico em funcionamento;
- Veículo sem manutenção mecânica - Pneus vazios, sem alinhamento de direção;
- Veículo sem manutenção estética - Veículo em má conservação de limpeza interna e externa.

A Figura 6 apresenta o estado de conservação do veículo recebido pelo laboratório de mobilidade elétrica.

Figura 6 – Estado de Conservação do i-MiEV - Recebimento no EMoL



Fonte: EMoL/IFSC (2026).

O primeiro trabalho realizado no veículo foi uma completa limpeza tanto externa com interna, pois o mesmo apresentava sinais de invasão de insetos e pequenos animais. Após o processo de limpeza e higienização do veículo a primeira manutenção aplicada foi referente a questão do funcionamento elétrico-eletrônico do veículo, para tanto foi constatado que a bateria de 12V do veículo encontrava-se descarregada. Após aplicação de carga na mesma foi identificado que havia necessidade de troca da bateria de 12V, a qual foi efetuada pela equipe do laboratório do EMoL.

Com a troca da bateria de 12V todo o sistema eletrônico do veículo voltou a funcionar normalmente e foi possível fazer a verificação do funcionamento de todos os sistemas elétricos do veículo.

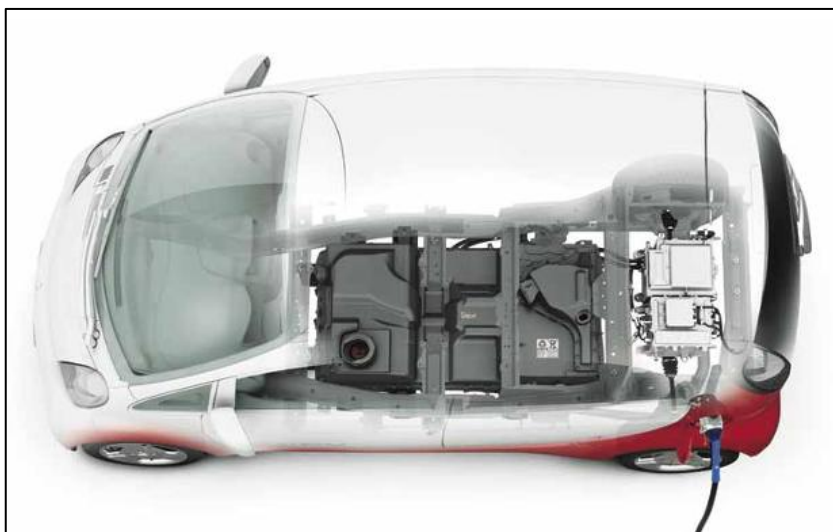
A segunda intervenção no veículo i-MiEV foi referente a manutenção mecânica básica: que incluiu pneus, alinhamento, verificação de freios etc.

Uma vez que os sistemas internos elétrico-eletrônicos do veículo voltaram a funcionar o objetivo passou a ser a verificação do sistema de banco de baterias de tração do veículo.

4.3 A bateria do veículo i-MiEV - Mitsubishi

A Figura 7 mostra a disposição interna da bateria de tração do i-MiEV. A bateria de tração do i-MiEV é composta por 88 células de Íon Lítio, distribuídas em 11 Packs de 8 células individuais. O conjunto de baterias de Íon de Lítio de alta densidade do i-MiEV oferece uma autonomia de 150 km por carga.

Figura 7 – i-MiEV - Bateria de tração



Fonte: EMoL/IFSC (2026).

Para verificar as condições da bateria foi utilizado o Scanner modelo FCAR do laboratório de mobilidade Elétrica do IFSC. A Figura 8 apresenta as telas de análise dos módulos da bateria de tração do veículo i-MiEV.

Na Figura 8, pode-se verificar - em ordem de cima para baixo e da esquerda para direita - todas as 88 células que compõe a bateria. A tensão média destas células é de 3,7V - sendo que o máximo permitido é 4,2 V e o mínimo 2,8 V.

Pode-se ver que as células de 01 a 30 estão em alto nível de tensão (em torno de 4 V) o que significa que estas estão mantendo a carga e provavelmente em bom estado.

A partir da célula 31 a até a 88 todas estão em baixo nível de tensão (em torno de 2,1V) o que significa que as mesmas estão descarregadas e provavelmente danificadas.

Figura 8 – Telas do Scanner: Estado das células de cada pack da bateria

ma/BMU/Lista de dados/Dados voltagem da bateria

ID	Nome	Valores atuais	Unidade
1	34 CMU ID01 tensão celular A	4.015	V
2	35 CMU ID01 tensão celular B	4.015	V
3	36 CMU ID01 tensão celular C	4.015	V
4	37 CMU ID01 Tensão celular D	4.010	V
5	38 CMU ID01 tensão celular E	4.015	V
6	39 CMU ID01 tensão celular F	4.010	V
7	40 CMU ID01 tensão celular G	4.015	V
8	41 CMU ID01 tensão celular H	4.010	V
9	42 CMU ID02 tensão celular A	4.010	V
10	43 CMU ID02 tensão celular B	4.010	V

ma/BMU/Lista de dados/Dados voltagem da bateria

ID	Nome	Valores atuais	Unidade
10	43 CMU ID02 tensão celular B	4.010	V
11	44 CMU ID02 tensão celular C	4.010	V
12	45 CMU ID02 Tensão celular D	4.015	V
13	46 CMU ID02 tensão celular E	4.010	V
14	47 CMU ID02 tensão celular F	4.015	V
15	48 CMU ID02 tensão celular G	4.015	V
16	49 CMU ID02 tensão celular H	4.010	V
17	50 CMU ID03 tensão celular A	4.010	V
18	51 CMU ID03 tensão celular B	4.010	V
19	52 CMU ID03 tensão celular C	4.010	V

ma/BMU/Lista de dados/Dados voltagem da bateria

ID	Nome	Valores atuais	Unidade
19	52 CMU ID03 tensão celular C	4.010	V
20	53 CMU ID03 Tensão celular D	4.010	V
21	54 CMU ID03 tensão celular E	4.010	V
22	55 CMU ID03 tensão celular F	4.010	V
23	56 CMU ID03 tensão celular G	4.010	V
24	57 CMU ID03 tensão celular H	4.010	V
25	58 CMU ID04 tensão celular A	4.010	V
26	59 CMU ID04 tensão celular B	4.010	V
27	60 CMU ID04 tensão celular C	4.010	V
28	61 CMU ID04 Tensão celular D	4.010	V

ma/BMU/Lista de dados/Dados voltagem da bateria

ID	Nome	Valores atuais	Unidade
28	61 CMU ID04 Tensão celular D	4.010	V
29	62 CMU ID04 tensão celular E	4.010	V
30	63 CMU ID04 tensão celular F	4.010	V
31	64 CMU ID04 tensão celular G	2.100	V
32	65 CMU ID04 tensão celular H	2.100	V
33	66 CMU ID05 tensão celular A	2.100	V
34	67 CMU ID05 tensão celular B	2.100	V
35	68 CMU ID05 tensão celular C	2.100	V
36	69 CMU ID05 tensão celular D	2.100	V
37	70 CMU ID05 tensão celular E	2.100	V

ma/BMU/Lista de dados/Dados voltagem da bateria

ID	Nome	Valores atuais	Unidade
37	70 CMU ID05 tensão celular E	2.100	V
38	71 CMU ID05 tensão celular F	2.100	V
39	72 CMU ID05 tensão celular G	2.100	V
40	73 CMU ID05 tensão celular H	2.100	V
41	74 CMU ID06 tensão celular A	2.100	V
42	75 CMU ID06 tensão celular B	2.100	V
43	76 CMU ID06 tensão celular C	2.100	V
44	77 CMU ID06 Tensão celular D	2.100	V
45	78 CMU ID07 tensão celular A	2.100	V
46	79 CMU ID07 tensão celular B	2.100	V

ma/BMU/Lista de dados/Dados voltagem da bateria

ID	Nome	Valores atuais	Unidade
46	79 CMU ID07 tensão celular B	2.100	V
47	80 CMU ID07 tensão celular C	2.100	V
48	81 CMU ID07 Tensão celular D	2.100	V
49	82 CMU ID07 tensão celular E	2.100	V
50	83 CMU ID07 tensão celular F	2.100	V
51	84 CMU ID07 tensão celular G	2.100	V
52	85 CMU ID07 tensão celular H	2.100	V
53	86 CMU ID08 tensão celular A	2.100	V
54	87 CMU ID08 tensão celular B	2.100	V
55	88 CMU ID08 tensão celular C	2.100	V

ma/BMU/Lista de dados/Dados voltagem da bateria

ID	Nome	Valores atuais	Unidade
55	88 CMU ID08 tensão celular C	2.100	V
56	89 CMU ID08 Tensão celular D	2.100	V
57	90 CMU ID08 tensão celular E	2.100	V
58	91 CMU ID08 tensão celular F	2.100	V
59	92 CMU ID08 tensão celular G	2.100	V
60	93 CMU ID08 tensão celular H	2.100	V
61	94 CMU ID09 tensão celular A	2.100	V
62	95 CMU ID09 tensão celular B	2.100	V
63	96 CMU ID09 tensão celular C	2.100	V
64	97 CMU ID09 Tensão celular D	2.100	V

ma/BMU/Lista de dados/Dados voltagem da bateria

ID	Nome	Valores atuais	Unidade
64	97 CMU ID09 Tensão celular D	2.100	V
65	98 CMU ID09 tensão celular E	2.100	V
66	99 CMU ID09 tensão celular F	2.100	V
67	100 CMU ID09 tensão celular G	2.100	V
68	101 CMU ID09 tensão celular H	2.100	V
69	102 CMU ID10 tensão celular A	2.100	V
70	103 CMU ID10 tensão celular B	2.100	V
71	104 CMU ID10 tensão celular C	2.100	V
72	105 CMU ID10 Tensão celular D	2.100	V
73	106 CMU ID10 tensão celular E	2.100	V

ID	Nome	Valores atuais	Unidade
73	106 CMU ID10 tensão celular E	2.100	V
74	107 CMU ID10 tensão celular F	2.100	V
75	108 CMU ID10 tensão celular G	2.100	V
76	109 CMU ID10 tensão celular H	2.100	V
77	110 CMU ID11 tensão celular A	2.100	V
78	111 CMU ID11 tensão celular B	2.100	V
79	112 CMU ID11 tensão celular C	2.100	V
80	113 CMU ID11 Tensão celular D	2.100	V
81	114 CMU ID11 tensão celular E	2.100	V
82	115 CMU ID11 tensão celular F	2.100	V
79	112 CMU ID11 tensão celular C	2.100	V
80	113 CMU ID11 Tensão celular D	2.100	V
81	114 CMU ID11 tensão celular E	2.100	V
82	115 CMU ID11 tensão celular F	2.100	V
83	116 CMU ID11 tensão celular G	2.100	V
84	117 CMU ID11 tensão celular H	2.100	V
85	118 CMU ID12 tensão celular A	2.100	V
86	119 CMU ID12 tensão celular B	2.100	V
87	120 CMU ID12 tensão celular C	2.100	V
88	121 CMU ID12 Tensão celular D	2.100	V

Fonte: EMoL/IFSC (2026).

Como existem células em nível alto (Máximo) e células em nível baixo o sistema BMS (Battery Management System) impede a carga da bateria. O BMS (Sistema de Gerenciamento de Bateria) é o "cérebro" de um conjunto de baterias, um sistema eletrônico crucial para monitorar e controlar baterias recarregáveis (especialmente de íon-lítio) para garantir a segurança, otimizar o desempenho e prolongar a vida útil, gerenciando a tensão das células, a temperatura, a carga/descarga e o balanceamento das células para uma operação uniforme.

O BMS protege contra sobrecarga, superaquecimento e curto-circuito, tornando as baterias de Íon Lítio mais seguras e eficientes para aplicações como veículos elétricos, armazenamento de energia e ferramentas elétricas. Deste modo, concluiu-se que uma análise mais precisa das células somente pode ser feita com a desmontagem da bateria.

4.4 Desmontagem e Caracterização do Banco de Baterias

A avaliação das condições do banco de baterias do Mitsubishi i-MiEV exigiu uma análise detalhada de sua configuração construtiva e dos componentes responsáveis pelo armazenamento, monitoramento e gerenciamento da energia do veículo. Para isso, foi necessária a desmontagem completa do conjunto originalmente instalado no automóvel, permitindo o acesso aos módulos internos e o levantamento das informações técnicas necessárias para o desenvolvimento da proposta de substituição das células.

Além de possibilitar a inspeção dos componentes e a caracterização da arquitetura empregada pelo fabricante, o processo de desmontagem permitiu documentar a disposição física dos módulos, identificar os sistemas auxiliares presentes no conjunto e compreender a integração entre os elementos mecânicos, elétricos e eletrônicos que compõem o sistema de armazenamento de energia.

Foram desenvolvidos procedimentos específicos para remoção, abertura e inspeção do banco de baterias. Durante todo o processo foram produzidos registros fotográficos, relatórios técnicos e anotações que serviram de base para a elaboração de guias de desmontagem e remontagem, bem como para o levantamento dos parâmetros utilizados no dimensionamento da nova configuração proposta.

Nas seções seguintes são apresentados a configuração geral do sistema, os procedimentos adotados para a remoção e desmontagem do conjunto, a identificação dos componentes internos e as principais informações obtidas durante a caracterização do banco de baterias.

4.4.1 Configuração Geral do Sistema

O sistema de armazenamento de energia constitui o principal componente de um veículo elétrico, sendo responsável pelo fornecimento da energia necessária para a propulsão do veículo, alimentação dos sistemas auxiliares e funcionamento dos módulos eletrônicos embarcados. No Mitsubishi i-MiEV, o conjunto de baterias foi projetado para atender às demandas energéticas do sistema de tração elétrica, garantindo níveis adequados de autonomia e desempenho para aplicações urbanas (MITSUBISHI MOTORS, 2010).

Diferentemente dos veículos equipados com motores de combustão interna, nos quais a energia é armazenada sob a forma química em combustíveis líquidos, os veículos elétricos dependem integralmente da energia armazenada em baterias. Dessa forma, a capacidade energética disponível influencia diretamente a autonomia, o desempenho e a viabilidade operacional do veículo.

A disposição do banco de baterias em relação aos demais sistemas do veículo podem ser observada na Figura 9.

Figura 9 – Localização do banco de baterias sob o assoalho do i-MiEV



Fonte: Adaptado de Mitsubishi Motors Corporation (2010).

No Mitsubishi i-MiEV, o banco de baterias está instalado sob o assoalho do veículo, ocupando praticamente toda a região central inferior do chassi. Essa solução construtiva foi adotada pelo fabricante para otimizar a distribuição de massa, reduzir o centro de gravidade e aumentar a estabilidade dinâmica do veículo durante a operação. Além disso, a estrutura metálica que abriga o conjunto proporciona proteção mecânica às células e aos componentes eletrônicos instalados internamente.

O conjunto original é composto por 88 células de íons de lítio conectadas em série, resultando em uma tensão nominal aproximada de 325,6 V. Cada célula apresenta tensão nominal próxima de 3,7 V e capacidade nominal de aproximadamente 50 Ah. Considerando a configuração original do sistema e utilizando a Equação (3), apresentada anteriormente, obtém-se uma energia armazenada próxima de 16,3 kWh, valor compatível com as especificações do fabricante (MITSUBISHI MOTORS, 2010). Este banco de baterias proporciona uma autonomia entre 80 a 120 km do veículo.

Após aproximadamente quinze anos de utilização, associados a longos períodos em que o veículo permaneceu fora de operação, o conjunto passou a

apresentar redução significativa de capacidade e autonomia. Esse comportamento está associado aos mecanismos de degradação discutidos no Capítulo 3, resultantes tanto do envelhecimento natural das células quanto dos processos relacionados aos ciclos de carga e descarga (EDGE et al., 2021).

Diante desse cenário, tornou-se necessária uma avaliação detalhada do banco de baterias, exigindo a desmontagem completa do conjunto para identificação de seus componentes, levantamento de suas características construtivas e obtenção dos parâmetros necessários para o desenvolvimento da proposta de substituição das células originais.

4.4.2 Remoção do Banco de Baterias

Como a documentação disponível para desmontagem completa do banco de baterias do Mitsubishi i-MiEV é limitada, foi necessário desenvolver um procedimento específico para execução das atividades, contemplando desde o diagnóstico inicial até a remoção dos módulos internos.

Inicialmente foi realizado um diagnóstico preliminar do veículo utilizando um scanner automotivo conectado à interface OBD-II. Essa etapa teve como objetivo registrar informações referentes às condições de operação do sistema antes da intervenção e identificar possíveis códigos de falha relacionados ao banco de baterias. A localização da interface utilizada durante os procedimentos de diagnóstico é apresentada na Figura 10.

Figura 10 – Localização da porta OBD-II utilizada para diagnóstico do veículo



Fonte: EMoL/IFSC (2026).

Após o diagnóstico, iniciaram-se os procedimentos de segurança necessários para a intervenção no sistema de alta tensão. Inicialmente foi realizada a desconexão da bateria auxiliar de 12 V e posteriormente a remoção do *High Voltage Disconnect* (HVD), responsável pelo isolamento elétrico do banco principal de baterias. O dispositivo removido durante o procedimento é apresentado na Figura 11.

Concluídas as etapas de isolamento elétrico, o veículo foi elevado para possibilitar o acesso à região inferior do chassi. Em seguida foram removidas as chapas metálicas de proteção, os conectores de potência e os elementos de fixação responsáveis pela sustentação do conjunto. Devido às dimensões e ao peso do banco de baterias, sua remoção exigiu a utilização de equipamentos de apoio adequados, garantindo a segurança dos operadores e a integridade dos componentes durante todo o procedimento.

Figura 11 – High Voltage Disconnect (HVD)



Fonte: EMoL/IFSC (2026).

Após sua retirada, o conjunto foi transferido para uma bancada apropriada para continuidade das atividades de inspeção e desmontagem. A Figura 12 apresenta o banco de baterias já removido do veículo e posicionado na área de trabalho.

Figura 12 – Banco de baterias instalado sob o veículo depois da remoção



Fonte: EMoL/IFSC (2026).

A partir disso foi possível realizar uma avaliação preliminar de sua estrutura externa e identificar os principais elementos de fixação da carcaça.

4.4.3 Abertura da Carcaça e Inspeção Inicial do Banco de Baterias

Antes da abertura da carcaça, foi realizada uma limpeza completa da estrutura externa, removendo resíduos acumulados ao longo dos anos de utilização e facilitando a identificação dos elementos de fixação.

Na sequência, foram removidos os cabos externos que estavam fixos na carcaça, como também as barras laterais, além dos parafusos internos junto ao conector do HVD para a retirada da tampa superior. O procedimento de remoção da tampa do conjunto é apresentado na Figura 13.

Figura 13 – Remoção dos cabos e barras laterais da carcaça

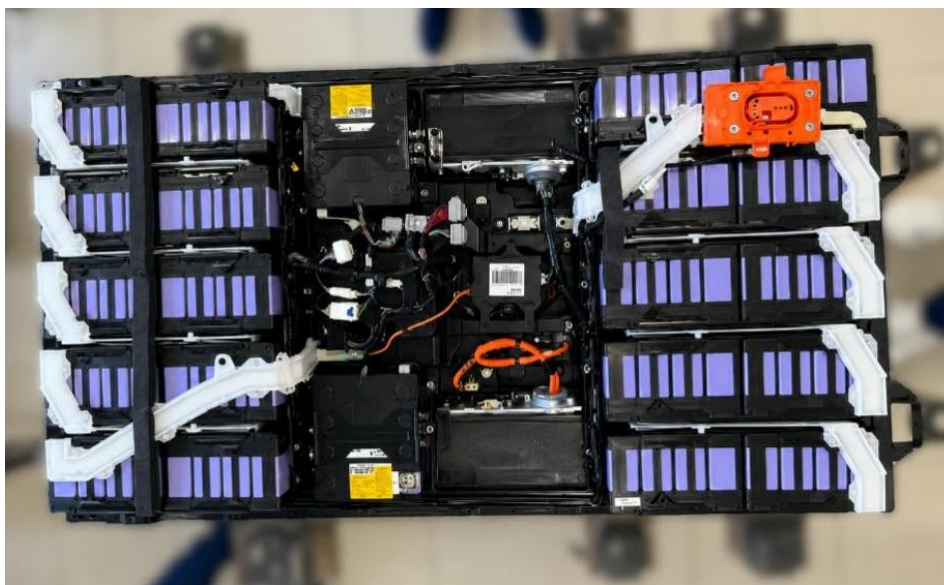


Fonte: EMoL/IFSC (2026).

Com a retirada da tampa superior, tornou-se possível visualizar pela primeira vez a arquitetura interna do banco de baterias.

A disposição dos módulos, sistemas auxiliares e componentes eletrônicos identificados durante essa etapa pode ser observada na Figura 14.

Figura 14 – Vista geral do interior do banco de baterias após a abertura



Fonte: EMoL/IFSC (2026).

A visualização do interior do banco de baterias permitiu identificar a disposição dos módulos de armazenamento de energia, dos sistemas de interligação elétrica e dos componentes responsáveis pelo monitoramento e gerenciamento do conjunto. A organização interna observada evidencia a integração entre os sistemas de potência, proteção e controle empregados pelo fabricante, fornecendo informações fundamentais para as etapas de caracterização, levantamento dimensional e definição da nova configuração de baterias proposta neste trabalho.

4.4.4 Desmontagem dos Componentes Internos do Banco de Baterias

Após a remoção da tampa superior, iniciou-se a desmontagem sistemática dos componentes internos do banco de baterias, com o objetivo de identificar a arquitetura construtiva adotada pelo fabricante e compreender a integração entre os subsistemas responsáveis pelo armazenamento, monitoramento, proteção e distribuição de energia elétrica. Essa etapa também possibilitou o levantamento das

informações necessárias para o desenvolvimento da proposta de substituição das células originais.

Os primeiros componentes removidos foram os elementos associados ao sistema de gerenciamento térmico, localizados na região superior dos *packs* dianteiros, próximos ao compartimento do *High Voltage Disconnect* (HVD).

Conforme pode ser observado na Figura 15, esse conjunto encontra-se instalado sobre os módulos de baterias e possui a função de auxiliar na circulação do fluxo de ar no interior do banco, contribuindo para a dissipação do calor gerado durante a operação das células.

Figura 15 – Sistema de gerenciamento térmico localizado sobre os *packs* dianteiros

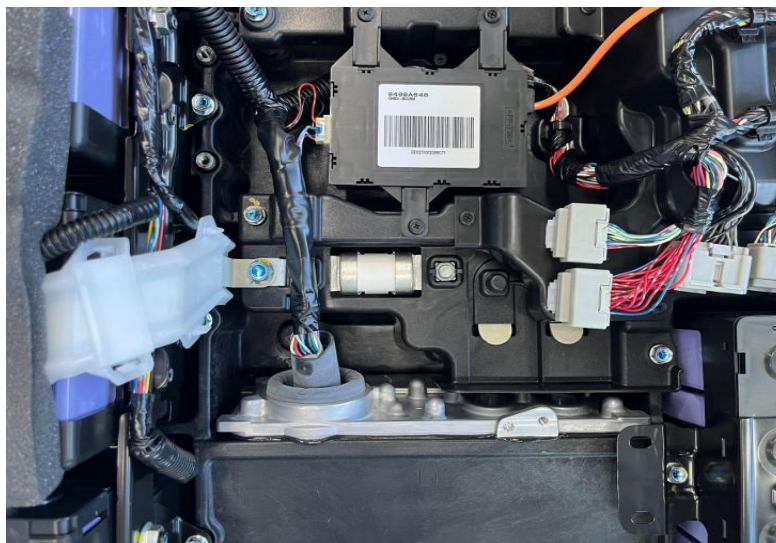


Fonte: EMoL/IFSC (2026).

A remoção desses componentes permitiu o acesso aos dispositivos de proteção elétrica e aos elementos responsáveis pela distribuição de potência entre os módulos.

Nessa etapa foram identificados fusíveis, conectores de alta tensão, terminais de potência e demais componentes associados à proteção do sistema. Os principais elementos identificados podem ser observados na Figura 16.

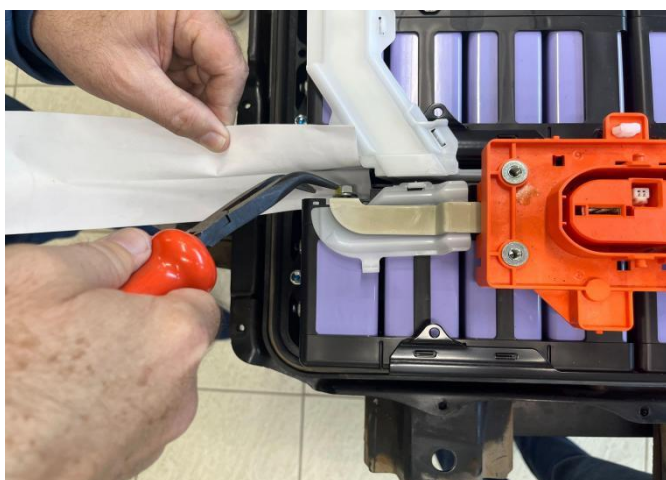
Figura 16 – Dispositivos de proteção elétrica e conexões de potência



Fonte: EMoL/IFSC (2026).

Após a remoção dos dispositivos de proteção, iniciou-se a desmontagem dos barramentos responsáveis pela interligação elétrica dos *packs*. Esses componentes possuem elevada capacidade de condução de corrente e desempenham papel fundamental na conexão em série dos módulos. A disposição dos barramentos e dos componentes associados ao sistema HVD pode ser observada na Figura 17.

Figura 17 – Barramentos de interligação e componentes associados ao sistema HVD



Fonte: EMoL/IFSC (2026).

Com os barramentos removidos, tornou-se possível acessar os módulos eletrônicos responsáveis pelo monitoramento das células. Durante essa etapa foram identificados os chicotes de comunicação, conectores e placas eletrônicas responsáveis pela aquisição das informações operacionais do banco de baterias. Os componentes identificados durante esse procedimento são apresentados na Figura 18.

Figura 18 – Módulos de monitoramento, conectores e chicotes de comunicação



Fonte: EMoL/IFSC (2026).

A documentação desses componentes permitiu compreender a arquitetura de monitoramento empregada pelo fabricante e identificar os elementos responsáveis pela aquisição das tensões individuais das células e pela transmissão dessas informações ao sistema central de gerenciamento do veículo. O conhecimento obtido durante essa etapa foi fundamental para definir os requisitos de compatibilidade da nova configuração proposta, garantindo a preservação das funcionalidades de monitoramento e proteção originalmente implementadas no sistema.

4.4.5 Remoção dos *Packs* e Levantamento das Informações de Projeto

Após a remoção dos sistemas auxiliares, barramentos de interligação e módulos de monitoramento, iniciou-se a desmontagem individual dos *packs* de baterias. Essa etapa teve como objetivo possibilitar o acesso direto às células, aos componentes eletrônicos internos e aos elementos estruturais utilizados pelo fabricante na montagem do conjunto.

Inicialmente foram removidas as proteções metálicas inferior e superior dos módulos, responsáveis pela proteção mecânica das células e dos componentes eletrônicos internos. Em seguida, foi retirada a tampa plástica utilizada para isolamento dos terminais elétricos, permitindo o acesso às conexões de potência e aos componentes do sistema de monitoramento.

A sequência de desmontagem adotada para abertura dos *packs* pode ser observada na Figura 19.

Figura 19 – Etapas iniciais da desmontagem dos *packs* de baterias



Fonte: EMoL/IFSC (2026).

Com os terminais expostos, procedeu-se à desconexão dos módulos internos do *pack*, incluindo a remoção das conexões associadas ao sistema de gerenciamento de baterias. Nessa etapa foram desconectados os módulos de

monitoramento (*Battery Management System – BMS*), os conectores de comunicação e os terminais de potência responsáveis pela interligação elétrica das células.

A desmontagem permitiu identificar a arquitetura de monitoramento empregada pelo fabricante, bem como a forma como as informações de tensão e temperatura são adquiridas e transmitidas ao sistema central de gerenciamento do veículo. A disposição desses componentes pode ser observada na Figura 20.

Figura 20 – Desconexão dos módulos de monitoramento e terminais de potência



Fonte: EMoL/IFSC (2026).

Após a desconexão dos sistemas eletrônicos, foi removida a placa de entrada do BMS, responsável pela interface entre os módulos de monitoramento e as células do *pack*. Em seguida, foram retiradas as conexões elétricas individuais existentes entre as células, permitindo o isolamento completo dos elementos eletroquímicos e a continuidade das atividades de desmontagem.

Durante esse procedimento também foi removida a estrutura de fixação responsável por sustentar as placas eletrônicas de monitoramento. Observou-se que parte desses componentes encontrava-se aderida à estrutura do módulo por meio de

material colante aplicado pelo fabricante, exigindo cuidados adicionais durante sua remoção para evitar danos aos dispositivos eletrônicos e aos sistemas de medição.

A Figura 21 apresenta os componentes eletrônicos internos identificados durante a desmontagem do *pack*.

Figura 21 – Placas eletrônicas de monitoramento e conexões internas do pack



Fonte: EMoL/IFSC (2026).

Concluída a remoção dos componentes eletrônicos e das interligações elétricas, procedeu-se à retirada da estrutura externa do módulo. Para execução dessa atividade, o *pack* foi cuidadosamente invertido e apoiado sobre superfície isolante adequada, utilizando-se proteção de borracha para evitar danos mecânicos às células e minimizar riscos associados à exposição dos terminais elétricos.

Durante todas as etapas de manipulação, as células permaneceram posicionadas com os terminais voltados para cima e devidamente isolados, reduzindo

a possibilidade de contatos acidentais e curtos-circuitos entre os elementos do conjunto. Esse procedimento foi fundamental para garantir a segurança da equipe e preservar a integridade das células durante a desmontagem.

A desmontagem completa dos *packs* permitiu o acesso individual às células originalmente instaladas no veículo, possibilitando a realização de inspeções visuais, medições elétricas, levantamentos dimensionais e identificação dos componentes internos utilizados pelo fabricante. As informações obtidas nessa etapa serviram como base para a definição dos critérios de compatibilidade mecânica, elétrica e eletrônica adotados no desenvolvimento da nova configuração de baterias proposta neste trabalho.

4.5 Análise das células originais

A análise das células originais constituiu uma etapa fundamental para compreender as condições reais do sistema de armazenamento de energia do Mitsubishi i-MiEV e estabelecer os critérios técnicos que nortearam o desenvolvimento da nova configuração proposta neste trabalho. A partir da desmontagem completa do banco de baterias foi possível avaliar não apenas o estado das células, mas também as condições dos componentes responsáveis pela distribuição de potência, monitoramento, proteção e integração do sistema.

Como o veículo analisado corresponde a um Mitsubishi i-MiEV fabricado em 2010, isso significa que suas baterias permaneceram em operação por aproximadamente quinze anos. Ao longo desse período, as células estiveram sujeitas aos processos naturais de envelhecimento característicos das baterias de íons de lítio, incluindo tanto a degradação associada aos ciclos de carga e descarga quanto os mecanismos relacionados ao envelhecimento calendário. Conforme discutido anteriormente, esses fenômenos promovem redução gradual da capacidade de armazenamento, aumento da resistência interna e perda de desempenho energético (EDGE et al., 2021; O'KANE et al., 2022).

Além da idade do conjunto, informações levantadas durante o desenvolvimento do projeto indicaram que o veículo permaneceu longos períodos com baixa utilização. Essa condição é particularmente relevante em sistemas de

armazenamento de energia baseados em baterias de íons de lítio, uma vez que o envelhecimento não está associado apenas à quantidade de ciclos realizados, mas também ao tempo de exposição das células a determinadas condições de armazenamento e estados de carga (PLETT, 2015).

A desmontagem dos módulos permitiu avaliar o estado geral dos componentes internos do banco de baterias, incluindo barramentos de interligação, conectores elétricos, dispositivos de proteção, sistemas de monitoramento e estruturas mecânicas de fixação. De modo geral, os componentes apresentaram condições compatíveis com o tempo de utilização do veículo, sem evidências de falhas estruturais que inviabilizassem a reutilização da carcaça e dos sistemas auxiliares existentes.

A inspeção também permitiu compreender de forma detalhada a arquitetura construtiva empregada pelo fabricante, incluindo a disposição dos módulos, a configuração elétrica do conjunto e a integração dos sistemas eletrônicos de monitoramento e proteção. Essas informações foram fundamentais para definir os requisitos de compatibilidade da nova solução, uma vez que o projeto prevê a manutenção da maior parte da estrutura original do veículo.

Outro aspecto importante identificado durante a análise foi a necessidade de preservar a compatibilidade dimensional entre as novas células e os compartimentos originalmente utilizados pelo fabricante. Como a proposta contempla a reutilização da carcaça metálica, dos sistemas de fixação e dos dispositivos eletrônicos existentes, as dimensões físicas das novas células passaram a representar uma restrição de projeto tão relevante quanto os requisitos elétricos de tensão e capacidade.

Dessa forma, a avaliação das células originais extrapolou a simples verificação do estado de degradação do conjunto. A análise permitiu compreender as limitações impostas pela arquitetura existente, identificar os requisitos necessários para integração das novas células e reunir as informações técnicas utilizadas no desenvolvimento da proposta de substituição apresentada nas seções seguintes. A partir desse levantamento, tornou-se possível estabelecer uma solução capaz de aumentar significativamente a capacidade energética do veículo, preservando sua compatibilidade mecânica, elétrica e eletrônica.

4.6 Dimensionamento do novo banco de baterias

A análise realizada nas etapas anteriores evidenciou que a principal limitação do Mitsubishi i-MiEV estudado estava associada à redução da capacidade de armazenamento de energia do banco de baterias original. Embora a arquitetura do sistema permanecesse funcional, o envelhecimento natural das células e o longo período de utilização do veículo resultaram em uma perda significativa de autonomia, tornando necessária a substituição do conjunto de armazenamento de energia.

A definição da nova configuração exigiu a avaliação simultânea de aspectos elétricos, mecânicos e eletrônicos. Como o objetivo do trabalho não era desenvolver um novo sistema de baterias, mas sim modernizar o conjunto existente, buscou-se preservar ao máximo a arquitetura originalmente empregada pela Mitsubishi Motors. Essa abordagem permite aproveitar componentes que permanecem plenamente funcionais, reduzindo a necessidade de intervenções em sistemas já integrados ao veículo.

Durante a desmontagem do banco de baterias foi possível identificar que toda a arquitetura de monitoramento e proteção foi desenvolvida para operar com um conjunto formado por 88 células conectadas em série. Em razão disso, optou-se por manter a mesma configuração elétrica adotada pelo fabricante. Conforme apresentado pela Equação (1), a associação de 88 células com tensão nominal de aproximadamente 3,7 V resulta em uma tensão nominal próxima de 325,6 V, valor compatível com o sistema de tração elétrica e com os módulos eletrônicos originalmente instalados no veículo.

Mantida a configuração elétrica, a etapa seguinte consistiu na seleção das novas células. Além da capacidade de armazenamento, foram considerados fatores como dimensões físicas, facilidade de integração ao conjunto original e compatibilidade com os componentes já existentes. As observações realizadas durante a desmontagem mostraram que os espaços internos disponíveis nos módulos impõem limitações importantes para a escolha das células, tornando necessário buscar uma solução capaz de aumentar a energia armazenada sem exigir modificações estruturais significativas.

Com base nesses critérios, foram selecionadas células com capacidade nominal de 93 Ah e tensão nominal equivalente às células originais. Essa escolha permitiu manter a tensão do sistema praticamente inalterada, preservando a compatibilidade com as unidades de monitoramento (BMU), com o sistema de gerenciamento de baterias (BMS) e com os demais dispositivos eletrônicos embarcados.

A capacidade energética do banco original foi determinada utilizando a Equação (3), apresentada na Seção 3.1.3. Considerando a tensão nominal do conjunto e a capacidade das células originais, obteve-se uma energia armazenada de aproximadamente 16,3 kWh. Aplicando o mesmo procedimento à configuração proposta, composta por células de 93 Ah, a energia armazenada passa para aproximadamente 30,3 kWh.

A diferença entre os dois valores evidencia o impacto da substituição das células sobre o desempenho energético do veículo. Utilizando a Equação (4) para determinação do ganho percentual de energia armazenada, foi obtido um incremento próximo de 86% em relação ao banco originalmente instalado no i-MiEV.

Embora a autonomia real dependa de fatores como perfil de condução, condições climáticas, topografia e utilização dos sistemas auxiliares, o aumento da energia disponível representa um ganho expressivo para a operação do veículo. Em termos práticos, a nova configuração amplia significativamente a quantidade de energia disponível para o sistema de tração sem exigir alterações relevantes na arquitetura elétrica original.

Outro aspecto importante observado durante o dimensionamento foi a possibilidade de reutilização da maior parte dos componentes estruturais e eletrônicos existentes. A manutenção da carcaça original, dos sistemas de fixação, dos barramentos e das unidades de monitoramento reduz a complexidade da implementação e contribui para preservar características de segurança previstas no projeto original do fabricante.

Assim, a solução proposta não se limita ao aumento da capacidade das baterias. O dimensionamento desenvolvido buscou conciliar desempenho, compatibilidade e viabilidade de implementação, resultando em uma configuração capaz de ampliar significativamente a capacidade energética do veículo sem

comprometer a integração com os sistemas originalmente presentes no Mitsubishi i-MiEV.

4.7 Compatibilidade com BMS e BMU

Durante a análise e desmontagem do banco de baterias foi possível observar que o sistema original do Mitsubishi i-MiEV apresenta forte integração entre as células, as unidades de monitoramento (BMU) e o Sistema de Gerenciamento de Baterias (BMS). Essa integração faz com que a substituição das células exija cuidados que vão além dos aspectos relacionados à capacidade energética ou às dimensões físicas dos componentes.

A inspeção dos *packs* permitiu identificar as placas de monitoramento, os chicotes de comunicação, os barramentos e os conectores responsáveis pela aquisição e transmissão das informações utilizadas pelo sistema de gerenciamento. A forma como esses componentes estão distribuídos ao longo do banco evidencia que a arquitetura eletrônica foi desenvolvida para operar com uma configuração específica de células e níveis de tensão previamente definidos pelo fabricante.

Por essa razão, uma das premissas adotadas neste trabalho foi preservar a configuração elétrica original do conjunto. A manutenção da mesma quantidade de células e da mesma tensão nominal reduz significativamente os riscos de incompatibilidade entre as novas células e os sistemas eletrônicos já existentes no veículo.

Conforme discutido na seção anterior, a configuração proposta mantém as 88 células conectadas em série, preservando a tensão nominal de aproximadamente 325,6 V. Dessa forma, os valores monitorados pelas BMUs permanecem dentro das faixas de operação originalmente previstas para o sistema, evitando a necessidade de alterações nos módulos eletrônicos de monitoramento e proteção.

Outro aspecto observado durante a desmontagem foi o bom estado geral dos componentes responsáveis pela aquisição e transmissão de dados. As BMUs, os conectores e os chicotes de comunicação não apresentaram danos que inviabilizassem sua reutilização. Essa condição favoreceu a adoção de uma estratégia

baseada na substituição exclusiva das células, preservando os demais componentes do sistema.

A utilização de células com capacidade superior às originais promove um aumento significativo da energia armazenada no banco de baterias. Entretanto, como a tensão nominal do conjunto permanece praticamente inalterada, os parâmetros monitorados pelo sistema eletrônico continuam compatíveis com aqueles considerados durante o desenvolvimento do veículo.

Situação semelhante ocorre com os processos de balanceamento executados pelo BMS. Como a arquitetura elétrica do banco foi preservada, espera-se que as estratégias de monitoramento e equalização das tensões continuem operando de forma compatível com a lógica originalmente empregada pelo fabricante.

Sob o ponto de vista da implementação, essa abordagem apresenta uma vantagem importante: o aumento da capacidade energética é obtido sem a necessidade de modificações significativas nos sistemas eletrônicos embarcados. Isso reduz a complexidade da integração, preserva funcionalidades já consolidadas no veículo e diminui os riscos associados à introdução de novos componentes de controle.

Assim, a compatibilidade da solução proposta não está relacionada apenas à manutenção da tensão nominal do banco de baterias. Ela resulta da preservação da arquitetura elétrica observada durante a desmontagem, do reaproveitamento dos sistemas de monitoramento existentes e da utilização de células capazes de atender aos requisitos operacionais originalmente estabelecidos para o Mitsubishi i-MiEV.

4.8 Estimativa de ganho de autonomia

A autonomia é um dos parâmetros mais relevantes na avaliação do desempenho de veículos elétricos, pois representa diretamente a capacidade do sistema de armazenamento de energia em sustentar o funcionamento do veículo entre os ciclos de recarga. Nesse contexto, após a definição da nova configuração do banco de baterias, torna-se possível avaliar os impactos esperados da substituição das células originais sobre o desempenho operacional do Mitsubishi i-MiEV.

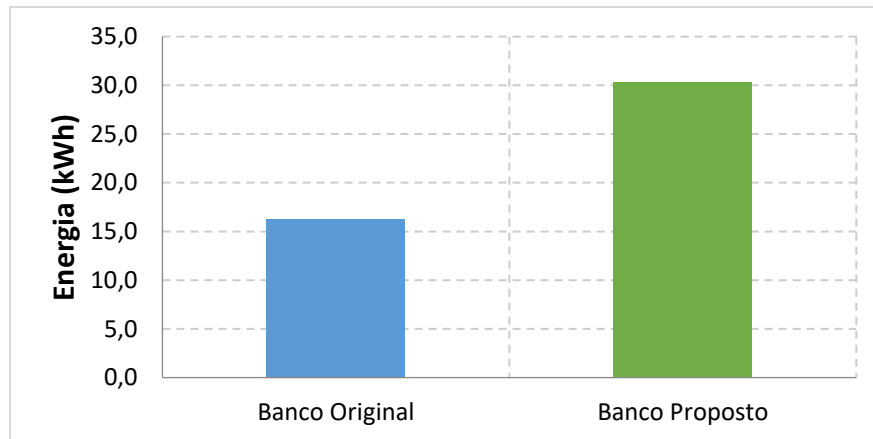
As análises realizadas ao longo deste trabalho demonstraram que a principal limitação observada no veículo estava associada à degradação do banco de baterias original. Embora os sistemas de monitoramento, proteção e gerenciamento permanecessem operacionais, a redução gradual da capacidade das células comprometeu significativamente a quantidade de energia disponível para o sistema de tração. Esse comportamento é compatível com os mecanismos de envelhecimento discutidos anteriormente, decorrentes tanto da ciclagem quanto do envelhecimento calendário das baterias de íons de lítio (O'KANE et al., 2022).

A solução proposta busca contornar essa limitação por meio da substituição das células originais por unidades de maior capacidade, preservando a arquitetura elétrica originalmente empregada pela Mitsubishi Motors. Conforme apresentado na Seção 4.4, a nova configuração mantém as 88 células conectadas em série e preserva a tensão nominal do sistema em aproximadamente 325,6 V, garantindo compatibilidade com os sistemas eletrônicos embarcados, com as unidades de monitoramento (BMU) e com o Sistema de Gerenciamento de Baterias (BMS) do veículo (PLETT, 2016).

A energia armazenada nas configurações original e proposta foi determinada utilizando a Equação (3), apresentada na Seção 3.1.3. Para o banco originalmente instalado no Mitsubishi i-MiEV, composto por células de 50 Ah, obteve-se uma capacidade energética aproximada de 16,3 kWh. Já para a configuração proposta, utilizando células de 93 Ah e mantendo a tensão nominal do conjunto, a capacidade energética estimada alcança aproximadamente 30,3 kWh.

A comparação entre os valores obtidos evidencia o impacto da substituição das células sobre a capacidade de armazenamento de energia do sistema. Conforme apresentado na Figura 22, a energia disponível para alimentação do sistema de tração praticamente dobra em relação à configuração original.

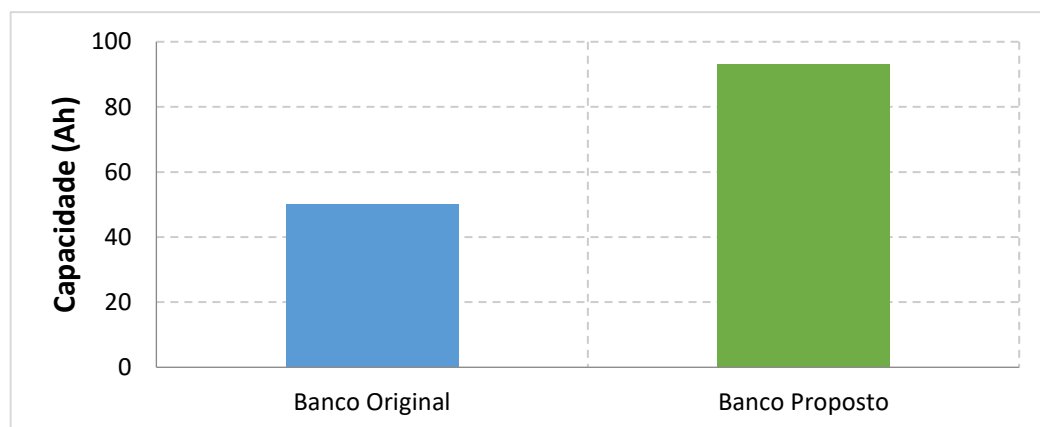
Figura 22 – Comparação da energia armazenada entre as configurações original e proposta



Fonte: Autoria própria (2026).

Aplicando-se a Equação (4), apresentada na Seção 4.4, verifica-se um ganho energético aproximado de 86% em relação ao banco originalmente instalado no veículo. Esse resultado está diretamente associado ao aumento da capacidade individual das células, conforme ilustrado na Figura 23.

Figura 23 – Comparação da capacidade nominal das células utilizadas nas configurações original e proposta



Fonte: Autoria própria (2026).

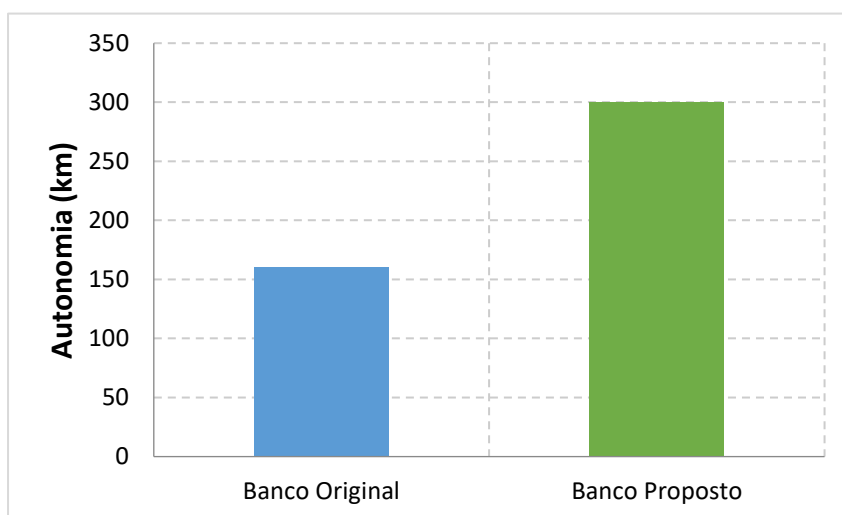
Do ponto de vista energético, esse aumento possui influência direta sobre a autonomia do veículo. Em sistemas de propulsão elétrica, a distância percorrida depende fundamentalmente da quantidade de energia disponível e do consumo

específico do conjunto motriz (REDDY; LINDEN, 2011). Assim, admitindo-se que fatores como eficiência do motor, estratégia de controle, resistência ao rolamento, características aerodinâmicas e perfil de utilização permaneçam semelhantes, espera-se que o aumento da energia armazenada resulte em um aumento proporcional da autonomia disponível.

Segundo as especificações divulgadas pela Mitsubishi Motors para o i-MiEV, o veículo apresenta autonomia máxima próxima de 160 km em condições ideais de utilização (MITSUBISHI MOTORS, 2010), no entanto, pelas descrições de uso o banco original proporcionava uma autonomia entre 100 e 120 km. Considerando essa referência e a razão entre a energia armazenada nas configurações original e proposta, foi realizada uma estimativa teórica do potencial ganho de autonomia proporcionado pela substituição das células.

Os resultados indicam que a autonomia potencial do veículo pode atingir valores próximos de 240 km, podendo alcançar um valor máximo de 300 km. A comparação entre a autonomia originalmente especificada e a autonomia estimada para a nova configuração é apresentada na Figura 24.

Figura 24 – Comparação entre a autonomia original e a autonomia estimada para a configuração proposta



Fonte: Autoria própria (2026).

O resultado obtido representa uma ampliação significativa da capacidade operacional do veículo. Em termos práticos, uma maior autonomia reduz a frequência necessária de recargas e amplia as possibilidades de utilização do veículo em deslocamentos urbanos e intermunicipais. Esse aspecto é particularmente relevante para veículos elétricos mais antigos, cuja degradação das baterias frequentemente limita sua aplicação prática, mesmo quando os demais sistemas permanecem plenamente funcionais.

Entretanto, é importante destacar que os valores apresentados correspondem a uma estimativa teórica baseada na energia armazenada no banco de baterias. Na prática, a autonomia efetivamente obtida pode sofrer influência de diversos fatores externos, incluindo temperatura ambiente, utilização de sistemas auxiliares, condições do pavimento, topografia da via, velocidade média de deslocamento e estilo de condução. Adicionalmente, perdas associadas aos processos de carga e descarga, bem como características específicas das novas células, podem resultar em diferenças entre os valores estimados e aqueles observados em condições reais de operação.

Mesmo considerando essas limitações, os resultados obtidos demonstram que a substituição das células originais por unidades de maior capacidade apresenta elevado potencial para prolongar a vida útil operacional do Mitsubishi i-MiEV. O aumento expressivo da energia armazenada, aliado à preservação da arquitetura elétrica e dos sistemas eletrônicos originais, reforça a viabilidade técnica da solução proposta e evidencia o potencial de recuperação funcional de veículos elétricos que apresentam degradação avançada de seus bancos de baterias.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A crescente expansão da mobilidade elétrica tem evidenciado a importância dos sistemas de armazenamento de energia para o desempenho, a autonomia e a viabilidade operacional dos veículos elétricos. Nesse cenário, as baterias assumem papel central não apenas durante a vida útil do veículo, mas também nos processos de manutenção, atualização tecnológica e recuperação de desempenho ao longo dos anos de utilização. Entretanto, apesar da ampla difusão dos veículos elétricos nos últimos anos, ainda existe uma quantidade limitada de informações técnicas relacionadas à desmontagem, análise e modernização dos sistemas de baterias presentes nos modelos pioneiros da eletrificação automotiva.

Inserido nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo estudar o sistema de armazenamento de energia de um Mitsubishi i-MiEV fabricado em 2010 e pertencente à frota da CELESC, realizando desde a análise de sua arquitetura elétrica até o desenvolvimento de uma proposta de substituição das células originais por uma nova configuração de maior capacidade energética.

Inicialmente, a revisão bibliográfica permitiu compreender a evolução histórica das tecnologias de armazenamento eletroquímico, desde as primeiras pilhas desenvolvidas por Alessandro Volta até as modernas baterias de íons de lítio empregadas atualmente em veículos elétricos. Também foram estudados os princípios de funcionamento dos bancos de baterias, os sistemas de gerenciamento e monitoramento baseados em BMS e BMU, bem como os principais mecanismos de degradação responsáveis pela perda gradual de capacidade observada nesses sistemas ao longo do tempo.

A etapa experimental constituiu uma das principais contribuições deste trabalho. Em razão da escassez de documentação técnica detalhada referente ao banco de baterias do Mitsubishi i-MiEV, tornou-se necessário desenvolver um procedimento próprio de desmontagem, contemplando todas as etapas de segurança, isolamento elétrico, remoção do conjunto do veículo, abertura da carcaça e desmontagem dos *packs* internos. O procedimento desenvolvido permitiu documentar detalhadamente a sequência construtiva adotada pelo fabricante, gerando um registro técnico que poderá servir de referência para futuras atividades de manutenção, recuperação e pesquisa envolvendo esse modelo de veículo.

A desmontagem do banco de baterias possibilitou a identificação e caracterização dos principais componentes do sistema, incluindo módulos de armazenamento de energia, barramentos de potência, fusíveis, sensores, dispositivos de proteção, chicotes de comunicação, unidades de monitoramento (BMU) e demais elementos associados ao gerenciamento do conjunto. A análise desses componentes permitiu compreender de forma aprofundada a arquitetura empregada pela Mitsubishi Motors e a forma como os subsistemas elétricos, eletrônicos e mecânicos se integram para garantir a operação segura do veículo.

A avaliação das células originais evidenciou os efeitos da degradação acumulada ao longo de mais de uma década de utilização. Os resultados observados confirmam que a redução da autonomia do veículo está diretamente associada à perda gradual da capacidade de armazenamento de energia decorrente dos processos de envelhecimento eletroquímico. Além da degradação provocada pelos ciclos de carga e descarga, verificou-se que o envelhecimento calendário e os longos períodos de armazenamento também constituíram fatores relevantes para a deterioração do desempenho do sistema, comportamento amplamente descrito na literatura especializada (O'KANE et al., 2022).

Com base nas informações obtidas durante a caracterização do banco original, foi realizado o dimensionamento de uma nova configuração utilizando células de mesma tensão nominal, porém com capacidade significativamente superior às originalmente empregadas. A estratégia adotada priorizou a preservação da arquitetura elétrica original do veículo, mantendo a mesma quantidade de células em série e consequentemente a mesma faixa de tensão operacional utilizada pelos sistemas eletrônicos embarcados.

Os resultados obtidos demonstraram que a solução proposta apresenta elevado potencial de aplicação. A capacidade energética do sistema passou de aproximadamente 16,3 kWh para 30,3 kWh, representando um aumento próximo de 86% na energia disponível para o sistema de tração. Esse comportamento está alinhado aos princípios de dimensionamento de bancos de baterias descritos por Reddy e Linden (2011), segundo os quais o aumento da capacidade, mantendo-se a tensão nominal do sistema, resulta em incremento proporcional da energia armazenada.

A análise de compatibilidade realizada ao longo do trabalho demonstrou que a manutenção das características elétricas fundamentais do sistema constitui um fator decisivo para viabilizar a integração das novas células ao conjunto original. A preservação da tensão nominal do banco, associada à manutenção da estrutura de monitoramento baseada em BMS e BMUs, reduz significativamente a necessidade de modificações nos sistemas eletrônicos do veículo e aumenta a viabilidade técnica da solução proposta (PLETT, 2016).

A partir dos cálculos realizados, foi possível estimar um ganho expressivo de autonomia quando comparado à configuração originalmente instalada no veículo. Embora os valores obtidos representem uma condição teórica e dependam de fatores como temperatura ambiente, perfil de condução, topografia e condições operacionais, os resultados indicam que a substituição das células possui potencial para restaurar e até ampliar significativamente a capacidade operacional do Mitsubishi i-MiEV.

Além dos resultados obtidos para o veículo estudado, este trabalho demonstra que a modernização de bancos de baterias pode representar uma alternativa tecnicamente viável para prolongar a vida útil de veículos elétricos de primeira geração. Em muitos casos, a substituição das células por tecnologias mais recentes permite recuperar o desempenho original e ampliar a autonomia do veículo, evitando sua substituição prematura e contribuindo para estratégias de sustentabilidade e economia circular associadas à mobilidade elétrica (GAO et al., 2024).

Sob a perspectiva acadêmica e tecnológica, o trabalho contribui para ampliar o conhecimento disponível sobre sistemas de armazenamento de energia aplicados à mobilidade elétrica. A documentação do processo de desmontagem, a caracterização da arquitetura interna do banco de baterias e a análise da compatibilidade entre novos elementos de armazenamento e sistemas eletrônicos originais constituem informações que podem servir de base para futuras pesquisas relacionadas à manutenção, modernização, *retrofit* e recuperação de veículos elétricos.

Mais do que simplesmente substituir células que já não atendiam às necessidades operacionais do veículo, este trabalho demonstrou que é possível prolongar a utilização de veículos elétricos por meio da atualização de seus sistemas

de armazenamento de energia. A rápida evolução das tecnologias de baterias nos últimos anos permite que veículos desenvolvidos há mais de uma década possam receber componentes mais modernos, aumentando significativamente sua capacidade de armazenamento sem a necessidade de alterações profundas em sua estrutura original. Dessa forma, além de recuperar a funcionalidade do veículo, a substituição do banco de baterias representa uma alternativa economicamente interessante e ambientalmente sustentável, reduzindo a necessidade de descarte prematuro de equipamentos e ampliando o aproveitamento dos recursos já existentes.

Por fim, os estudos realizados indicam que a substituição das células do banco de baterias do Mitsubishi i-MiEV ano 2010 é tecnicamente viável dentro das condições analisadas. A manutenção das características dimensionais e da tensão nominal das células permitiu preservar a compatibilidade com a arquitetura elétrica e com os sistemas de monitoramento originalmente empregados no veículo, ao mesmo tempo em que proporcionou um aumento expressivo da capacidade de armazenamento de energia. Como consequência, espera-se uma melhoria significativa da autonomia e da disponibilidade operacional do veículo. Os resultados obtidos reforçam que a modernização de veículos elétricos mais antigos pode ser uma alternativa eficiente para prolongar sua vida útil, aproveitando os avanços tecnológicos das baterias atuais sem a necessidade de substituição completa do veículo.

Infelizmente, no término deste trabalho, as novas células compradas ainda não haviam sido entregues. Assim, como continuidade deste trabalho, recomenda-se a implementação física da configuração proposta e a realização de ensaios experimentais em campo, incluindo testes de autonomia, monitoramento térmico, avaliação do comportamento do BMS, análise de desempenho energético e validação da integração entre as novas células e os sistemas eletrônicos originais do veículo. Essas atividades permitirão confirmar experimentalmente os resultados teóricos obtidos e ampliar o conhecimento técnico relacionado à recuperação e modernização de sistemas de armazenamento de energia aplicados à mobilidade elétrica.

REFERÊNCIAS

BARBIR, Frano. **PEM fuel cells: theory and practice**. 2. ed. Burlington: Academic Press, 2013. Acesso em: 10 abr. 2026.

BARROS, R. **Carros eletrificados registram 85% de aumento nas vendas de 2024**. Disponível em: <https://investnews.com.br/infograficos/venda-de-carros-eletricos-acelera-no-mundo-mas-nao-no-brasil/#:~:text=Em%202021%2C%20as%20vendas%20de>. Acesso em: 10 abr. 2026.

BOCCHI, N.; FERRACIN, C. L.; BIAGGIO, R. S. **Pilhas e Baterias: Funcionamento e Impacto Ambiental**. 2000. Química e Sociedade. p. 4-7. Disponível em: <http://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc11/v11a01.pdf>. Acesso em: 01 dez. 2022.

Bresolin, A. A. (2023). **Eletromobilidade**: volume 7 (88-103). Florianópolis: ENBPar / IFSC.

CETESB. **Emissão Veicular – 2024**. São Paulo: Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, 2024. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/veicular/>. Acesso em: 1 jun. 2025.

COSTA, M. C. DA S.; PORTO, P. A. A pilha de Daniell: um estudo de caso histórico. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 38, n. 3, p. 1650–1659, 2021. Disponível em: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/82360>. Acesso em: 18 nov. 2022.

COWONTECH. **LiFePO₄ battery cell specification**. Seoul: CowonTech, 2021. Disponível em: <https://www.cowontech.com>. Acesso em: 02 sbr. 2026.

EDGE, J. S. et al. **Lithium-ion battery degradation: what you need to know**. Physical Chemistry Chemical Physics, Cambridge, v. 23, p. 8200-8221, 2021. Disponível em: <https://pubs.rsc.org>. Acesso em: 10 mar. 2026.

GAO, Wei *et al.* Evaluation of the second-life potential of the first-generation Nissan Leaf battery packs in energy storage systems. **eTransportation**, v. 20, 1 maio 2024a.

GÜNTER, M.; RAUH, N.; KREMS, J. F. 2017. **Conducting a study to investigate eco-driving strategies with battery electric vehicles: A multiple method approach**. 2017. Transportation Research Procedia. 25. p. 2247-2261. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235214651730738X>. Acesso em: 17 out. 2022.

HU, X. et al. **Advanced battery management systems for electric vehicles**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Oxford, v. 15, n. 9, p. 4597-4607, 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com>. Acesso em: 24 jun. 2026.

IBGE. **Frota de Veículos**. 2024. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo, 2021. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pesquisa/22/28120>. Acesso em: 10 abr. 2026.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Global EV Outlook 2025**: trends in electric vehicle markets and charging infrastructure. Paris: International Energy Agency, 2025. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2025>. Acesso em: 24 jun. 2026.

KURZWEIL, P. **Gaston Planté and his invention of the lead–acid battery—The genesis of the first practical rechargeable battery**. 2010. Journal of Power Sources, v. 195, n. 14, p. 4427–4429, 15 jul. 2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775310000546>. Acesso em: 15 nov. 2022.

LARMINIE, James; DICKS, Andrew. **Fuel cell systems explained**. 2. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2003.

MITSUBISHI MOTORS. **i-MiEV: affectionately known as the “little big car” in Japan**. Mitsubishi Motors Canada, 2024. Disponível em: <https://www.mitsubishi-motors.ca/en/what-drives-us/i-miev-history>. Acesso em: 17 jun. 2026.

MITSUBISHI MOTORS CORPORATION. **Owner's Manual Mitsubishi i-MiEV**. Japão, 2010.

MOVASSAGH, K. et al. **A critical look at the battery management systems in electric vehicles**. Energies, Basel, v. 14, n. 13, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com>. Acesso em: 24 abr. 2026.

MORUS, I. R. **Correlation and control: William Robert Grove and the construction of a new philosophy of scientific reform**. 1991. Studies in History and Philosophy of Science Part A, v. 22, n. 4, p. 589. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/003936819190035Q>. Acesso em: 01 dez. 2022.

O'KANE, S. E. J. et al. **Lithium-ion battery degradation**: how to model it. Journal of The Electrochemical Society, Bristol, v. 169, n. 4, 2022. Disponível em: <https://iopscience.iop.org>. Acesso em: 01 mai. 2026.

PACHECO, Ricardo. **História da pilha de Volta**. São Paulo: Editora Ciência Hoje, 2013.

PADHI, A. K.; NANJUNDASWAMY, K. S.; GOODENOUGH, John B. **Phospho-olivines as positive-electrode materials for rechargeable lithium batteries**. Journal of The Electrochemical Society, New Jersey, v. 144, n. 4, p. 1188-1194, 1997.

PLETT, Gregory L. **Battery management systems**. Norwood: Artech House, 2015.

PLETT, Gregory L. **Battery management systems**: equivalent-circuit methods. Norwood: Artech House, 2016.

REDDY, Thomas B.; LINDEN, David. **Linden's handbook of batteries**. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 2011.

SANTOS, Max M. D. **Veículos elétricos e híbridos**: fundamentos, características e aplicações. São Paulo: Érica, 2020.

THE NOBEL PRIZE. **The Nobel Prize in Chemistry 2019**. Stockholm: Nobel Prize Outreach AB, 2019. Disponível em: <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/2019/summary/>. Acesso em: 12 mai. 2026.

TRASATTI, S. 1799–1999: Alessandro Volta's "Electric Pile". **Journal of Electroanalytical Chemistry**, v. 460, n. 1-2, p. 1–4, jan. 1999. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022072898003027>. Acesso em: 15 nov. 2022.

VARGAS, R.; CHIBA, R.; Franco., G. E.; SEO., M. S. E. **Uma Visão da Tecnologia de Células a Combustível**. 2013. Artigo. p. 1-3. Disponível em: <http://repositorio.ipen.br/bitstream/handle/123456789/13238/15436.pdf?sequence=1>. Acesso em: 22 nov. 2022.

WHITTINGHAM, M. S. **Electrical energy storage and intercalation chemistry**. Science, Washington, v. 192, n. 4244, p. 1126-1127, 1976. Disponível em: <https://www.science.org>. Acesso em: 04 abr. 2026.