

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIA EXATAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**Painéis de Monitoramento da Vida Útil de
Baterias em Sistemas Ferroviários: Uma
Análise com Visualização IoT**

Pâmela Jaqueline Ribeiro dos Santos

Trabalho de Conclusão de Curso

Pâmela Jaqueline Ribeiro dos Santos

Painéis de Monitoramento da Vida Útil de Baterias em Sistemas Ferroviários: Uma Análise com Visualização IoT

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como parte dos requisitos para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Elétrica
pela Universidade Federal de São Carlos.

Orientador: Prof. Dr. Diego de Oliveira
Martins

Coorientador: Prof. Dr. Osmar Ogashawara

São Carlos
26 de julho de 2025

Santos, Pâmela Jaqueline Ribeiro dos

Painéis de Monitoramento da Vida Útil de Baterias em Sistemas Ferroviários: Uma Análise com Visualização IoT / Pâmela Jaqueline Ribeiro dos Santos -- 2025. 63f.

TCC (Graduação) - Universidade Federal de São Carlos, campus São Carlos, São Carlos

Orientador (a): Diego de Oliveira Martins

Banca Examinadora: Osmar Ogashawara, Marcelo Castro de Takeda

Bibliografia

1. Monitoramento de baterias. 2. Operação ferroviária. 3. IoT. I. Santos, Pâmela Jaqueline Ribeiro dos. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática (SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Arildo Martins - CRB/8 7180

PÂMELA JAQUELINE RIBEIRO DOS SANTOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como parte dos requisitos para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Elétrica
pela Universidade Federal de São Carlos.

Trabalho aprovado. São Carlos, 21 de julho de 2025

Prof. Dr. Diego de Oliveira Martins
Orientador
Universidade Federal de São Carlos DECiv/CCET/UFSCar

Prof. Dr. Osmar Ogashawara
Coorientador
Universidade Federal de São Carlos DEE/CCET/UFSCar

Prof. Dr. Marcelo de Castro Takeda
Universidade Federal de São Carlos DECiv/CCET/UFSCar

Dedico este trabalho à minha mãe, Cláudia, que desde sempre me incentivou a perseguir meus sonhos. Se hoje estou concluindo um curso de Engenharia, é porque ela acreditou em mim, me proporcionou acesso a uma educação de qualidade e esteve ao meu lado, apoiando cada passo na construção da minha carreira.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, por me conceder força, saúde e sabedoria para chegar até aqui.

À minha mãe, Cláudia, meu eterno exemplo de coragem e amor, que sempre me incentivou a perseguir meus sonhos. Sou imensamente grata por toda a sua dedicação para que eu tivesse acesso a uma educação de qualidade. Agradeço ainda mais pelo direcionamento e apoio constante ao longo desses anos de graduação, pois sem você, eu não teria chegado até aqui.

Ao meu namorado Vinícius, pela paciência, compreensão e por caminhar ao meu lado com tanto carinho durante todos os desafios desta jornada.

Às minhas amigas e colegas de trabalho, que, com suas palavras de incentivo e amizade, tornaram o caminho mais leve e prazeroso.

Ao professor Diego e ao coorientador Osmar, pela orientação, dedicação e pelos valiosos ensinamentos que contribuíram de forma fundamental para a realização deste trabalho.

A todos vocês, minha mais profunda gratidão.

“Conhecimento não é aquilo que você sabe, mas o que você faz com aquilo que você sabe.”
(Aldous Huxley)

Resumo

Os sistemas ferroviários dependem do funcionamento contínuo de dispositivos críticos como detectores de trilho quebrado (DTQ) e de descarrilamento (DDC), que por sua vez utilizam baterias *Freedom* para garantir sua operação. Entretanto, essas baterias estão sujeitas a degradação ao longo do tempo, o que pode comprometer a segurança e elevar custos com manutenções corretivas, além de impactar o meio ambiente devido à substituição prematura de acumuladores. Portanto, este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) desenvolveu e analisou um painel de monitoramento voltado para a gestão da vida útil dessas baterias, visando aumentar a confiabilidade do modal ferroviário brasileiro. A metodologia empregou a coleta de dados reais em campo integrados a um sistema de visualização em Internet das Coisas (IoT - *Internet of Things*) por meio do Grafana, possibilitando o acompanhamento em tempo real de parâmetros como tensão, corrente e temperatura. Como resultado, foi possível identificar tendências de criticidade, destacando-se o caso da placa DDS 1.45AA.24E3.8B29, que apresentou tensão crítica de 5,383 V, além de evidenciar maior risco em períodos de baixa irradiação solar. Essa abordagem permitiu subsidiar estratégias de manutenção preditiva, prolongando a vida útil das baterias e assegurando o funcionamento adequado dos sistemas de detecção, o que também impacta positivamente na economia, conforto e segurança das operações ferroviárias.

Palavras-chave: Monitoramento de baterias, gestão da vida útil, operação ferroviária, IoT

Abstract

Railway systems rely on the continuous operation of critical devices such as broken rail detectors (DTQ) and derailment detectors (DDC), which, in turn, use Freedom batteries to ensure their functionality. However, these batteries are subject to degradation over time, which can compromise safety, increase corrective maintenance costs, and negatively impact the environment due to the premature replacement of accumulators. Therefore, this Final Undergraduate Project (TCC) developed and analyzed a monitoring panel aimed at managing the service life of these batteries, with the goal of enhancing the reliability of the Brazilian railway system. The methodology involved collecting real-world field data integrated into an Internet of Things (IoT) visualization system using Grafana, enabling real-time monitoring of parameters such as voltage, current, and temperature. As a result, it was possible to identify critical trends, with special attention to the DDS board 1.45AA.24E3.8B29, which exhibited a critical voltage of 5.383 V, and to highlight increased risk during periods of low solar irradiation. This approach supported predictive maintenance strategies, extending battery lifespan and ensuring the proper functioning of detection systems, thereby positively impacting the economy, comfort, and safety of railway operations.

Keywords: Battery monitoring, service life management, railway operation, IoT

Lista de ilustrações

Figura 1 – Matriz do Transporte de Cargas	15
Figura 2 – Distribuição dos investimentos por modal de transporte até maio de 2025	17
Figura 3 – Bateria chumbo-ácido Freedom	21
Figura 4 – Estado de saúde (SoH) em função da retenção de capacidade de uma bateria	26
Figura 5 – Tempo de vida de uma bateria em relação à profundidade de descarga	28
Figura 6 – Expectativa de vida em função da Temperatura	29
Figura 7 – Detector de Descarrilamento e Detector de Quebra de Trilho	34
Figura 8 – Sistema DTQ	36
Figura 9 – Evolução temporal dos parâmetros elétricos da bateria	42
Figura 10 – Delta de tensão em baterias críticas.	43
Figura 11 – Dashboard de Parâmetros Elétricos e Temperatura Ambiente	44

Lista de tabelas

Tabela 1 – Acidentes no Transporte Ferroviário de Cargas (2020 a 2023)	16
Tabela 2 – Baterias com tendência de criticidade - Análise Diurna	40
Tabela 3 – Baterias com tendência de criticidade (17h00 e 20h00)	41
Tabela 4 – Tensão de carga e flutuação	45

Lista de abreviaturas e siglas

ANTT	Agência Nacional de Transporte Terrestre
AR	Realidade Aumentada (Augmented Reality)
BESS	Sistemas de Armazenamento de Energia em Baterias (Battery Energy Storage System)
BIM	Modelagem da Informação da Construção (Building Information Modeling)
BMS	Sistema de Gerenciamento de Bateria (Battery Management System)
CNT	Confederação Nacional do Transporte
DDC	Detector de Descarrilamento
DDS	Placas/Controladora DDS
DDV	Detector de Descarrilamento de Vagão
DoD	Profundidade de Descarga (Depth of Discharge)
DTQ	Detector de Trilho Quebrado
ESS	Sistema de Armazenamento de Energia (Energy Storage Systems)
GSM	Sistema Global para Comunicações Móveis (Global System for Mobile Communications)
IoT	Internet das Coisas (Internet of Things)
KPI	Indicador-Chave de Desempenho (Key Performance Indicator)
LIB	Baterias de Íon Lítio (Lithium-Ion Battery)
OCV	Tensão em Circuito Aberto (Open-Circuit Voltage)
RUL	Vida Útil Restante (Remaining Useful Life)
SIn	Secretaria Geral de Informática
SOA	Área Segura de Operação (Safe Operating Area)
SoC	Estado de Carga (State of Charge)
SoH	Estado de Saúde (State-of-Health)
SVM	Máquina de Vetores de Suporte (Support Vectors Machine)
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
UFSCar	Universidade Federal de São Carlos

VRFB

Baterias de Fluxo Redox de Vanádio (Vanadium Redox Flow Battery)

Lista de símbolos

Q_n	Capacidade nominal
i	Corrente
τ	Tempo
SoC	Estado de carga
SoC_0	Estado de carga inicial
Q_i	carga coulométrica
C_{rtd}	Capacidade nominal
C_{rmng}	Capacidade restante
C_0	Capacidade inicial
S_0C_{mx}	Estado máximo de carga
Y_t	Vida útil estimada
L_s	Vida útil do flutuador
X_t	Fator de correção
T_{av}	Temperatura média de operação
T_s	Temperatura definida
mA	mili Amper
V	Volts
A	Amper
N	Ciclos equivalentes
DoD	Profundidade de descarga
$^{\circ}C$	Graus Celsius
$\%$	Porcentagem
m	Metros

Sumário

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Contextualização	14
1.2	Motivação e justificativa	17
1.3	Problema de Pesquisa	18
1.4	Objetivos	19
1.4.1	Objetivos específicos	19
1.5	Estrutura do TCC	19
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1	Baterias em Sistemas Ferroviários	20
2.1.1	Tipos de Baterias	20
2.1.1.1	Baterias de Chumbo	21
2.1.1.2	Baterias de Lítio	22
2.2	Sistemas de Armazenamento de Energia	23
2.3	Monitoramento da Vida Útil de Baterias	24
2.3.1	Principais conceitos e métricas de monitoramento	24
2.3.1.1	Estado de Carga	24
2.3.1.2	Estado de Saúde	25
2.3.2	Fatores que influenciam a expectativa de vida	27
2.3.2.1	Profundidade de Descarga	27
2.3.2.2	Temperatura	28
2.3.2.3	Tensão	29
2.3.2.4	Corrente	29
2.3.3	O papel dos modelos BMS e de degradação	30
2.4	Visualização de Dados em Plataformas IoT	31
2.4.1	Grafana	32
2.4.1.1	Recursos Relevantes para Visualização	32
3	MATERIAIS E MÉTODOS	34
3.1	Sistema de Detecção	35
4	RESULTADOS OBTIDOS	39
4.1	Análise Diurna de Criticidade – Monitoramento ao Longo do Dia	39
4.2	Avaliação de Criticidade por Faixa Horária	40

4.3	Análise Temporal de Tensão, Corrente e Geração Solar	42
4.4	Testes Direcionados em Baterias Críticas – Análise de Delta de Tensão	43
4.5	Relação Entre Parâmetros Elétricos e Temperatura Ambiental	44
5	EXPANSÃO DO SISTEMA	46
5.0.1	Inclusão de Novos Sensores	46
5.0.2	Adoção de Inteligência Artificial	46
6	CONCLUSÃO	48
6.1	Trabalhos futuros	49
	Referências	50

1 INTRODUÇÃO

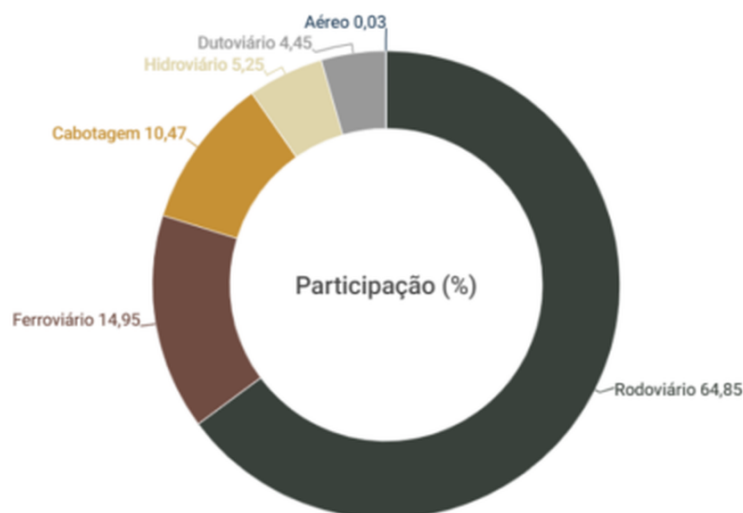
O crescimento da demanda por eficiência logística e energética nos setores de transporte e infraestrutura tem impulsionado a busca por soluções tecnológicas que garantam maior desempenho, sustentabilidade e confiabilidade. No Brasil, o setor ferroviário se destaca como um dos modais com maior potencial de crescimento e transformação, especialmente frente aos desafios impostos pela matriz de transporte atual e pelas exigências de modernização. Neste cenário, tecnologias associadas ao monitoramento e à gestão de sistemas de armazenamento de energia, como os Sistemas de Armazenamento de Energia em Baterias (BESS - *Battery Energy Storage System*), surgem como ferramentas promissoras para garantir a segurança e a longevidade de ativos críticos, como as baterias. A seguir, apresenta-se a contextualização do tema, destacando a importância do transporte ferroviário e os obstáculos enfrentados para sua consolidação no país.

1.1 Contextualização

O transporte é um setor de fundamental importância para a atividade econômica e o desenvolvimento de qualquer país. Ele estabelece a interação nacional e regional entre diferentes setores e determina a eficiência do fluxo de mercadorias, cada vez mais dinâmico na era da globalização (Rosa, Vieira, 2019; Angelo, 1985). Nesse contexto, o modal ferroviário desempenha um papel muito significativo globalmente (Pereira, Junior, 2023; Rosa, Vieira, 2019), oferecendo vantagens como menor custo e ganhos de escala em relação a outros modais, adequação a grandes volumes de carga e longas distâncias, alta eficiência energética, baixos custos de transporte e manutenção e maior segurança. Também reduz a possibilidade de congestionamentos e é ecologicamente correto (Rosa, Vieira, 2019).

Apesar de seu potencial, o modal ferroviário ainda é consideravelmente subutilizado no Brasil em comparação com países como Rússia e Austrália (Pereira, Junior, 2023). A matriz de transporte brasileira é caracterizada pela predominância do modal rodoviário, influenciada pelo histórico de subinvestimento em outros modais e infraestrutura inadequada. A Figura 1 ilustra a distribuição percentual dos modais de transporte no Brasil, evidenciando o desequilíbrio existente. O modal rodoviário responde por 64,85% da matriz, seguido pelo ferroviário com 14,95%, enquanto os demais modais — cabotagem, hidroviário, dutoviário e aéreo — têm participação consideravelmente inferior.

Figura 1 – Matriz do Transporte de Cargas



Fonte: Adaptado de CNT (2025)

Esse predomínio rodoviário tem contribuído para diversos gargalos logísticos, como custos elevados com frete, maior consumo de combustíveis fósseis, congestionamentos, aumento de acidentes e maior desgaste da malha viária (Costa, 2017). Os principais desafios para o setor ferroviário brasileiro incluem deficiências na infraestrutura de transporte, dificuldades nas operações logísticas e instalações inadequadas de movimentação de carga em armazéns e portos (Alves, Ramos, Silva, 2020; Costa, 2017). O arcabouço regulatório desatualizado e o policiamento insuficiente também representam problemas (Fici, 2017).

Adicionalmente, usuários do setor frequentemente citam a falta de infraestrutura adequada e acesso direto à rede ferroviária como as principais barreiras ao aumento da utilização (Costa, 2017). A segurança operacional, por exemplo, ainda é comprometida por falhas em materiais rodantes e pela ausência de sistemas inteligentes de diagnóstico e monitoramento, conforme apresentado pela Tabela 1. Nesse sentido, a implementação de tecnologias voltadas para a detecção automática de falhas e o monitoramento contínuo de desempenho é vista como uma solução promissora para aumentar a eficiência e a confiabilidade das ferrovias (Pereira, Junior, 2023). Enfrentar esses desafios exige planejamento integrado e investimentos significativos.

Tabela 1 – Acidentes no Transporte Ferroviário de Cargas (2020 a 2023)

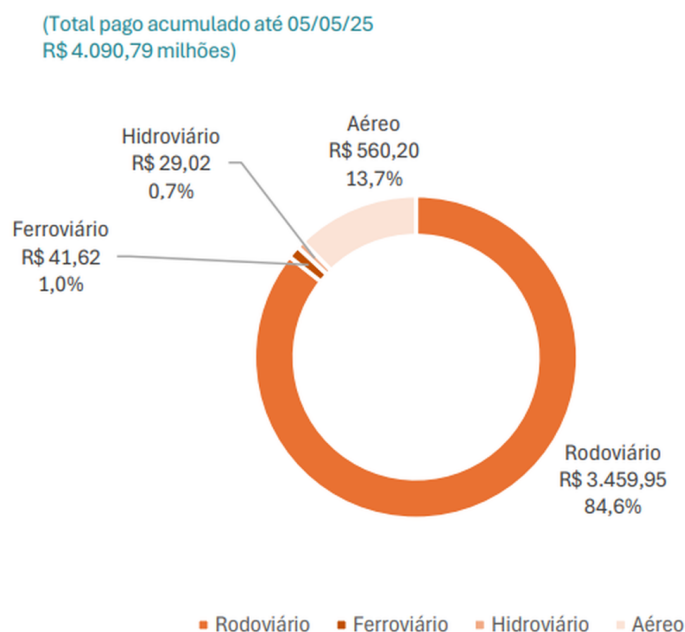
Acidentes Graves no Transporte Ferroviário				
Causa	Ano			
	2020	2021	2022	2023
Falha Humana	0	0	1	0
Material Rodante	0	0	1	0
Sinalização Tele. Eletro	0	0	0	0
Via Permanente	10	15	14	2
Atos Vandalismo	0	0	0	0
Outras Causas	0	0	0	0

Fonte: Adaptado de ANTT (2024)

Entretanto, para que tecnologias de monitoramento e diagnóstico possam ser efetivamente implementadas, é imprescindível que haja um redirecionamento estratégico dos investimentos no setor de transporte. A realidade orçamentária brasileira ainda revela um foco excessivo no modal rodoviário, em detrimento de alternativas mais eficientes e sustentáveis, como a ferrovia. Essa assimetria na alocação de recursos compromete a modernização da malha ferroviária e limita a adoção de soluções tecnológicas inovadoras que poderiam transformar significativamente sua operação.

A Figura 2 ilustra essa disparidade, demonstrando que, até maio de 2025, o modal rodoviário concentrou 84,6% dos investimentos públicos em transporte, enquanto o ferroviário recebeu apenas 1% do total. Tal desequilíbrio evidencia a urgência de políticas públicas e estratégias de financiamento mais equilibradas, que possibilitem não apenas a expansão da infraestrutura ferroviária, mas também a inserção de tecnologias como BESS e plataformas inteligentes de monitoramento, fundamentais para a eficiência e a confiabilidade do setor.

Figura 2 – Distribuição dos investimentos por modal de transporte até maio de 2025



Fonte: Adaptado de CNT (2025)

Melhorar a eficiência e a confiabilidade da infraestrutura de transporte frequentemente envolve a integração de tecnologias avançadas, incluindo soluções energéticas. Os BESS estão ganhando relevância, particularmente em aplicações estacionárias e geração distribuída conectada à rede. Em sua arquitetura, as baterias são frequentemente os componentes mais vulneráveis, sendo essencial monitorar sua vida útil para garantir o funcionamento contínuo e seguro dos sistemas (Fernandes, 2021).

1.2 Motivação e justificativa

Compreender e enfrentar os desafios do setor ferroviário brasileiro é essencial não apenas para impulsionar a competitividade e o desenvolvimento econômico nacional, mas também para elevar os padrões de segurança, conforto, sustentabilidade e eficiência econômica do transporte. O fortalecimento do modal ferroviário pode trazer impactos positivos expressivos, como a redução dos custos logísticos e operacionais, a mitigação das emissões de poluentes e a diminuição dos custos sociais e econômicos decorrentes de acidentes, ao mesmo tempo em que promove maior segurança no transporte de cargas e passageiros.

Adicionalmente, o transporte ferroviário contribui para o alívio das rodovias, o que melhora o fluxo urbano e o conforto geral dos usuários de outros modais, além de impulsionar o desenvolvimento regional, a geração de empregos e o aumento da arrecadação

tributária. Contudo, a carência de literatura nacional abrangente e de estudos comparativos sobre a eficiência do sistema ferroviário brasileiro evidencia a necessidade de pesquisas aprofundadas nesse campo (Rosa; Vieira, 2019; Alves; Ramos; Silva, 2020).

No contexto das soluções energéticas avançadas, como os sistemas BESS, otimizar o desempenho, a confiabilidade e a vida útil das baterias torna-se indispensável para garantir não só benefícios econômicos, mas também maior segurança e sustentabilidade operacional. A longevidade das baterias é diretamente influenciada pelo Estado de Saúde (SoH - *State of Health*) e pelo Estado de Carga (SoC - *State of Charge*), parâmetros que, embora críticos, não são diretamente mensuráveis, tornando o seu monitoramento um desafio relevante (Fernandes, 2021). A literatura existente aborda diversas estratégias de carregamento e descarregamento, mas ainda carece de análises comparativas robustas que esclareçam o impacto real dessas abordagens sobre a vida útil e a segurança dos sistemas. A evolução desse conhecimento é crucial para reduzir riscos operacionais, evitar falhas inesperadas e garantir maior previsibilidade nos custos, promovendo ao mesmo tempo a sustentabilidade ao prolongar o ciclo de vida dos equipamentos.

Este trabalho justifica-se, portanto, pela necessidade de avançar no entendimento e na aplicação prática das estratégias de monitoramento e controle de sistemas de baterias em ambientes ferroviários. Ao analisar dados e experiências provenientes do desenvolvimento de painéis de monitoramento voltados para a gestão da vida útil desses sistemas, busca-se fornecer *insights* relevantes que possam não apenas validar conceitos teóricos, mas também oferecer subsídios concretos para o aumento da segurança, do conforto operacional, da sustentabilidade ambiental e da eficiência econômica nos projetos ferroviários e em outras infraestruturas que dependem de soluções energéticas confiáveis.

1.3 Problema de Pesquisa

Dada a importância crítica de otimizar a vida útil e a eficiência das baterias em BESS, particularmente no contexto de demandas complexas de infraestrutura, como aquelas relevantes para o setor de transporte brasileiro, e reconhecendo a lacuna existente na análise comparativa de estratégias de controle de baterias, o problema central abordado por este estudo é: *Como painéis de monitoramento baseados em IoT podem contribuir para a análise e a extensão da vida útil das baterias utilizadas em sistemas auxiliares ferroviários?*

1.4 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é analisar os dados e *insights* operacionais derivados do projeto de painéis de monitoramento de baterias para avaliar e propor melhorias para estratégias de gerenciamento de baterias, com o objetivo de aumentar a vida útil e o desempenho geral dos sistemas de armazenamento de energia de baterias.

1.4.1 Objetivos específicos

Para atingir o objetivo geral deste trabalho, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

1. **Levantar** os principais parâmetros que influenciam na vida útil e na criticidade das baterias utilizadas em sistemas ferroviários;
2. **Coletar e organizar** os dados de desempenho das baterias em um formato compatível com ferramentas de visualização;
3. **Propor** recomendações ou ajustes nas estratégias de controle de baterias com base na análise de dados de monitoramento e princípios teóricos, visando otimizar a vida útil das baterias e a eficiência do sistema.

1.5 Estrutura do TCC

A estrutura deste Trabalho de Conclusão de Curso é composta por seis capítulos.

O primeiro capítulo, Introdução, apresenta o contexto do tema, os problemas associados à substituição prematura de baterias no setor ferroviário e os objetivos do trabalho.

No segundo capítulo, Fundamentação Teórica, são abordados os conceitos e as tecnologias essenciais para o desenvolvimento do projeto, incluindo as características das baterias, o uso da plataforma Grafana e os fundamentos de monitoramento remoto.

O terceiro capítulo, Materiais e Métodos, descreve os recursos e a metodologia utilizada na análise.

O quarto capítulo, Resultados Obtidos, apresenta os dados coletados, as visualizações geradas no Grafana e as análises realizadas, destacando os ganhos operacionais.

O quinto capítulo, Expansão do Sistema, sugere melhorias e possibilidades de escalabilidade do sistema, como a inclusão de novos sensores e a utilização de inteligência artificial.

Por fim, o sexto capítulo, Conclusão, resume os principais resultados e benefícios do trabalho, além de apresentar sugestões para futuras pesquisas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção, apresentam-se os principais conceitos e tecnologias que embasam o desenvolvimento do sistema de monitoramento proposto. A compreensão dos fundamentos associados às baterias utilizadas em aplicações ferroviárias, bem como dos fatores que influenciam sua degradação, é essencial para a formulação de estratégias eficazes de gerenciamento da vida útil. Além disso, são explorados aspectos relacionados aos sistemas de armazenamento de energia, plataformas de visualização de dados e às ferramentas utilizadas para análise em tempo real, com foco na integração IoT e na tomada de decisão baseada em dados.

2.1 Baterias em Sistemas Ferroviários

As baterias desempenham um papel fundamental nos sistemas ferroviários, garantindo a alimentação confiável de diversos dispositivos e serviços essenciais. Nos trens e locomotivas, são utilizadas para fornecer energia aos sistemas de iluminação interna e externa, além de alimentar equipamentos auxiliares como sistemas de comunicação e climatização. Em locomotivas diesel-elétricas, as baterias também são indispensáveis para o acionamento do motor de partida e para fornecer energia em situações de emergência.

Além das aplicações embarcadas, as baterias são utilizadas em sistemas *wayside* e de detecção, especialmente em pontos críticos de sinalização, atuando como fonte de energia de reserva durante falhas na alimentação principal (Franco *et al*, 2017). Outro uso relevante das baterias ferroviárias está em veículos híbridos e elétricos, onde elas armazenam energia gerada durante frenagens regenerativas e a disponibilizam durante as acelerações.

Essas aplicações requerem baterias robustas, com alta confiabilidade e longa vida útil, como as de chumbo-ácido seladas, níquel-cádmio ou íons de lítio. O uso de baterias de qualidade é essencial para garantir a continuidade dos serviços ferroviários e a segurança operacional em toda a malha ferroviária.

2.1.1 Tipos de Baterias

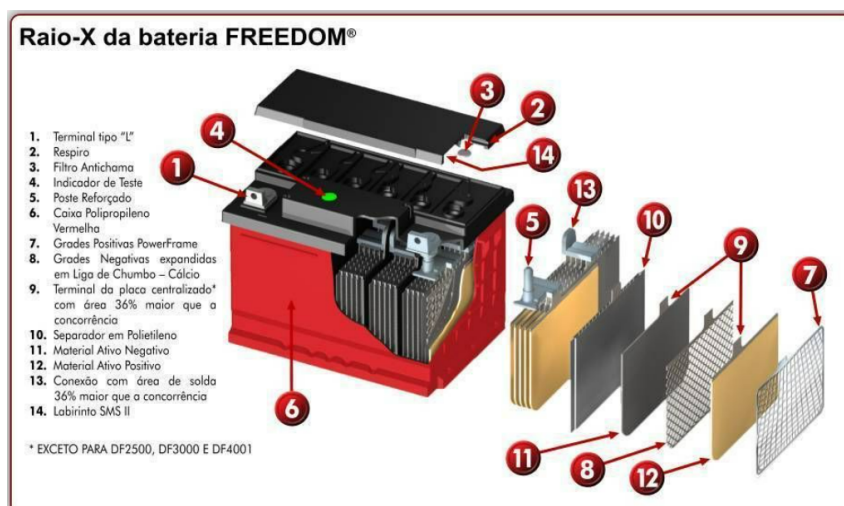
A crescente demanda por sistemas de armazenamento de energia tem impulsionado o desenvolvimento e o aperfeiçoamento de diversas tecnologias de baterias, cada uma com características específicas que as tornam mais ou menos adequadas a determinadas

aplicações. Entre os principais tipos de baterias utilizadas em sistemas estacionários e de mobilidade elétrica, destacam-se as baterias à base de chumbo e as baterias à base de lítio, além de outras alternativas que, embora ainda menos consolidadas comercialmente, apresentam potencial para aplicações futuras. A seguir, são apresentadas as principais tecnologias de baterias, com suas vantagens, limitações e campos de aplicação mais comuns.

2.1.1.1 Baterias de Chumbo

Esta categoria compreende diferentes tecnologias de baterias à base de chumbo, como as tradicionais baterias chumbo-ácido, as variantes com adição de carbono (chumbo-carbono), as baterias chumbo-ácido reguladas por válvula e ainda modelos considerados avançados, que utilizam ligas ou aditivos para prolongar o desempenho (Silva, 2022). Tais baterias são amplamente empregadas em sistemas estacionários, principalmente pela robustez, baixo custo inicial e facilidade de reciclagem. A Figura 3 ilustra a composição interna de uma bateria chumbo-ácido do tipo Freedom, destacando seus principais componentes construtivos.

Figura 3 – Bateria chumbo-ácido Freedom



Fonte: Adaptado de NeoSolar Energia (2025)

No âmbito dos sistemas fotovoltaicos, há estudos que investigam o comportamento das baterias estacionárias de chumbo-ácido, indicando que o impacto das correntes de carga e descarga sobre o processo de degradação é menos severo em comparação a aplicações automotivas ou de tração elétrica, onde as solicitações são mais intensas e frequentes (Pergher, 2018). Isto se deve, em grande parte, à profundidade média de descarga e ao

regime de ciclos mais brandos presentes em aplicações estacionárias, que contribuem para reduzir o estresse eletroquímico das células.

Pesquisas também exploraram a comparação entre a vida útil de bancos de baterias de íons de lítio e de chumbo-ácido em projetos que envolvem compensação energética via energia solar e participação em programas de tarifas brancas, evidenciando diferentes taxas de degradação, eficiência de recarga e sensibilidade térmica (Fernandes, 2021). Observa-se que, embora as baterias de lítio apresentem maior densidade energética e melhor desempenho em ciclos profundos, as baterias de chumbo-ácido ainda se mostram competitivas quando o projeto prioriza menor investimento inicial e um histórico consolidado de operação em ambientes variados.

Complementarmente, trabalhos como o de Pergher (2018) ressaltam a importância do monitoramento do SoH em baterias chumbo-ácido seladas aplicadas em sistemas críticos, como no caso de elevadores, destacando que fatores como resistência interna, número de ciclos, variação térmica e envelhecimento químico têm influência direta na capacidade de armazenamento e na confiabilidade desses dispositivos. Essa abordagem reforça a necessidade de estratégias de manutenção preditiva e de técnicas para estimar o SoH de modo a evitar falhas inesperadas em aplicações onde a continuidade do fornecimento de energia é essencial.

2.1.1.2 Baterias de Lítio

Este grupo abrange baterias de titanato de lítio, fosfato de ferro-lítio, polímero de lítio e íons de lítio. As baterias de íons de lítio têm se mostrado promissoras para aplicações de armazenamento de energia. São amplamente utilizadas devido à sua maior duração de carga, menor utilização de substâncias em sua composição e menor suscetibilidade ao efeito memória, que faz com que as baterias percam carga com mais facilidade (Junior, 2023). Além disso, o lítio é considerado mais leve que o chumbo. As baterias de lítio são procuradas pela mobilidade elétrica devido à sua alta densidade energética e, com o aumento da escala e dos avanços na pesquisa, suas aplicações estão se expandindo para o setor elétrico.

[...] a avaliação do ciclo de vida do lítio é fundamental, considerando desde a atividade de mineração até as possibilidades de reutilização e reciclagem. (Silva, 2022, p. 16).

No entanto, os desafios para as baterias de íons de lítio incluem seu alto custo de fabricação, mesmo com as reduções recentes, e o potencial de incêndio porque o eletrólito é inflamável e a célula pode atingir altas temperaturas se usada além das especificações

(Junior, 2023). A avaliação do ciclo de vida do lítio é crucial, desde as atividades de mineração até as possibilidades de reutilização e reciclagem (Silva, 2022).

Segundo Silva (2022), temos baterias à base de sódio, à base de níquel e baterias de fluxo redox de vanádio (redox de vanádio). Assim, em termos de classificação com base na reversibilidade das reações, as baterias podem ser primárias (não recarregáveis) ou secundárias (recarregáveis). As baterias primárias têm reações de oxidação-redução irreversíveis e devem ser descartadas após o uso, enquanto as baterias secundárias são recarregáveis (Fernandes, 2021).

Destaca-se a importância de compreender os principais parâmetros de uma bateria para sua avaliação e comparação, como a potência nominal, densidade de energia, tempo de descarga, eficiência energética e ciclo de vida. Além disso, o SoC e o SoH são essenciais para indicar a condição real da bateria e permitir o desenvolvimento de estratégias de controle que previnam sobrecarga e degradação, prolongando sua vida útil. De modo geral, reconhece-se a relevância crescente das baterias — especialmente as de íons de lítio — em aplicações no setor elétrico e na mobilidade elétrica, embora permaneçam desafios significativos que exigem pesquisa contínua e adaptações na regulamentação (Fernandes, 2021; Silva, 2022; Junior, 2023).

2.2 Sistemas de Armazenamento de Energia

Os Sistemas de Armazenamento de Energia (ESS - *Energy Storage System*, frequentemente chamados BESS. São particularmente relevantes no contexto do desenvolvimento de ferrovias de alta velocidade e transporte pesado, que podem causar desafios como quedas de tensão e aumento de perdas de energia (Sokol *et al.*, 2018; Luo *et al.*, 2021).

O modo pulsante de consumo de energia na rede ferroviária é uma causa de pulsações de tensão na rede de contatos. Essas pulsações levam a uma diminuição da eficiência do sistema energético, perdas ativas adicionais e níveis de tensão abaixo dos valores permitidos, resultando em aumento de perda de potência e aquecimento dos fios da rede de contato. O BESS pode ser usado para compensar essas flutuações de energia, pulsações de tensão e reduzir perdas ativas (Sokol *et al.*, 2018).

Além de abordar questões de qualidade de energia, a presença do BESS permite a utilização da energia de frenagem regenerativa dos trens, que de outra forma não seria capturada (Luo *et al.*, 2021). O BESS também facilita a integração de fontes alternativas de energia elétrica no sistema de tração existente (GOUV *et al.*, 2022).

No contexto das estações de carregamento ferroviário de mercadorias elétricas a bateria, especialmente aquelas que exigem carregamento rápido (>1 MW) em áreas potencialmente rurais, o BESS serve como um amortecedor de procura entre a rede e as

cargas de carregamento pulsado (GOUV *et al.*, 2022). Fontes de energia renováveis e BESS co-localizadas podem mitigar o impacto na rede local e ajudar a garantir que a energia seja proveniente de fontes com emissão zero para uma verdadeira descarbonização das locomotivas (GOUV *et al.*, 2022).

Segundo Luo *et al.* (2021), o uso de sistemas híbridos de armazenamento de energia elétrica que consistem em diferentes tipos de dispositivos de armazenamento. Esta abordagem híbrida permite compensar variações na potência da rede em uma ampla faixa de frequência, incluindo dispositivos de armazenamento eletroquímico com diferentes características de carga-descarga. Tecnologias específicas mencionadas para inclusão em estruturas BESS para expandir a faixa de frequência operacional eficiente são capacitores de camada dupla e acumuladores LiFePO₄. Os acumuladores LiFePO₄ são conhecidos por suas características energéticas aprimoradas em comparação com as baterias tradicionais de íons de lítio (Sokol *et al.*, 2018). Outras tecnologias BESS modeladas para estações de carregamento rápido incluem Baterias de Íon Lítio (LIB - *Lithium-Ion Battery*) e Baterias de Fluxo Redox de Vanádio (VRFB - *Vanadium Redox Flow Battery*). As LIB são populares por sua alta energia e potência específicas, bem como por custos decrescentes, enquanto os VRFB são atraentes para grandes armazenamentos estacionários devido à sua capacidade escalável e longo ciclo de vida. São apresentados modelos para esses tipos de baterias, levando em conta fatores como tensão, corrente, SoC e perdas de energia (GOUV *et al.*, 2022).

2.3 Monitoramento da Vida Útil de Baterias

O monitoramento da vida útil da bateria, geralmente chamado como SoH, é um aspecto crucial do gerenciamento de BESS. A capacidade de prever o fim da vida útil da bateria é complexa, mas compreender e controlar os fatores que influenciam a degradação é fundamental para maximizar sua vida útil (Fernandes, 2021).

2.3.1 Principais conceitos e métricas de monitoramento

Dois parâmetros fundamentais para entender o estado da bateria e gerenciar sua vida útil são o SoC e o SoH. Ao contrário de grandezas físicas como corrente e tensão, SoC e SoH não são diretamente mensuráveis (Fernandes, 2021).

2.3.1.1 Estado de Carga

O SoC representa a porcentagem de energia restante na bateria em um determinado momento. A estimativa e o monitoramento precisos do SoC são essenciais para o

gerenciamento da operação. Um método comum para estimar SoC é a contagem de *Coulomb* (Fernandes, 2021). A fórmula para este método é dada pela Equação 2.1:

$$SoC = SoC_0 + \frac{1}{Q_n} \cdot \int i(\tau) d\tau \quad (2.1)$$

Sendo:

- SoC é o estado de carga;
- SoC_0 é o SoC inicial;
- Q_n é a capacidade nominal;
- i é a corrente ao longo do tempo (τ).

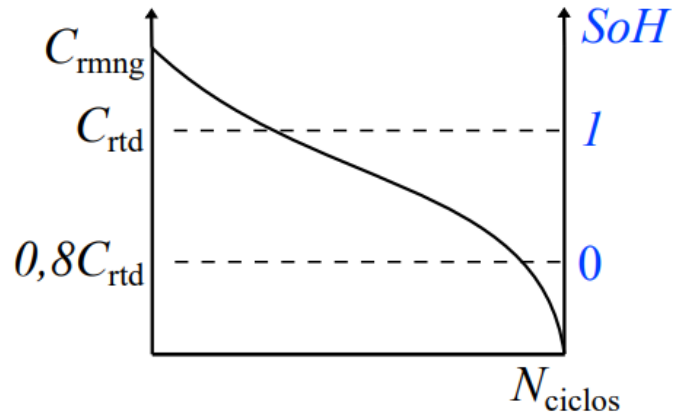
Erros na estimativa podem acumular-se ao longo do tempo e as reações paralelas aumentam à medida que a bateria envelhece. A estimativa do SoC também pode ser feita por meio da medição de tensão, embora esse método tenha desvantagens, especialmente para baterias de íons de lítio com curvas planas de Tensão em Circuito Aberto (*OCV-Open-Circuit Voltage*).

2.3.1.2 Estado de Saúde

O SoH fornece informações sobre a condição geral da bateria e seu nível de degradação. Em concordância com Fernandes (2021), estimar a vida útil da bateria ou SoH tem sido historicamente desafiador.

[...] Outra forma de mensurar a vida útil é pela perda de capacidade. Uma bateria é dita condenada se sua capacidade atingir 80% de sua capacidade nominal $0,8C_{rtid}$. Esse critério, ilustrado na Figura 4, [...]. (Fernandes, 2021, p. 36).

Figura 4 – Estado de saúde (SoH) em função da retenção de capacidade de uma bateria



Fonte: Adaptado de Fernandes (2021)

Dessa forma, conforme avaliado por Fernandes (2021), a capacidade restante (C_{rmng}) diminui ao longo do tempo com a operação. Essa degradação pode ser avaliada por meio da Equação 2.2:

$$C_{\text{rmng}} = C_0 - \frac{1}{2NQ_0} \cdot \int_0^t |Q_i(\tau)| d\tau \quad (2.2)$$

Sendo:

- C_{rmng} é a capacidade restante;
- C_0 é a capacidade inicial;
- Q_i é a carga coulométrica;
- N são os ciclos equivalentes.

Os métodos para estimar a vida útil incluem tempo de recuperação, perda de capacidade, aceitação de carga e impedância interna. Impedância interna, que aumenta com o envelhecimento, pode ser medido como um indicador de SoH, mas isso geralmente requer ambientes de laboratório controlados.

Embora o SoC e o SoH sejam grandezas fundamentais para o gerenciamento e a avaliação da vida útil das baterias, o projeto de monitoramento analisado limita-se ao acompanhamento de variáveis como corrente, tensão e temperatura.

2.3.2 Fatores que influenciam a expectativa de vida

Compreender as causas da falha da bateria e o processo de degradação é essencial para minimizá-los. Vários fatores, conhecidos como estressores, afetam a vida útil da bateria:

2.3.2.1 Profundidade de Descarga

A Profundidade de Descarga (DoD - *Depth of Discharge*) representa a intensidade da capacidade utilizada em relação à capacidade total. O DoD impacta significativamente a vida útil das baterias de íons de lítio (Ricardo, 2023). Um *DoD* mais baixo pode aumentar exponencialmente o número de ciclos que uma bateria pode completar. O *DoD* para uma aplicação pode ser calculado a partir da Equação 2.3:

$$DoD = S_0 C_{mx} + \int_0^t i(\tau) d\tau \quad (2.3)$$

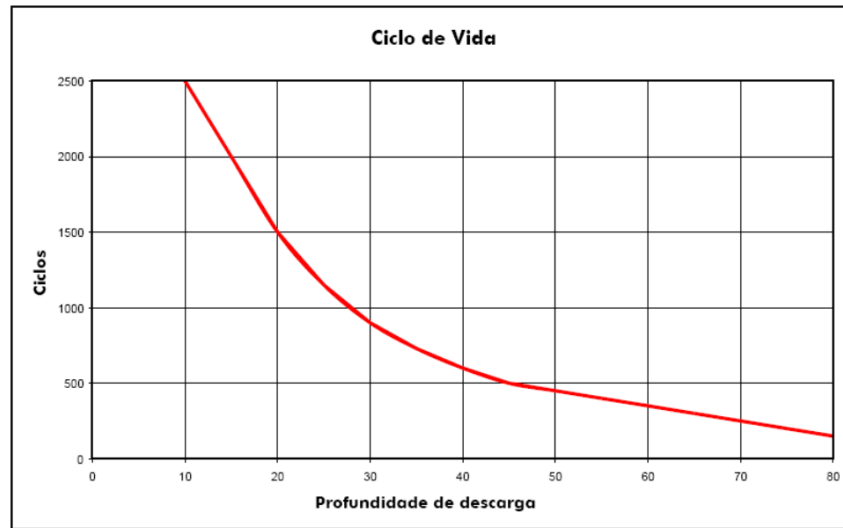
Sendo:

- *DoD* é a profundidade de descarga;
- $S_0 C_{mx}$ é o estado máximo de carga;
- *i* é a corrente de descarga.

Além da capacidade de fornecimento de energia, o tempo de vida útil de uma bateria também precisa ser considerado. Esse ciclo de vida é determinado pelo número de ciclos completos de carga e descarga que a bateria pode realizar antes que seu desempenho se deteriore. Em especial, as baterias de íons de lítio têm sua vida útil afetada significativamente pela profundidade de descarga, que se refere à quantidade de energia retirada da bateria em cada ciclo de uso.

Por exemplo, quando a bateria é descarregada apenas 20% de sua capacidade total, ela apresenta uma vida útil muito maior em comparação àquelas que são descarregadas em níveis mais profundos, como 80% de sua capacidade total. Esse efeito pode ser observado na Figura 5, que ilustra o tempo de vida de uma célula típica de chumbo-ácido em função da profundidade de descarga.

Figura 5 – Tempo de vida de uma bateria em relação à profundidade de descarga



Fonte: Adaptado de Clarios (2017)

Com os avanços recentes na tecnologia de produção de baterias de íons de lítio, espera-se uma redução de custos e um aumento na confiabilidade e eficiência desses sistemas, tornando-os ainda mais promissores para aplicações ferroviárias. Essas melhorias não apenas ampliam a vida útil das baterias como também aumentam sua capacidade de armazenamento, mesmo com profundidades de descarga mais elevadas. O progresso contínuo nesse campo indica um futuro promissor para a aplicação de sistemas de baterias em ferrovias, contribuindo significativamente para a viabilidade econômica e a eficiência energética do setor (Ricardo, 2023).

2.3.2.2 Temperatura

De acordo com Fernandes (2021), o funcionamento da bateria é afetado pela temperatura. Um aumento de 10°C pode reduzir pela metade a vida útil da bateria. A vida útil estimada (Y_t) em anos, dependente da temperatura, pode ser calculada com a fórmula:

$$Y_t = L_s X_t \left[\frac{2(T_{av} - T_s)}{10} \right] \quad (2.4)$$

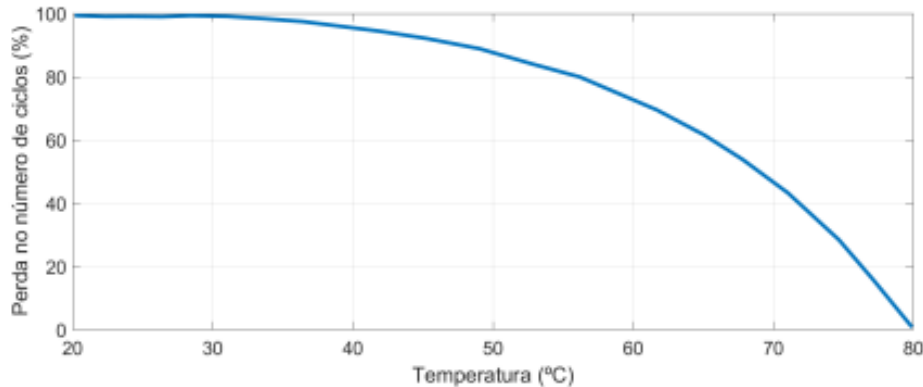
Sendo:

- Y_t é a vida útil estimada;
- L_s é a vida útil em flutuação à uma temperatura definida (T_s);

- X_t é um fator de correção;
- T_{av} é a temperatura média de operação.

Essa perda do numero de ciclos pode ser observada pelo gráfico na Figura 6.

Figura 6 – Expectativa de vida em função da Temperatura



Fonte: Adaptado de Fernandes (2021)

2.3.2.3 Tensão

A tensão de carga final, conhecida como tensão de flutuação, afeta a vida útil do ciclo. Para baterias de lítio, uma tensão de flutuação mais alta reduz o número de ciclos. Operando dentro de uma faixa de SoC específica (cerca de 70% para lítio, cerca de 100% para chumbo-ácido) pode maximizar a longevidade (Fernandes, 2021). A descarga abaixo da tensão de corte resulta em descarga profunda, o que impacta a vida útil. O monitoramento de sobretensão e subtensão é necessário (Junior, 2023).

2.3.2.4 Corrente

O perfil de corrente durante os ciclos de carga e descarga exerce influência direta sobre a degradação das baterias e, conseqüentemente, sobre sua vida útil. Correntes elevadas, principalmente em processos de descarga, podem acelerar fenômenos eletroquímicos adversos, como aumento da resistência interna, perda de capacidade ativa e elevação local da temperatura, que intensificam processos de desgaste (Fernandes, 2021). Em simulações conduzidas por Fernandes (2021), foi constatado que estratégias de recarga menos agressivas, com controle mais suave das correntes, resultam em menor *throughput* energético, mas promovem uma vida útil significativamente superior ao banco de baterias.

Por outro lado, Junior (2023) destaca que a proteção contra sobrecorrente é essencial para manter as baterias dentro de uma Área Segura de Operação (SOA - *Safe*

Operating Area), prevenindo danos imediatos e evitando ciclos profundos que reduzem drasticamente a expectativa de vida útil.

Dessa forma, pode-se caracterizar:

1. Perfil de corrente prejudicial:

- Altas correntes de descarga, acima dos valores recomendados pelos fabricantes ou dos limites definidos pelo BMS, levando a quedas abruptas de tensão e aquecimento localizado;
- Ciclos com profundidade de descarga excessiva, especialmente associados a altas correntes, o que acelera a degradação química e reduz o número de ciclos disponíveis;
- Ausência de estratégias adaptativas ou de equalização, que permitam distribuir o desgaste uniformemente entre as células.

2. Perfil de corrente adequado:

- Correntes de carga e descarga moderadas, compatíveis com o regime projetado, que respeitam as recomendações de taxa C do fabricante, mantendo o SoC (*State of Charge*) em faixas que evitam ciclos muito profundos;
- Controle de recarga e descarga baseado em monitoramento do SoH, ajustando dinamicamente os parâmetros de operação para preservar a uniformidade do banco (Fernandes, 2021);
- Implementação de sistemas de proteção contra sobrecorrente (Junior, 2023), que interrompem o fornecimento ou ajustam a operação em situações anômalas, garantindo a integridade dos módulos.

Portanto, observa-se que a manutenção de perfis de corrente controlados, com taxas compatíveis ao projeto e estratégias inteligentes de controle de carga, é fundamental para reduzir as perdas de capacidade ao longo do tempo e assegurar a longevidade do sistema de armazenamento.

2.3.3 O papel dos modelos BMS e de degradação

Os Sistemas de Gerenciamento de Baterias (BMS - *Battery Management System*) são essenciais para monitorar parâmetros como SoC, SoH, tensão, corrente e temperatura, e para proteger a bateria contra condições como sobretensão, sobrecorrente ou aumento de temperatura (Junior, 2023).

De acordo com Fernandes (2021), os modelos de degradação são usados para rastrear a vida útil da bateria e prever o SoH com base em fatores como perda de capacidade, mecanismos de falha e taxa de transferência de carga. Esses modelos podem variar de modelos eletroquímicos complexos a modelos de rendimento mais simples. Os modelos de vazão são frequentemente mais simples, usando dados acessíveis, sendo a *DoD* uma variável significativa. No entanto, modelos precisos muitas vezes requerem testes laboratoriais extensivos, e alguns modelos mais simples podem não levar em conta todos os estressores, como temperatura e voltagem. A avaliação de estratégias de controle requer o uso desses modelos de degradação.

2.4 Visualização de Dados em Plataformas IoT

A visualização de dados em plataformas de Internet das Coisas (IoT - *Internet of Things*) é um tema central na interação com as informações geradas por sensores e dispositivos conectados, especialmente em ambientes complexos como edifícios ou cidades inteligentes, e em contextos industriais (Ferreira, 2020).

Atualmente, o interesse em explorar a IoT para monitoramento e gerenciamento de ambientes internos, como temperatura e iluminação, tem crescido. No entanto, os dados brutos gerados pelos agentes de IoT muitas vezes não são atrativos para um público menos técnico, como supervisores de edificações. Assim, a forma como esses dados são apresentados é crucial (Matsuo *et al.*, 2023).

A escolha de um método protegido para a visualização dos dados do sensor é importante, pois pode ajudar os usuários a entender intuitivamente e trabalhar com os dados de maneira mais rápida e fácil. Tradicionalmente, técnicas de visualização estática (como gráficos de linhas, gráficos de barras, gráficos de dispersão e mapas) são usadas para interpretar dados. Contudo, essas técnicas têm certas restrições, pois só permitem a visualização de determinados tipos de dados e tornam-se menos úteis para grandes volumes ou dados complexos. As visualizações estáticas também sofrem significativamente com a falta de capacidade de representar dados ao vivo de forma interativa, limitando tarefas interativas (Matsuo *et al.*, 2023).

Sensores de IoT podem fornecer *feedback* em tempo real sobre os ambientes físicos monitorados (Matsuo *et al.*, 2023). Essa informação é de grande valia, pois as condições internacionais influenciam enormemente o bem-estar térmico para pessoas e equipamentos eletrônicos. A IoT permite que o *streaming* de dados de dispositivos conectados à rede seja entregue e transformado em outros tipos de informações para serem incluídos em simulações virtuais (Matsuo *et al.*, 2023).

Para superar as limitações da visualização estática e capitalizar os dados em tempo real, novas abordagens para visualização de dados IoT são propostas e exploradas.

Em um contexto, a proposta é a coleta de dados ecossistêmicos por meio de dispositivo sensor, transmissão por redes sem fio, e a disponibilização dessas informações aos responsáveis (Matsuo *et al.*, 2023). Um método envolve o monitoramento de dados em tempo real de temperatura usando arquitetura IoT e Realidade Aumentada (AR - *Augmented reality*) para visualização. Gráficos de conforto virtuais são exibidos em formato AR, mostrando valores recebidos dos sensores e e podem mostrar o status em relação ao conforto térmico. A integração de Modelagem da Informação da Construção (BIM - *Building Information Modeling*), detecção ambiental orientada por IoT e visualização baseada em AR oferece a oportunidade de monitoramento em tempo real de configurações relacionadas ao conforto térmico. O pré-processamento de dados é uma etapa crucial antes de incorporar modelos digitais em ambientes virtuais. A geração de visualizações comentadas e direcionadas ajuda as partes interessadas a compreender melhor as saídas do sensor e tomar melhores decisões (Matsuo *et al.*, 2023).

Outra abordagem destacada é o uso de dashboards (Rolim, 2020). *Dashboards* são ferramentas de análise de dados usadas para rastrear e exibir Indicador-Chave de Desempenho (KPI - *Key Performance Indicator*), estatísticas e pontos-chave de dados, fornecendo uma forma organizada de visualização de informações. Eles sintetizam informações, evitando excessos e reunindo dados de maneira uniforme, auxiliando o usuário a entender as informações e diferenciando-se de outros métodos que compilam múltiplos serviços. Dada a grande quantidade e variedade de dados em plataformas para cidades inteligentes, o cenário é ideal para o desenvolvimento de interfaces de *dashboard*, pois ajuda a identificar visualmente tendências, padrões e anomalias (Rolim, 2020; Ferreira, 2020; Matsuo *et al.*, 2023).

2.4.1 Grafana

Grafana é uma plataforma de código aberto usada para monitoramento, análise e visualização de dados. Ele foi projetado especificamente para funcionar de forma eficaz com fontes de dados de séries temporais, que incluem bancos de dados como o InfluxDB. Comparado às opções de visualização integradas em alguns bancos de dados, como o InfluxDB, o Grafana oferece uma gama mais ampla de recursos de visualização.

2.4.1.1 Recursos Relevantes para Visualização

Segundo KIREŠOVÁ *et al.* (2023) vários recursos tornam o Grafana uma ferramenta adequada para visualização de dados:

1. **Tipos de visualização:** O Grafana oferece uma ampla seleção de opções de visualização, incluindo barras, pizza, linhas e outros tipos de gráficos. A escolha do tipo de gráfico é flexível e depende do usuário;
2. **Dashboards:** O Grafana permite a criação de diferentes *dashboards*. Os *dashboards* fornecem uma visão dos dados de um banco de dados, permitindo que os usuários monitorem as métricas por meio de várias visualizações. Um *dashboards* pode ser composto por dados de uma única fonte de dados ou de várias fontes de dados diferentes. Isso permite visualizar dados de vários locais ou diferentes instâncias de banco de dados, todos juntos em um só lugar. Além disso, um *dashboards* é composto por painéis. Cada painel representa uma representação visual de uma consulta e consiste em uma consulta e uma visualização;
3. **Suporte a fontes de dados:** o Grafana oferece suporte a uma variedade de fontes de dados, como MySQL, Prometheus, InfluxDB, AWS Cloud e Postgres. Cada fonte de dados possui um menu de consulta específico, adaptado às suas características. A capacidade do Grafana de lidar eficientemente com várias fontes de dados é uma vantagem significativa, especialmente ao lidar com vários bancos de dados;
4. **Facilidade de uso:** Os gráficos exibidos através do Grafana são projetados para serem fáceis de usar, tanto graficamente quanto em termos de trabalho interativo. Existe uma ampla seleção de telas de informações oficiais e criadas pela comunidade (painéis) que são fáceis de configurar;
5. **Plugins e extensões:** O Grafana oferece uma grande variedade de extensões diferentes que podem ser instaladas para fornecer aos usuários muito mais opções;
6. **Alertas:** As visualizações permitem que o usuário defina graficamente limites e regras de acordo com os quais o Grafana envia notificações, como por e-mail ou outros canais de comunicação.

Em resumo, o Grafana serve como uma ferramenta poderosa e atraente baseada na web para visualizar dados medidos devido à sua simplicidade, operação intuitiva, suporte para múltiplas fontes de dados, variedade de tipos de gráficos, recursos interativos e capacidade de criar painéis detalhados e dinâmicos. Isso o torna valioso para processar grandes conjuntos de dados e obter insights mais profundos sobre os relacionamentos e tendências dentro dos dados (KIREŠOVÁ *et al.*, 2023).

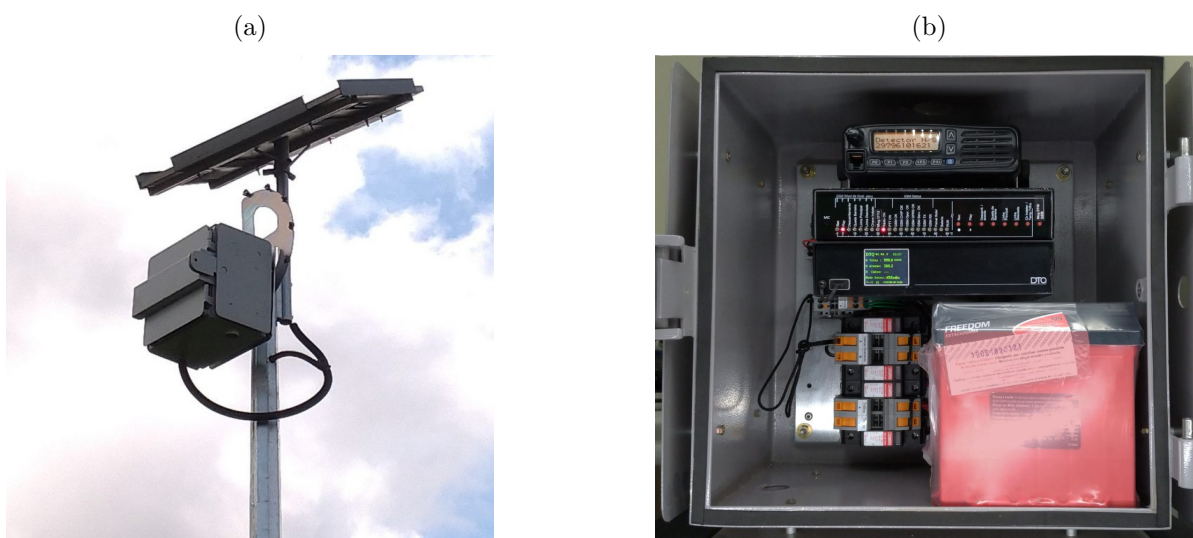
3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho adota uma abordagem metodológica de natureza aplicada, com caráter exploratório e analítico, utilizando-se de métodos mistos. A pesquisa é fundamentada na integração de dois pilares:

- i. uma revisão bibliográfica sistemática sobre o tema;
- ii. a análise dos dados operacionais coletados em campo através de visualização em plataforma IoT, no caso, o Grafana.

A partir dessa estrutura metodológica, busca-se compreender o comportamento e a degradação de baterias empregadas em sistemas ferroviários, especialmente aquelas utilizadas em dispositivos autônomos como Detector de Trilho Quebrado (DTQ) e Detector de Descarrilamento (DDC), apresentado pela Figura 7a e 7b.

Figura 7 – Detector de Descarrilamento e Detector de Quebra de Trilho



Fonte: Adaptado de Ricci Eletrônica (2018)

A primeira etapa da pesquisa compreende uma revisão bibliográfica sistemática com o objetivo de estabelecer a estrutura teórica que fundamenta o estudo. Foram consultadas bases científicas reconhecidas, como *IEEE Xplore*, *ScienceDirect*, *Google Scholar* e periódicos nacionais, priorizando artigos dos últimos dez anos. Os principais temas abordados incluem:

1. O panorama da infraestrutura ferroviária no Brasil e seus desafios operacionais;

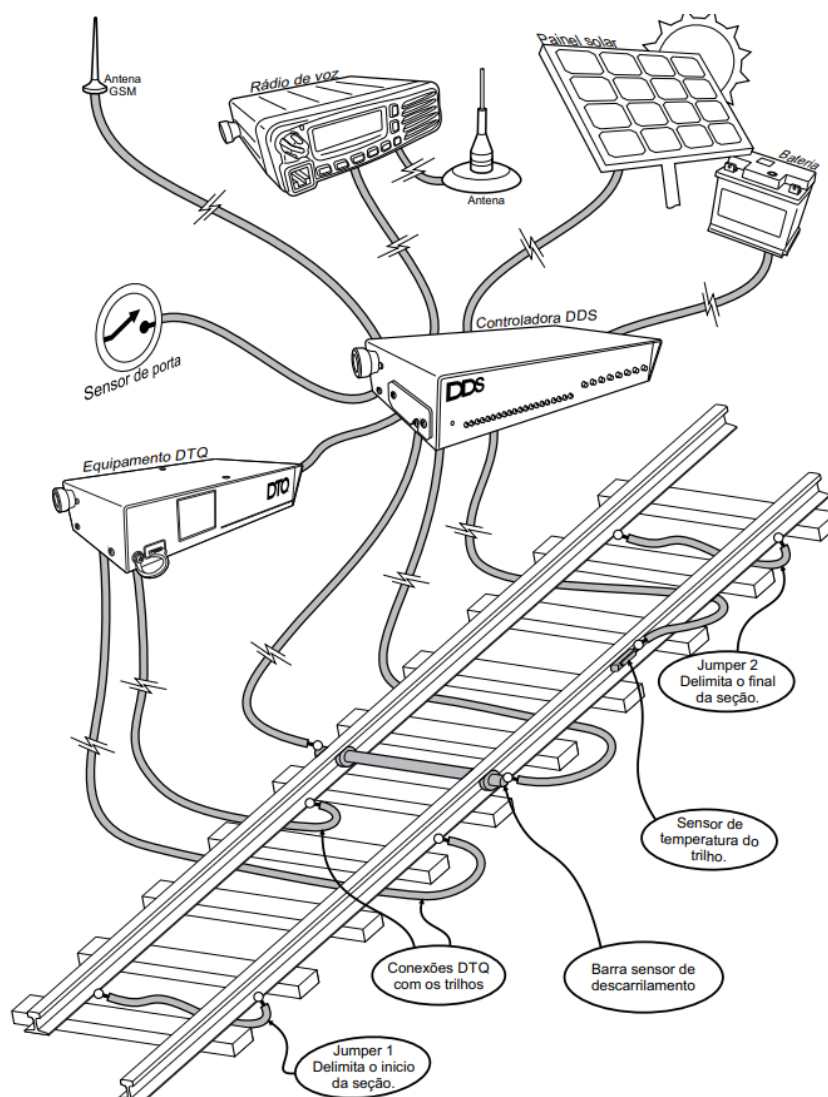
2. O papel dos sistemas BESS em aplicações ferroviárias;
3. Estratégias de monitoramento de baterias e técnicas de predição de falhas;
4. Aplicações de IoT e visualização de dados em ambientes ferroviários.

Essa etapa teórica visa estabelecer a importância do gerenciamento inteligente da vida útil das baterias como um fator crítico para a confiabilidade e eficiência de sistemas ferroviários (Alves, Ramos, Silva, 2020).

3.1 Sistema de Detecção

A análise empírica deste trabalho foi conduzida a partir do estudo de um sistema real de monitoramento de baterias aplicado em detectores ferroviários. Esses dispositivos são instalados ao longo das linhas férreas com o objetivo de monitorar continuamente as condições dos trilhos, contribuindo diretamente para a segurança operacional, como ilustrado na Figura 8. Por estarem muitas vezes localizados em regiões remotas e de difícil acesso, esses sistemas dependem de baterias para seu funcionamento, o que exige estratégias robustas de gerenciamento energético.

Figura 8 – Sistema DTQ



Fonte: Adaptado de Ricci Eletrônica (2018)

No sistema monitorado, o DTQ é o responsável por verificar a integridade elétrica dos trilhos, utilizando um ohmímetro interno que mede a resistência elétrica do trecho. Esse dispositivo é equipado com um microcontrolador ARM de 32 bits, operando a 120 MHz, que realiza o processamento dos sinais, o controle da fonte de medição, a gestão da memória não volátil — onde ficam armazenados os registros das medições — e o comando da interface homem-máquina. Caso o valor medido ultrapasse o limite previamente configurado (resistência de alarme), o DTQ envia automaticamente um sinal para a controladora DDS, indicando a ocorrência de uma possível falha. Essa comunicação entre o DTQ e a DDS é feita através de uma saída serial padrão RS-232, garantindo o roteamento seguro dos dados para o próximo estágio do sistema (Ricci Eletrônica, 2018).

A metodologia de detecção empregada utiliza dois jumpers soldados nos trilhos, que delimitam a seção monitorada, com o DTQ instalado aproximadamente no centro do trecho, dividindo-o em dois segmentos elétricos (Ricci Eletrônica, 2018). Essa configuração permite identificar alterações sutis na resistência elétrica, as quais podem indicar uma quebra ou desgaste acentuado do trilho. Atualmente, são utilizados em torno de 1.118 sistemas de detecção, sendo que cada sistema monitora uma seção de trilho com extensão variando entre 3000m e 7000m, o que garante ampla cobertura e capacidade de diagnóstico ao longo da malha ferroviária. Cada sistema opera de forma independente, sem interferência nos demais, uma vez que as seções são eletricamente isoladas entre si por meio dos jumpers e da própria configuração dos segmentos, assegurando medições precisas e localizadas.

A controladora DDS, por sua vez, desempenha múltiplas funções. Além de gerenciar a carga das baterias alimentadas por painel solar e emitir alertas via rádio de voz ao maquinista em caso de anomalias, ela é responsável por adquirir e transmitir os dados elétricos e térmicos do sistema. É a partir da DDS que são obtidas as principais variáveis monitoradas neste estudo, diretamente relacionadas ao desempenho e à saúde das baterias:

1. Tensão (V);
2. Corrente (A);
3. Temperatura (°C).

Para a análise dos dados coletados, foi empregada a plataforma Grafana, conectada ao banco de dados alimentado pelas medições enviadas pela DDS via rede Sistema Global para Comunicações Móveis (GSM - *Global System for Mobile Communications*). O Grafana possibilitou a criação de *dashboards* interativos, que apresentam o histórico das variáveis elétricas e os eventos de alarme registrados, permitindo análises aprofundadas sobre o comportamento do sistema e a vida útil das baterias.

Os resultados obtidos a partir da revisão teórica, da análise dos dados e da exploração dos painéis IoT foram sistematizados para embasar propostas de melhorias no gerenciamento das baterias. Entre as recomendações destacam-se:

1. Ajustes nos limiares de monitoramento;
2. Estratégias para prolongar a vida útil das baterias;
3. Diretrizes para expandir o sistema de monitoramento para outros trechos da malha ferroviária.

Assim, o método adotado neste estudo oferece subsídios técnicos relevantes para decisões que visem aumentar a confiabilidade do monitoramento e otimizar o uso das baterias em campo.

4 RESULTADOS OBTIDOS

A análise dos dados obtidos por meio da plataforma Grafana proporcionou *insights* fundamentais sobre o desempenho e a saúde das baterias utilizadas nos sistemas ferroviários de detecção (DDC e DTQ). Esses dados foram coletados pela controladora DDS, que monitora continuamente variáveis elétricas e térmicas, como tensão, corrente e temperatura, e transmite essas informações para um banco de dados remoto via comunicação GSM. A partir desse banco, os dados foram integrados ao Grafana, viabilizando a criação de painéis interativos para visualização e análise.

Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos a partir desses painéis, destacando o comportamento das variáveis de tensão, corrente, geração solar e temperatura, além da avaliação dos critérios de criticidade. Dessa forma, busca-se evidenciar as relações entre o desempenho elétrico, as condições ambientais e a confiabilidade operacional do sistema monitorado.

4.1 Análise Diurna de Criticidade – Monitoramento ao Longo do Dia

A Tabela 2 apresenta a tendência de criticidade das baterias ao longo de um ciclo diurno completo, com o objetivo de verificar se as mesmas conseguem recuperar carga suficiente durante o período de insolação para garantir o funcionamento estável no decorrer da noite. Observa-se que parte significativa dos dispositivos monitorados encontra-se em condição preocupante. Ressalta-se que os dados apresentados foram obtidos por meio da plataforma de visualização IoT Grafana, a partir da integração com o sistema de monitoramento implementado.

Tabela 2 – Baterias com tendência de criticidade - Análise Diurna

Baterias com tendência de criticidade - Análise Diurna				
DDS	Tensão da Bateria (V)	Tensão da Bateria Min (V)	Corrente Max do Painel (mA)	Classificação
1.45AA.24E3.8B29	5.383	4.600	0.580	Crítico
1.45AA.24D9.9064	8.147	4.700	0.260	Crítico
1.45AA.24D9.8689	11.560	11.400	0.880	Crítico
1.470C.49EA.EC0B	11.675	11.000	1.720	Crítico
1.470C.49CD.7408	11.717	11.600	0.030	Crítico
1.43D9.E597.06EA	11.720	11.200	1.400	Crítico
1.43D9.E597.06FC	11.840	11.800	0.220	Atenção
1.470C.49CD.7ADD	11.850	11.700	-0.220	Atenção
1.440F.6A0.9AEE	11.890	11.700	-0.100	Atenção
1.45AA.24E3.95B2	11.940	11.800	0.200	Atenção
1.45AA.253A.1A15	11.943	11.600	0.320	Atenção
1.45AA.24E3.CECE	11.950	11.900	0.030	Atenção

Fonte: Autor (2025)

Os dados revelam que algumas baterias permanecem com níveis de tensão extremamente baixos, inclusive inferiores a 6V, mesmo sob condições de corrente do painel solar, ainda que limitada. Esses valores são indicativos de degradação avançada, possivelmente associada a processos de sulfatação irreversível nas placas (no caso de baterias chumbo-ácido) ou a uma significativa perda da capacidade de armazenamento (no caso de baterias de íons de lítio), inviabilizando o acúmulo adequado de energia para o suprimento noturno.

Outros pontos de monitoramento aparecem classificados na categoria "Atenção", com tensões variando entre aproximadamente 11,3V e 12V. Embora ainda não configurem falha iminente, esses níveis sinalizam uma condição limítrofe que pode evoluir para um quadro crítico em curto prazo, sobretudo em cenários de maior demanda ou redução adicional da irradiação solar. Dessa forma, torna-se fundamental o acompanhamento contínuo dessas unidades, a fim de planejar ações corretivas antes que ocorra uma interrupção total.

Cabe destacar que tais condições elevam o risco sistêmico, considerando que o DTQ possui classificação de risco alto, dado que a falha em emitir um alarme em caso de fratura real do trilho representa probabilidade elevada de acidente. Assim, a presença de baterias em estado crítico ou em situação de alerta compromete diretamente a confiabilidade do sistema, podendo resultar na indisponibilidade do monitoramento da integridade da via. Isso reforça a importância de políticas de manutenção preditiva, com substituição programada dos acumuladores e calibração periódica das tensões de carga e flutuação, mitigando riscos operacionais e ampliando a segurança da operação ferroviária.

4.2 Avaliação de Criticidade por Faixa Horária

A Tabela 3 apresenta as baterias que demonstraram tendência de criticidade no período entre 17h00 e 20h00, intervalo caracterizado pela redução drástica ou completa ausência de irradiação solar. Nesse horário, a geração fotovoltaica torna-se praticamente

nula, de modo que a alimentação dos sensores e dispositivos depende exclusivamente da energia previamente acumulada nas baterias. As informações foram extraídas a partir dos registros históricos disponibilizados pela plataforma Grafana, integrando os dados coletados pelos dispositivos IoT ao longo desse intervalo.

Tabela 3 – Baterias com tendência de criticidade (17h00 e 20h00)

Baterias com tendência de criticidade (17h00-20h00)				
DDS	Tensão da Bateria (V)	Tensão da Bateria Min (V)	Corrente Max do Painel (mA)	Classificação
1.45AA.24D4.D73A	11.225	11.200	-0.120	Crítico
1.470C.49CD.631C	11.302	11.300	0.030	Crítico
1.45AA.24D6.A9D4	11.550	11.500	-0.020	Crítico
1.470C.49CD.7408	11.725	11.700	0.020	Crítico
1.45AA.24E3.D5C4	11.763	11.700	0.010	Crítico
1.43D9.E543.EE08	11.833	11.500	-0.030	Atenção
1.470C.49EA.EB98	11.850	11.800	-0.020	Atenção
1.470C.49CD.6A0A	11.850	11.800	1.460	Atenção
1.45AA.24E3.D520	11.850	11.800	-0.020	Atenção

Fonte: Autor (2025)

Os resultados evidenciam que diversas unidades apresentam tensões próximas ou inferiores a 11,3V, o que, segundo os critérios adotados pelo sistema, configura uma condição classificada como "Crítico". Além disso, observa-se que a corrente fornecida pelos painéis solares permanece negativa ou muito próxima de zero, caracterizando um processo contínuo de descarga sem reposição energética. Esse cenário expõe a vulnerabilidade dos sistemas de detecção nesse intervalo noturno, aumentando a probabilidade de falha funcional.

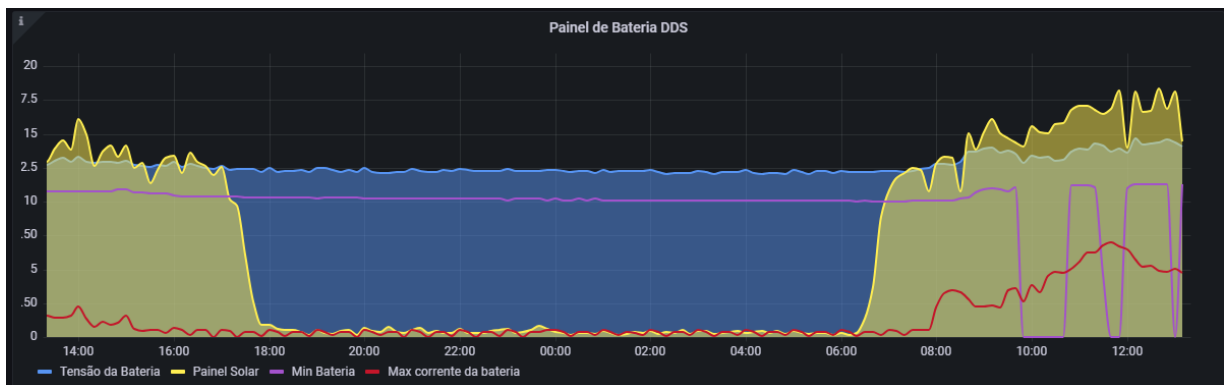
No contexto específico do DDC, trata-se de um risco classificado como médio, uma vez que há redundância assegurada pelo Detector de Descarrilamento de Vagão (DDV). Contudo, deve-se considerar que existe um backlog de DDVs atualmente inoperantes, o que eleva significativamente o risco global do sistema. Caso ocorra uma falha no fornecimento de energia devido à baixa tensão das baterias, pode haver comprometimento da capacidade de detecção de descarrilamentos, resultando em possibilidade real de acidente.

Essa análise temporal permite não apenas identificar janelas críticas em que a confiabilidade energética se encontra mais comprometida, mas também oferece subsídios técnicos para intervenções estratégicas. Dentre elas destacam-se o ajuste de algoritmos de recarga, o redimensionamento dos módulos fotovoltaicos e a substituição programada de baterias com baixa retenção de carga. Essas ações visam reduzir o risco operacional, assegurar a continuidade dos processos de monitoramento e aumentar a segurança da operação ferroviária.

4.3 Análise Temporal de Tensão, Corrente e Geração Solar

A Figura 9 representa o comportamento dinâmico de variáveis elétricas ao longo de 24 horas, incluindo tensão da bateria, corrente máxima, tensão mínima e nível de geração solar. Os dados utilizados para a construção do gráfico foram coletados automaticamente pela plataforma IoT implantada e visualizados por meio do Grafana, permitindo o acompanhamento em tempo real e a análise histórica das variáveis envolvidas.

Figura 9 – Evolução temporal dos parâmetros elétricos da bateria



Fonte: Autor (2025)

No gráfico (Figura 9), o eixo da abscissa (horizontal) representa o tempo ao longo de um período de 24 horas, com marcações distribuídas de forma regular, permitindo acompanhar o comportamento das variáveis em função do ciclo diário de geração e consumo de energia. O eixo da ordenada (vertical), por sua vez, exibe os valores numéricos das variáveis monitoradas, variando de 0 a 20V no caso das grandezas em volts e até 7,5A para as correntes. A tensão da bateria é representada pela linha azul e expressa em volts, enquanto a corrente máxima da bateria (linha vermelha) e o nível de geração solar (linha amarela) são apresentados em ampères. A linha roxa indica a tensão mínima registrada no período, funcionando como referência para avaliar a profundidade de descarga da bateria.

Durante o período noturno, observa-se a ausência total de geração solar (linha amarela), o que leva a uma descarga natural da bateria. Isso é evidenciado pela leve tendência de queda na tensão (linha azul) ao longo da madrugada. A tensão mínima (linha roxa) permanece estável, sugerindo que a bateria ainda possui capacidade suficiente para sustentar a carga durante esse intervalo sem entrar em níveis críticos.

Ao amanhecer, há um aumento gradual do nível de geração solar, que se intensifica por volta das 08h00, quando a incidência solar se torna mais efetiva. Esse aumento resulta em elevação da tensão da bateria, indicando o processo de recarga. Nota-se, contudo, que

o perfil de carga não é totalmente linear: oscilações na geração solar refletem variações na intensidade luminosa, possivelmente causadas por nuvens ou sombreamentos intermitentes.

Outro ponto relevante são os picos observados na linha vermelha, que representa a corrente máxima consumida. Tais flutuações abruptas podem estar associadas ao acionamento de cargas pontuais no sistema, como transmissões periódicas de dados pela DDS ou testes de resistência realizados pelo DTQ. Esses picos tornam-se mais evidentes nas horas de maior geração solar, o que indica um aproveitamento do excedente energético disponível para tarefas de maior demanda.

Além disso, entre 10h00 e 12h00 observa-se um padrão interessante: enquanto a geração solar se mantém elevada, há um aumento progressivo da corrente máxima, evidenciando a ocorrência de ciclos de carga mais intensos ou o acionamento repetitivo de dispositivos que elevam o consumo momentâneo.

Em conjunto, esses dados apontam para um comportamento típico de sistemas autônomos alimentados por energia solar, nos quais o período diurno é utilizado para restaurar o nível de carga das baterias consumido durante a noite. Entretanto, o monitoramento contínuo desses parâmetros é essencial para verificar se a bateria consegue suportar os ciclos completos sem ultrapassar os limites de descarga que poderiam comprometer sua vida útil.

4.4 Testes Direcionados em Baterias Críticas – Análise de Delta de Tensão

A Figura 10 apresenta os resultados dos testes específicos em baterias previamente classificadas como críticas no sistema de detecção que são compostos por placas DDS 2.0. O foco está na análise da diferença entre a tensão total da bateria e a tensão mínima registrada (delta), parâmetro que indica a estabilidade do sistema sob carga.

Figura 10 – Delta de tensão em baterias críticas.

Teste Bateria DDS 2.0 - Baterias críticas						
DDS	Data, Mês, Ano	Corrente Bateria	Tensão Bateria	Min Tensão Bateria	Delta	Alarme
1.4244.C4C0.19A0	29, 5, 25	-1.320	11.968	11.200	0.768	Atenção
1.4244.C4A1.42EA	16, 5, 25	-1.048	12.175	11.600	0.575	Atenção
1.4244.C4BF.E992	29, 5, 25	-1.306	12.155	11.600	0.555	Atenção

Fonte: Autor (2025)

O maior delta registrado foi de 0,768V, o que evidencia um comportamento instável, possivelmente associado à presença de células internas defeituosas. Em sistemas

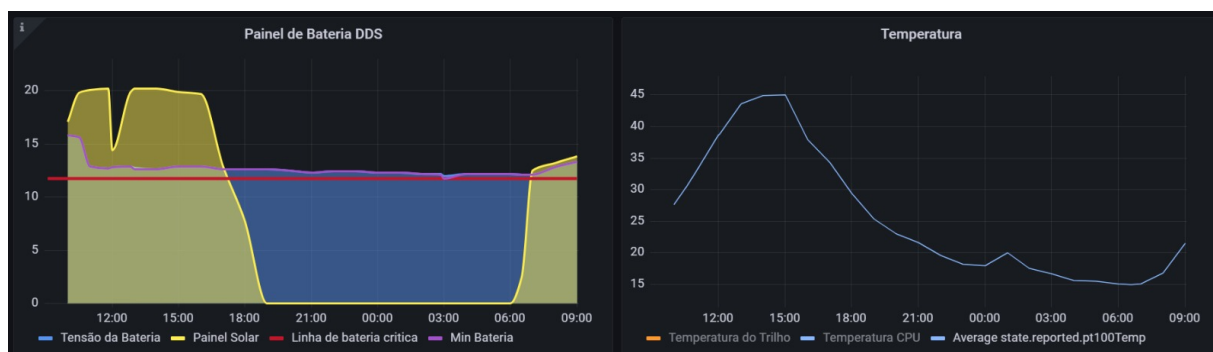
ferroviários, onde o fornecimento contínuo de energia é vital para a detecção de eventos de descarrilamento, essa instabilidade representa um risco operacional significativo.

Além disso, variações abruptas de tensão podem comprometer o funcionamento de sensores e rádios, resultando em perda de comunicação ou registros incompletos de eventos.

4.5 Relação Entre Parâmetros Elétricos e Temperatura Ambiental

A Figura 11 apresenta o painel de monitoramento do sistema de baterias, onde é possível visualizar a evolução temporal de parâmetros críticos para o desempenho do banco, tais como a tensão da bateria, a contribuição do painel solar e a temperatura ambiente. Esse painel foi construído utilizando a plataforma IoT Grafana, que permite a visualização integrada e em tempo real dos dados coletados pelos sensores, viabilizando diagnósticos mais rápidos e precisos. No gráfico da direita observa-se, especificamente, o comportamento da temperatura ao longo do período analisado, evidenciando uma tendência de queda acentuada após o horário das 15h00, atingindo valores mínimos próximos de 15°C nas primeiras horas da manhã.

Figura 11 – Dashboard de Parâmetros Elétricos e Temperatura Ambiente



Fonte: Autor (2025)

De acordo com as orientações do manual técnico das baterias Freedom® (Tabela 4), a correta manutenção da tensão específica de carga e flutuação é indispensável para assegurar a vida útil projetada e a capacidade nominal do acumulador. O documento estabelece que as tensões de equalização e flutuação devem ser ajustadas conforme a temperatura ambiente, uma vez que a resposta eletroquímica da bateria é diretamente influenciada pelas condições térmicas externas. Para temperaturas mais baixas, o manual recomenda tensões de flutuação e equalização superiores, justamente para compensar a redução da atividade eletroquímica interna, garantindo que a bateria permaneça plenamente carregada.

Tabela 4 – Tensão de carga e flutuação

Temperatura da Bateria (°C)	Tensão de Flutuação (V)	Tensão de Equalização (V)
- 9,4	14,7	16,7
- 6,7	14,6	16,6
- 1,1	14,6	16,4
- 4,4	14,2	16,2
10,0	14,0	16,0
15,6	13,9	15,9
21,2	13,7	15,7
25,0	13,5	15,5
32,2	13,3	15,3
37,8	13,1	15,1
43,3	13,0	15,0
48,9	12,8	14,8

Fonte: Adaptado de Clarios (2017)

A tabela técnica indica, por exemplo, que para uma temperatura em torno de 15,6°C, a tensão de flutuação deve ser ajustada para 13,9V e a tensão de equalização para 15,9V, valores superiores aos estabelecidos para a temperatura de referência de 25,0°C, que são de 13,5V e 15,5V, respectivamente. Este ajuste é necessário para prevenir fenômenos indesejados, como a sulfatação das placas, que ocorre quando a bateria não é mantida em estado de carga completa por longos períodos, resultando em perda progressiva de capacidade e diminuição da vida útil do sistema (Clarios, 2017).

Portanto, a queda de temperatura observada nos dados do monitoramento, sem o devido ajuste das tensões de carga e flutuação, pode comprometer o processo de carregamento, levando a um estado de carga inferior ao ideal. Isso reforça a importância da adoção de sistemas automáticos de compensação de tensão em função da temperatura, ou ao menos a realização de ajustes manuais periódicos, de modo a garantir que o regime de carga esteja sempre adequado à condição térmica prevalente. Dessa forma, é possível assegurar o pleno desempenho do banco de baterias e prolongar significativamente sua vida útil, reduzindo custos operacionais com substituições prematuras e aumentando a confiabilidade do sistema como um todo.

5 EXPANSÃO DO SISTEMA

A expansão do sistema de monitoramento proposto visa ampliar sua capacidade de diagnóstico, predição e adaptabilidade, principalmente em contextos ferroviários remotos, onde a manutenção corretiva representa altos custos e riscos operacionais. Para isso, são apresentadas estratégias que envolvem tanto a evolução física da instrumentação quanto a incorporação de tecnologias de análise inteligente de dados.

5.0.1 Inclusão de Novos Sensores

Embora o sistema atual seja capaz de monitorar variáveis essenciais como tensão, corrente e temperatura, a inserção de novos sensores pode aprimorar substancialmente a precisão e a abrangência do diagnóstico. Dentre os sensores propostos, destacam-se os sensores de umidade, que podem detectar condições ambientais que comprometem o desempenho das baterias, além de indícios de falhas de vedação em invólucros. Sensores de vibração também são recomendados, pois possibilitam a identificação de choques mecânicos ou movimentos anormais, comuns em ambientes ferroviários.

Outro elemento importante para o aprimoramento do sistema é a adição de sensores de irradiância solar. Esses dispositivos permitem correlacionar de forma direta a geração de energia pelos painéis fotovoltaicos com as condições climáticas do ambiente, possibilitando diagnósticos mais precisos sobre falhas na recarga. Já os sensores de pressão interna são indicados especialmente para baterias seladas, uma vez que alterações na pressão podem sinalizar reações eletroquímicas adversas, muitas vezes invisíveis em análises puramente elétricas.

5.0.2 Adoção de Inteligência Artificial

Paralelamente à evolução da instrumentação, a integração de algoritmos de inteligência artificial representa um avanço significativo para transformar o sistema em uma ferramenta preditiva e autônoma. Com a utilização de modelos baseados em aprendizado de máquina, é possível antecipar falhas, classificar automaticamente o estado de criticidade das baterias e ajustar, em tempo real, os parâmetros de monitoramento.

Uma das aplicações mais promissoras é o desenvolvimento de modelos preditivos de Vida Útil Restante (RUL - *Remaining Useful Life*), que estimam o tempo restante de operação com base em padrões históricos e sinais de degradação. Além disso, classificadores inteligentes podem analisar múltiplas variáveis simultaneamente para categorizar

automaticamente o estado das baterias em níveis como normal, atenção ou crítico. Complementarmente, sistemas de alerta dinâmico podem ser implementados para adaptar os limites de tolerância conforme o comportamento individual de cada unidade monitorada, melhorando a eficiência das intervenções.

Para viabilizar essas aplicações, diferentes técnicas de aprendizado de máquina podem ser adotadas, incluindo redes neurais artificiais, Máquinas de Vetores de Suporte (SVM - *Support Vectors Machine*), árvores de decisão e algoritmos de agrupamento como o K-means. A seleção do método mais adequado dependerá do volume e da qualidade dos dados disponíveis, bem como das restrições computacionais do ambiente de operação.

Essas estratégias fortalecem a aplicação do sistema em uma malha ferroviária moderna, conectada e orientada a dados, potencializando sua contribuição para a eficiência e segurança operacional.

6 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou o desenvolvimento e a aplicação de um sistema de monitoramento baseado em IoT para avaliação da vida útil de baterias em sistemas ferroviários, com ênfase em dispositivos como detectores de descarrilamento (DDC) e de quebra de trilhos (DTQ). A proposta foi fundamentada na combinação entre fundamentos teóricos, ferramentas tecnológicas e análise de dados reais, culminando na criação de painéis interativos em Grafana.

Os resultados obtidos evidenciaram a criticidade de parte significativa das baterias analisadas, especialmente durante horários com baixa irradiação solar, quando a capacidade de recarga é limitada e a demanda por energia é contínua. Por exemplo, a placa DDS identificada como 1.45AA.24E3.8B29 apresentou tensão de bateria em níveis críticos (5,383 V), indicando degradação avançada que compromete o funcionamento seguro dos dispositivos associados.

Além disso, o monitoramento permitiu identificar correlações significativas entre parâmetros elétricos — tensão, corrente e delta de tensão — e variáveis ambientais, como a temperatura ambiente, cuja queda acentuada exigiria ajustes na tensão de flutuação para evitar sulfatação e perda prematura da vida útil da bateria. A análise temporal detalhada reforçou a importância da geração solar como fator determinante para a estabilidade energética diurna e o suporte noturno dos sistemas.

A visualização em tempo real, por meio dos *dashboards* interativos, viabilizou a detecção precoce de falhas e a classificação das baterias em níveis de criticidade (“Crítico” e “Atenção”), o que abre espaço para ações de manutenção preditiva, redimensionamento de sistemas fotovoltaicos e substituição programada, minimizando riscos operacionais e custos não planejados.

O presente estudo demonstrou que sistemas baseados em IoT e visualização em tempo real são fundamentais para o gerenciamento inteligente de ativos energéticos em ambientes críticos, como o ferroviário. A abordagem adotada provou ser viável, escalável e de grande relevância para o contexto nacional, contribuindo para o aumento da confiabilidade das operações, a economia de recursos e a sustentabilidade ambiental.

Conclui-se que o uso de soluções digitais no monitoramento de baterias não apenas potencializa a eficiência do setor ferroviário, mas também aponta para uma transição necessária rumo a modelos mais preditivos, conectados e resilientes de gestão de infraestrutura. Desta forma, esta pesquisa reafirma o papel estratégico das tecnologias IoT para

a manutenção inteligente e prolongamento da vida útil das baterias em sistemas críticos de segurança ferroviária.

6.1 Trabalhos futuros

Como desdobramento futuro deste trabalho, sugere-se:

- A ampliação do sistema de monitoramento para outros ativos ferroviários sensíveis ao desempenho energético, como sistemas de sinalização, telecomunicações e controle de passagem;
- A adoção de algoritmos de aprendizado de máquina para predição automática de falhas e classificação do estado de saúde das baterias (SoH);
- A incorporação de novos sensores, como umidade, irradiância solar e vibração, para enriquecer o modelo preditivo;
- A integração com plataformas em nuvem e bancos de dados distribuídos, visando à escalabilidade do sistema para outras regiões;
- Estudos comparativos sobre diferentes tecnologias de baterias, como redox de vanádio e baterias de sódio, frente às exigências ferroviárias brasileiras.

Referências

- ALVES, E. G. d. C.; RAMOS, R. B. d. S.; SILVA, C. R. Transporte ferroviário no Brasil: Desafios e oportunidades. **Revista Conecta**, São Paulo, Brasil, v. 3, p. 15–27, 2020.
- ANGELO, C. F. d. **Os transportes rodoviários e ferroviários de carga no Brasil: uma análise comparativa**. Tese (Doutorado) — Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade, Universidade de São Paulo, 1985.
- ANTT - Agência Nacional de Transporte Terrestre. **Anuário do Setor Ferroviário**. Brasília, DF: [s.n.], 2024. <<https://www.gov.br/antt/pt-br/assuntos/ferrovias/anuario-do-setor-ferroviario>>. Acesso em: 25 maio 2025.
- Clarios. **Freedom baterias estacionárias: manual técnico**. 2017. <https://www.neosolar.com.br/media/pdf/manuais/Freedom_Baterias_Estacionarias_manual_tecnico_pt.pdf>. Acesso em: 28 jun. 2025.
- CNT - Confederação Nacional do Transporte. **Boletim unificado: junho de 2025**. Brasília, DF: [s.n.], 2025. <<https://www.cnt.org.br/>>. Acesso em: 25 maio 2025.
- COSTA, M. P. d. C. **Transporte ferroviário de cargas: desafios e oportunidades para o aumento da participação no transporte de container na região sudeste brasileira**. Dissertação (Dissertação (Mestrado em Gestão e Estratégia)) — Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica - RJ, 2017. 84 f. Instituto de Ciências Sociais Aplicadas.
- FERNANDES, N. T. D. **Estratégias de comando para o controle de carregadores modulares de baterias**. Tese (Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica)) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021. Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.
- FERREIRA, G. F. N. **Plataforma de análise e visualização de dados para sistemas IoT industriais baseada em métodos de Big Data**. Dissertação (Dissertação (Mestrado em Sistemas de Informação)) — Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, Portugal, 2020. Orientadores: Paulo Alexandre Vara Alves e Simone de Almeida.
- FICI, R. P. **O sistema ferroviário mundial: o caso brasileiro**. Tese (Tese (Doutorado em Geografia Humana)) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017. Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas.
- FRANCO, L. J. V. et al. Aparelhos waysides em ferrovias: Um estudo de caso sobre os resultados das ocorrências ferroviárias. **Revista UniFAE Business**, Brasil, 2017. FUPAC.
- GUOV, V. et al. Sizing bess and on-site renewable for battery-electric freight rail charging station. In: **2022 IEEE 13th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)**. [S.l.: s.n.], 2022. p. 1–6.

JUNIOR, E. S. d. S. Trabalho de Conclusão de Curso, **Sistemas de armazenamento de energia por baterias: histórico, aplicações e desafios**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

KIREŠOVÁ, S. et al. Grafana as a visualization tool for measurements. In: **2023 IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)**. [S.l.: s.n.], 2023. p. 1–5.

LUO, P. et al. Two-layer optimization of multi-application electrified railway energy storage system. In: **2021 24th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)**. [S.l.: s.n.], 2021. p. 2276–2281.

MATSUO, A. K. et al. Visualização de dados em tempo real de sensores iot usando realidade virtual e bim. **Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente e X Simpósio Brasileiro de Sistemas de Elétricos**, Manaus, Brasil, 2023.

NeoSolar Energia. **Bateria Estacionária Freedom DF4001 - 240Ah / 220Ah**. 2025. Acesso em: 01 jul. 2025. Disponível em: <<https://www.neosolar.com.br/loja/bateria-estacionaria-freedom-df4001-240ah-220ah.html>>.

PEREIRA, V. H. M.; JÚNIOR, V. G. **Deteção de anomalias em veículos ferroviários através de visão computacional**. 2023.

PERGHER, R. **Estimativa do Estado de Saúde de Baterias Chumbo-Ácido Seladas Aplicadas em Sistemas de Emergência de Elevadores**. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Controle e Automação)) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, RS, 2018.

RICARDO, J. L. S. **Interação de sistemas de carregamento de veículos elétricos em estações da rede ferroviária com regeneração de energia**. Dissertação (Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)) — Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2023. Departamento de Engenharia Mecânica. Orientadores: Mestre Nuno Paulo Ferreira Henriques e Doutor Gonçalo Nuno de Oliveira Duarte.

Ricci Eletrônica. **Detector de Trilho Quebrado DTQ**. 2018. <<https://www.riccieletronica.com.br/detector-de-trilho-quebrado-dtq/>>. Acesso em: 25 mai. 2025.

ROLIM, D. A. d. A. **Dashboards para desenvolvimento de aplicações e visualização de dados para plataformas de cidades inteligentes**. Dissertação (Dissertação (Mestrado em Sistemas e Computação)) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, Brasil, 2020. Orientadora: Thais Vasconcelos Batista.

ROSA, A. M. d.; VIEIRA, G. B. B. Transporte ferroviário de cargas: Estudo comparativo dos modelos existentes e proposições para o caso brasileiro. **Revista Gestão Industrial**, 2019.

SILVA, R. D. de S. E. **Novas tecnologias e infraestrutura do setor elétrico brasileiro: Armazenamento de energia em baterias**. Brasília, 2022. Disponível em: <<https://hdl.handle.net/10419/265265>>.

SOKOL, Y. et al. Improving the quality of electrical energy in the railway power supply system. In: **2018 IEEE 38th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)**. [S.l.: s.n.], 2018. p. 563–566.