UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA
ENGENHARIA ELÉTRICA - HABILITAÇÃO EM ENERGIA

Bernardo Silveira Freitas

Análise de Degradação de um Sistema de Armazenamento de Energia a Baterias para Caminhões de Mineração

Juiz de Fora
2026

Bernardo Silveira Freitas

Análise de Degradação de um Sistema de Armazenamento de Energia a Baterias para Caminhões de Mineração

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Energia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito para aprovação na disciplina - Trabalho de Final de Curso.

Orientador: Prof. Dr. Allan Fagner Cupertino

Coorientador: Prof. Dr. Guilherme Márcio Soares

Juiz de Fora

2026

Ficha catalográfica elaborada através do Modelo Latex do CDC da UFJF
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Freitas, Bernardo Silveira.
Análise de Degradação de um Sistema de Armazenamento de Energia a Baterias para Caminhões de Mineração / Bernardo Silveira Freitas. – 2026.
77 f. : il.

Orientador: Allan Fagner Cupertino
Coorientador: Guilherme Márcio Soares
Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação – Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia. Engenharia Elétrica - Habilitação em Energia, 2026.

1. Sistema de Armazenamento de Energia a Baterias. 2. Mineração, 3. Reaproveitamento Energético I. Cupertino , Allan F., orient. II. Soares,Guilherme M., coorient., III. Título.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO

GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - HABILITAÇÃO EM ENERGIA

Formato da Defesa: (X) presencial ( ) virtual ( ) híbrido

Ata da sessão (X) pública ( ) privada referente à defesa do Trabalho de Conclusão de Curso intitulado **Análise de Degradação de um Sistema de Armazenamento de Energia a Baterias para Caminhões de Mineração** , para fins de obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica - Habilitação em Energia, pelo(a) discente **Bernardo Silveira Freitas** (matrícula 202065014A), sob orientação da Prof. Dr **Allan Fagner Cupertino** e coorientação da Prof. Dr **Guilherme Márcio Soares**, na Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora.

Ao 16 dia do mês de janeiro do ano de 2026, às 15 horas e 30 minutos, na sala de vídeo conferência do Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), reuniu-se a Banca examinadora, composta pelos seguintes membros:

Titulação	Nome	Na qualidade de:
Doutorado	Allan Fagner Cupertino	Orientador
Doutorado	Guilherme Márcio Soares	Coorientador
Doutorado	Leonardo Willer de Oliveira	Membro da banca
Doutorado	Pedro Machado de Almeida	Membro da banca

AVALIAÇÃO DA BANCA EXAMINADORA

Tendo o(a) senhor(a) Presidente declarado aberta a sessão, mediante o prévio exame do referido trabalho por parte de cada membro da Banca, o(a) discente procedeu à apresentação de seu Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação e foi submetido(a) à arguição pela Banca Examinadora que, em seguida, deliberou sobre o seguinte resultado:

(X) APROVADO

( ) REPROVADO, conforme parecer circunstanciado, registrado no campo Observações desta Ata e/ou em documento anexo, elaborado pela Banca Examinadora

Nota:_____

Observações da Banca Examinadora caso haja necessidade de anotações gerais sobre o Trabalho de Conclusão de Curso e sobre a defesa, as quais a banca julgue pertinentes

Nada mais havendo a tratar, o(a) senhor(a) Presidente declarou encerrada a sessão de Defesa, sendo a presente Ata lavrada e assinada pelos(as) senhores(as) membros da Banca Examinadora e pelo(a) discente, atestando ciência do que nela consta.

INFORMAÇÕES
Para fazer jus ao título de bacharel, a versão final do Trabalho de Conclusão de curso, considerado

Aprovado, devidamente conferida pela Secretaria do Curso de Engenharia Elétrica, deverá ser tramitada para o Repositório Institucional, dentro do prazo de 72 horas da realização da banca.

Juiz de Fora, 16 de janeiro de 2026.

Assinatura digital dos membros da Banca Examinadora

Documento assinado eletronicamente por **Allan Fagner Cupertino**, **Professor(a)**, em 17/01/2026, às 08:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

Documento assinado eletronicamente por **Pedro Machado de Almeida**, **Professor(a)**, em 17/01/2026, às 09:16, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

Documento assinado eletronicamente por **Leonardo Willer de Oliveira**, **Professor(a)**, em 19/01/2026, às 08:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

Documento assinado eletronicamente por **Bernardo Silveira Freitas**, **Usuário Externo**, em 19/01/2026, às 16:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

Documento assinado eletronicamente por **Guilherme Márcio Soares**, **Professor(a)**, em 19/01/2026, às 16:51, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

A autenticidade deste documento pode ser conferida no Portal do SEI-Ufjf (www2.ufjf.br/SEI) através do ícone Conferência de Documentos, informando o código verificador **2828797** e o código CRC **8E721AE3**.

Dedico este trabalho à minha mãe, por ser a melhor referência de empenho e trabalho duro que eu poderia ter. À minha namorada, Louise, por todo o carinho e companheirismo. E aos que já partiram, mas que continuam vivos em minha memória e em meu coração.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha mãe, Mary, por ser o meu maior exemplo e o alicerce de toda a minha trajetória. Agradeço pelo apoio incondicional, pelos sacrifícios realizados em prol da minha educação e por sempre acreditar no meu potencial. Sem o seu amor e incentivo, a conclusão desta etapa da minha vida não seria possível.

À minha namorada, Louise, pelo companheirismo e pela paciência infinita demonstrados ao longo de todo este processo. Obrigado por estar ao meu lado, mesmo estando longe, por sempre ter sido minha maior fã e por ser minha fonte de equilíbrio. Sua presença tornou o peso desta jornada muito mais leve e me deu as forças necessárias para seguir em frente.

Aos meus amigos de Juiz de Fora de de Muriaé, em especial ao Augusto, Luan e Elian, pela amizade, risadas e noites de conversa.

Aos meus orientadores, Allan e Guilherme, pela orientação precisa, pela paciência e pelo conhecimento compartilhado, que foram fundamentais para o meu amadurecimento acadêmico e para o desenvolvimento desta pesquisa.

À UFJF, por possibilitar minha formação, e à FAPEMIG por financiar o projeto RED 00216/23, que deu base a esse trabalho.

“Quanto mais escura a noite, mais brilhante as estrelas.”

Braum (League of Legends)

RESUMO

A indústria de mineração enfrenta pressões crescentes para reduzir sua pegada de carbono e custos operacionais, impulsionando a eletrificação de frotas de transporte pesado. Neste contexto, a substituição de caminhões diesel-mecânicos por caminhões híbridos ou elétricos a bateria (e-OHTs) apresenta-se como uma solução promissora, viabilizada pela recuperação de energia via frenagem regenerativa em minas a céu aberto. No entanto, a viabilidade técnica e econômica desses veículos depende intrinsecamente da durabilidade do sistema de armazenamento de energia a baterias (BESS). Este trabalho tem como objetivo desenvolver, implementar e validar um modelo computacional em MATLAB/Simulink para estimar a degradação de baterias de Lítio-Ferro-Fosfato (LFP) submetidas a perfis de potência reais e sintéticos de mineração. A metodologia utiliza um circuito elétrico equivalente (CEE) acoplado a um estimador de estado de carga (SoC) por contagem de Coulomb e um modelo semi-empírico de degradação, que quantifica os danos cíclicos (baseado no algoritmo *rainflow*) e de calendário. Os resultados das simulações, realizadas sob um horizonte de 12 meses para quatro perfis de potência de operação distintos, demonstraram que o aumento da taxa de regeneração e do *throughput* energético acelera significativamente o envelhecimento da bateria, com o cenário mais severo ultrapassando 20% de perda de capacidade ao final do período. O estudo conclui que, através da validação e análise dos resultados, a modelagem proposta é eficaz para prever a vida útil do ativo, evidenciando a necessidade de dimensionamento adequado e gerenciamento térmico para garantir a operação sustentável dos e-OHTs.

Palavras-chave: sistema de armazenamento de energia a baterias; caminhões de mineração; degradação de baterias; fosfato de ferro-lítio; modelagem computacional.

ABSTRACT

The mining industry faces increasing pressures to reduce its carbon footprint and operational costs, driving the electrification of heavy-duty transport fleets. In this context, replacing diesel-mechanical trucks with hybrid or battery electric trucks (e-OHTs) presents a promising solution, enabled by energy recovery via regenerative braking in open-pit mines. However, the technical and economic viability of these vehicles depends intrinsically on the durability of the battery energy storage system (BESS). This work aims to develop, implement, and validate a computational model in MATLAB/Simulink to estimate the degradation of Lithium-Iron-Phosphate (LFP) batteries subjected to real and synthetic mining power profiles. The methodology utilizes an equivalent electrical circuit coupled with a Coulomb counting state of charge (SoC) estimator and a semi-empirical degradation model, which quantifies cyclic damage (based on the Rainflow algorithm) and calendar aging. The simulation results, performed over a 12-month horizon for four distinct profiles, demonstrated that increasing the regeneration rate and energy throughput significantly accelerates battery aging, with the most severe scenario exceeding 20% capacity loss by the end of the period. The study concludes that the proposed modeling is effective for predicting the asset's useful life, highlighting the need for proper sizing and thermal management to ensure the sustainable operation of e-OHTs.

Keywords: battery energy storage system; mining trucks; battery degradation; lithium iron phosphate; computational modeling.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Distribuição típica dos custos operacionais em uma mina a céu aberto. 14
Figura 2 – Diagrama de blocos do sistema de potência do caminhão: (a) Topologia original; (b) Topologia proposta. 22
Figura 3 – Modelo de CEE adotado. 34
Figura 4 – (a) Perfil de potência utilizado e (b) Perfil de tensão utilizado. 36
Figura 5 – Esquema genérico simplificado do banco de baterias proposto. 37
Figura 6 – Organização do modelo de simulação. 38
Figura 7 – Diagrama de blocos da lógica utilizada no Estimador de SoC com Integrador Saturado. 40
Figura 8 – Fluxograma detalhado do módulo de degradação com variáveis de saída. 42
Figura 9 – Representação do ciclo adotado para o perfil sintético. 45
Figura 10 – Resultados do perfil gerados sinteticamente: (a) perfil de potência, (b) dinâmica de velocidade e aceleração do veículo, (c) dinâmica de massa do veículo , (d) perfil vertical e topologia, (e) balanço energético acumulado e bruto. 48
Figura 11 – Perfil de potência quadrado para validação do Estimador de SOC. . . . 50
Figura 12 – Comparação de perfil de SOC. 51
Figura 13 – Perfil de SOC triangular para validação da degradação cíclica. 52
Figura 14 – Perfil de SOC quadrado para validação da degradação por calendário. . 53
Figura 15 – Potência (a) e tensão (b) experimentais do perfil 1. 56
Figura 16 – Potência (a) e tensão (b) experimentais do perfil 2. 56
Figura 17 – Potência (a) e tensão (b) experimentais do perfil 3. 57
Figura 18 – Potência sintética perfil 4. 57
Figura 19 – Energias líquidas experimentais: (a) Perfil 1, (b) Perfil 2, (c) Perfil 3 e sintética (d) Perfil 4. 58
Figura 20 – Resultados para o perfil de potência experimental 1: (a) Corrente, (b) Tensão, (c) SOC e (d) Energia regenerada por ciclo mensal. 60
Figura 21 – Resultados para o perfil de potência experimental 2: (a) Corrente, (b) Tensão, (c) SOC e (d) Energia regenerada por ciclo mensal. 61
Figura 22 – Resultados para o perfil de potência experimental 3: (a) Corrente, (b) Tensão, (c) SOC e (d) Energia regenerada por ciclo mensal. 62
Figura 23 – Resultados para o perfil de potência sintético 4: (a) Corrente, (b) Tensão, (c) SOC e (d) Energia regenerada por ciclo mensal. 63
Figura 24 – Comparativo da degradação do BESS para os perfis de potência: (a) Degradação de calendário, (b) Degradação cíclica e (c) Degradação total acumulada. 65
Figura 25 – Evolução normalizada dos parâmetros do modelo CEE: (a) R1, (b) R2, (c) Q1, (d) Q2 e (e) Rs. 66

Figura 26 – Resultados para o perfil 2 com $C_{rate} = 2$: (a) Evolução mensal da degradação de capacidade e (b) Energia absorvida mensalmente. 68
Figura 27 – Resultados para o perfil 2 com $T = 50^{o}$C: (a) Evolução mensal da degradação de capacidade e (b) Energia absorvida mensalmente. 69

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BESS	*Battery Energy Storage System*
BEV	*Battery Electric Vehicle*
BMS	*Battery Management System*
CEE	Circuito Elétrico Equivalente
DoD	*Depth of Discharge*
EKF	*Extended Kalman Filter*
EOL	*End-of-Life*
ESG	*Environmental, Social, and Governance*
EV	*Electric Vehicle*
GEE	Gases de Efeito Estufa
HEV	*Hybrid Electric Vehicle*
ICE	*Internal Combustion Engine*
LCOS	*Levelized Cost of Storage*
LFP	*Lithium Iron Phosphate*
NCA	*Nickel-Cobalt-Aluminum*
NMC	*Nickel-Manganese-Cobalt*
OCV	*Open Circuit Voltage*
OHT	*Off-Highway Truck*
OPEX	*Operating Expenditure*
P2D	*Pseudo-Two-Dimensional*
PDE	*Partial Differential Equations*
ROI	*Return on Investment*
SEI	*Solid Electrolyte Interphase*
SOC	*State of Charge*
SOH	*State of Health*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 14
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E MOTIVAÇÃO 14
1.2 OBJETIVOS 15
1.2.1 OBJETIVO GERAL 15
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 16
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO 16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 18
2.1 TRABALHOS CORRELATOS 18
2.1.1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS DA DEGRADAÇÃO E ABORDAGENS DE MODELAGEM 18
2.1.2 INDÚSTRIA AUTOMOTIVA: VEÍCULOS ELÉTRICOS LEVES . . . 19
2.1.3 SISTEMAS ESTACIONÁRIOS DE ARMAZENAMENTO 20
2.2 ARQUITETURA DOS CAMINHÕES ELETRO-DIESEL E OPORTUNIDADES 21
2.3 BATERIAS EM APLICAÇÕES PESADAS 22
2.3.1 QUÍMICAS RELEVANTES E JUSTIFICATIVA DO USO DE LFP . . 23
2.3.2 MÉTRICAS OPERACIONAIS 24
2.4 ESTIMATIVA DE SOC: CONTADOR DE COULOMB 25
2.5 MODELOS DE DEGRADAÇÃO 27
2.5.1 COMPONENTES DE ENVELHECIMENTO 27
2.6 INDICADORES DE DEGRADAÇÃO 29
2.6.1 CURVA DE DEGRADAÇÃO DA CAPACIDADE 29
2.6.2 AUMENTO DA IMPEDÂNCIA INTERNA 29
2.6.3 CRITÉRIOS DE FIM DE VIDA 31
2.7 CONSIDERAÇÕES PARCIAIS 32
3 DESENVOLVIMENTO 33
3.1 MODELO DO BESS 33
3.1.1 CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE - ZARC 33
3.1.2 PARAMETROS ELÉTRICOS E LIMITES OPERACIONAIS 35
3.2 VISÃO GERAL DO AMBIENTE DE SIMULAÇÃO 38
3.2.1 ESTIMADOR DE SOC 39
3.2.2 MÓDULO DE DEGRADAÇÃO 41
3.3 ENTRADA DA SIMULAÇÃO: PERFIL DE POTÊNCIA DA MINA . . 43
3.3.1 PERFIS REAIS 44
3.3.2 GERADOR DE PERFIS SINTÉTICOS PROPOSTO 44
3.4 ESTUDO DE CASO PARA VALIDAÇÃO BÁSICA DO MODELO . . 49
3.4.1 VALIDAÇÃO DO SUBSISTEMA ESTIMADOR DE SOC 49

3.4.2 VALIDAÇÃO DO SUBSISTEMA ESTIMADOR DE DEGRADAÇÃO . 51
3.5 CONSIDERAÇÕES PARCIAIS 53
4 RESULTADOS 55
4.1 ANÁLISE DAS VARIÁVEIS ELÉTRICAS DO SISTEMA 58
4.2 ANÁLISE DE DEGRADAÇÃO DAS BATERIAS 63
4.3 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE 67
5 CONCLUSÕES 70
5.1 TRABALHOS FUTUROS 71
REFERÊNCIAS 73

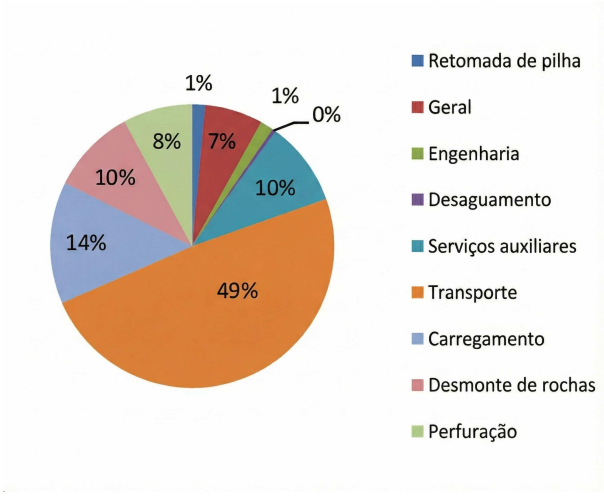
1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E MOTIVAÇÃO

O setor de mineração a céu aberto (*open-pit mining*) contribui com grande parte de diversas economias globais, fornecendo os insumos minerais para o desenvolvimento industrial, tecnológico e de infraestrutura. No entanto, este setor opera sob uma dualidade de pressões cada vez mais intensas: a necessidade de manter a competitividade econômica em um mercado de *commodities* volátil e a urgência regulatória e social para mitigar seu impacto ambiental [1]. O processo de extração e movimentação de materiais é inerentemente intensivo em energia, e a dependência de combustíveis fósseis coloca a mineração no centro dos debates sobre descarbonização industrial [2].

Neste contexto, os custos operacionais (OPEX - *Operating Expenditure*) associados ao carregamento e transporte (*load and haul*) de materiais são consistentemente identificados como os componentes mais onerosos na estrutura de custos de uma mina [3]. Estudos sobre a cadeia de valor da mineração indicam que o transporte pode representar entre 40% e 60% dos custos operacionais totais de uma lavra, variando conforme a profundidade da cava e a distância até o processamento ou depósitos de estéril [4]. A Figura 1 apresenta a distribuição de custos de operação típica em uma mina à céu aberto. Esta operação é realizada majoritariamente por frotas de caminhões fora de estrada (OHTs - *Off-Highway Trucks*), com capacidades de carga que frequentemente excedem 200 ou 300 toneladas [5]. Tradicionalmente impulsionados por motores a diesel de alta potência, estes veículos não são apenas os maiores centros de custo variável, mas também os principais emissores de gases de efeito estufa (GEE) e material particulado na operação móvel.

Figura 1 – Distribuição típica dos custos operacionais em uma mina a céu aberto.



Fonte: Adaptado de [4].

Os OHTs operam sob uma arquitetura de propulsão diesel-elétrica. Neste arranjo,

o motor de combustão interna (ICE) está conectado a um gerador, que por sua vez, alimenta os motores elétricos de tração [6]. Aproveitando-se dessa topologia de *powertrain* já existente, a transição para caminhões de mineração puramente elétricos a bateria (BEV - *Battery Electric Vehicles*) e híbridos-elétricos (HEV) representa uma estratégia promissora para mitigar o impacto ambiental e financeiro da operação.

A natureza elétrica do sistema de tração destes veículos facilita a implementação de estratégias de eficiência energética, em particular a frenagem regenerativa. Em ciclos de transporte com perfis de elevação favoráveis (especificamente em rampas descendentes com o caminhão carregado) os motores elétricos de tração invertem sua operação, atuando como geradores para controlar a velocidade do veículo [7]. Diferentemente dos sistemas convencionais, onde a energia cinética e potencial gravitacional seria dissipada na forma de calor em bancos de resistores (frenagem dinâmica), nos BEVs e HEVs essa energia é capturada e direcionada para os sistemas de armazenamento de energia em baterias (BESS). Essa funcionalidade reduz drasticamente o consumo líquido de energia, alinhando-se às metas de descarbonização (ESG) e otimizando o OPEX da mina.

A magnitude do potencial energético passível de recuperação torna esta abordagem crítica para a eficiência da mina. Em operações típicas com caminhões de grande porte, a potência de frenagem dissipada pode atingir picos na ordem de megawatts durante a descida de rampas carregadas, valores frequentemente superiores à própria potência nominal de tração do veículo em subida [8]. Estudos complementares corroboram que o reaproveitamento dessa energia, que atualmente é apenas rejeitada para a atmosfera na forma de calor, pode reduzir o consumo de combustível fóssil em percentuais significativos, variando entre 15% e 35% dependendo do ciclo de trabalho e da profundidade da mina [7].

No entanto, a plena viabilidade técnico-econômica dessa tecnologia é diretamente ditada pela durabilidade e desempenho dos BESS ao longo de sua vida útil. O problema reside na incerteza acerca da degradação das baterias sob os perfis de potência irregulares e de alta demanda associados às operações reais de mineração [9], [10]. A imprecisão na previsão dessa degradação, em particular do impacto dos ciclos de frenagem regenerativa ao longo de sua vida útil, representa o fator de maior risco, ameaçando a viabilidade de longo prazo e o retorno do investimento em frotas de e-OHTs [11].

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho é desenvolver, implementar e validar um modelo de simulação computacional, capaz de estimar a degradação do BESS sob as condições operacionais reais de minas a céu aberto. O modelo visa quantificar o envelhecimento da bateria através da análise de perfis de missão, permitindo a previsão do estado de saúde

(SOH) ao longo do tempo.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos do trabalho delineiam um plano de pesquisa focado na modelagem e análise da degradação de BESS em caminhões de mineração híbrido-elétricos:

1. Implementação em ambiente computacional: Implementar, no ambiente MATLAB/-Simulink, um modelo computacional modular que articule as etapas de processamento de dados e simulação dinâmica. Este modelo deve ser flexível para aceitar como entrada perfis de potência de mina (reais ou sintéticos) e parâmetros críticos do sistema, e para processar os fluxos de energia, gerando como saída indicadores de degradação.

2. Verificação e validação física: Atestar a aderência do modelo frente à fundamentação teórica por meio da análise de resultados intermediários, abrangendo especificamente a validação da dinâmica do SOC (via método de contagem de Coulomb) e a verificação do modelo de degradação implementado.

3. Geração de cenários operacionais: Criar um gerador de perfis de potência sintéticos, parametrizado com as características operacionais típicas de minas a céu aberto (geometria da rampa, coeficiente de resistência ao rolamento, massa do veículo carregado e vazio), com base em dados da literatura especializada. Isso permitirá a simulação de diversos cenários de missão (ex: mina profunda vs. mina rasa) para avaliar o impacto na bateria.

4. Análise de sensibilidade da degradação: Realizar uma análise de sensibilidade abrangente do modelo de degradação implementado. Esta análise visa quantificar a influência de parâmetros de estresse cruciais, como a profundidade de descarga (DoD), a taxa de descarga (C_{rate}) e a temperatura operacional, sobre a taxa de perda de capacidade.

5. Discussão de implicações práticas: Discutir as implicações diretas dos resultados obtidos.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O Capítulo 2 estabelece a revisão bibliográfica e fundamentação teórica, alicerçando o estudo no estado da arte da tecnologia de baterias e eletrificação de veículos pesados. Inicialmente, discutem-se trabalhos correlatos identificando forças e fraquezas dos diversos tipos de modelos de degradação. A seção aprofunda-se na arquitetura dos caminhões eletro-diesel, destacando as oportunidades de recuperação de energia via frenagem regenerativa.

Subsequentemente, justifica-se a seleção da química Lítio-Ferro-Fosfato (LFP) frente a outras tecnologias, baseando-se em critérios de segurança térmica e ciclo de vida. O capítulo culmina com a definição das métricas operacionais (SOC, DoD, SOH) e a apresentação das equações empíricas que regem os modelos de degradação cíclica e de calendário adotados.

O Capítulo 3 detalha o desenvolvimento da metodologia e a arquitetura do ambiente de simulação implementado em MATLAB/Simulink. Este capítulo descreve a modelagem do BESS através de circuitos elétricos equivalentes (modelo ZARC), parametrizando as impedâncias e a tensão de circuito aberto. São apresentados os subsistemas Estimador de SOC, fundamentado na técnica de contagem de coulomb, e o substistema Estimador de Degradação, que integra o algoritmo *Rainflow* para a decomposição dos ciclos de carga. O capítulo encerra-se com a validação unitária dos blocos de simulação.

O Capítulo 4 é dedicado à apresentação e discussão dos resultados. Nesta etapa, a eficácia do modelo é avaliada, sob diferentes perfis de operação, através de métricas intermediárias, como a excursão do SOC a variação de energia regenerada ao longo do horizonte de simulação. A análise central foca na quantificação da degradação de capacidade ao longo do horizonte de planejamento. Adicionalmente, realiza-se uma análise de sensibilidade para investigar o impacto de variáveis estocásticas, como a temperatura e a taxa de descarga, na vida útil remanescente do ativo.

Por fim, o Capítulo 5 apresenta as conclusões, sintetizando as descobertas técnicas, discutindo as limitações do modelo proposto e sugerindo diretrizes para pesquisas futuras visando o aprimoramento da gestão de ativos em frotas elétricas de mineração

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 TRABALHOS CORRELATOS

A análise da viabilidade técnica e econômica da eletrificação de frotas de mineração, especificamente através da introdução de caminhões fora de estrada hibrido-elétricos a bateria (e-OHTs), exige uma compreensão profunda dos fenômenos de degradação que regem a vida útil dos BESS. A literatura científica e técnica contemporânea oferece um vasto corpo de conhecimento sobre o envelhecimento de baterias de íon-lítio, disperso em vários setores principais de aplicação que, embora cada um desses setores possua perfis operacionais distintos, a física da degradação eletroquímica permanece constante, permitindo a transposição de metodologias de modelagem para o contexto da mineração.

Esta seção realiza uma revisão do estado da arte, categorizando as abordagens de modelagem de degradação e analisando como estas têm sido aplicadas para prever o desempenho de longo prazo sob diferentes regimes de estresse.

2.1.1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS DA DEGRADAÇÃO E ABORDAGENS DE MODELAGEM

Antes de examinar as aplicações setoriais, é importante estabelecer as bases teóricas que diferenciam as classes de modelos disponíveis na literatura. A degradação de baterias de íon-lítio é um processo multifísico e multiescalar, envolvendo mecanismos como o crescimento da camada de interfase de eletrólito sólido (SEI), deposição de lítio metálico (*plating*), perda de material ativo e fratura de partículas devido ao estresse mecânico [12]. A captura desses fenômenos em ambiente de simulação divide-se fundamentalmente em duas categorias: modelos baseados na física (eletroquímicos) e modelos empíricos ou de circuito equivalente.

Os modelos eletroquímicos, frequentemente referidos como *physics-based models*, representam o padrão para a compreensão detalhada dos processos internos da célula. O modelo mais proeminente nesta categoria é o modelo Pseudo-Bidimensional (P2D), baseado na teoria de Doyle-Fuller-Newman (DFN) [13]. Este modelo utiliza um conjunto acoplado de equações diferenciais parciais (PDEs) e equações algébricas não lineares para descrever a cinética de reação, o transporte de íons no eletrólito e a difusão de estado sólido nas partículas ativas dos eletrodos. A literatura destaca que a principal vantagem dos modelos P2D/DFN é a sua capacidade de prever estados internos não mensuráveis, como o potencial local do anodo (crucial para prever *lithium plating*) e a concentração de lítio nas interfaces [14].

No entanto, a complexidade computacional inerente aos modelos P2D é uma barreira significativa para a simulação de sistemas em nível de veículo ou frota. A resolução das PDEs requer métodos numéricos intensivos, tornando-os inadequados para otimização

de longo prazo ou implementação em microcontroladores de sistemas de gerenciamento de bateria (BMS) industriais [15]. Além disso, a parametrização desses modelos exige a determinação de dezenas de propriedades físico-químicas (como tortuosidade, porosidade, coeficientes de difusão), muitas das quais só podem ser obtidas através de testes destrutivos ou não são fornecidas pelos fabricantes de células comerciais.

Em contraste com a complexidade dos modelos físicos, que se fundamentam na análise de grandezas microscópicas como a concentração de espécies químicas, os modelos empíricos e semi-empíricos adotam uma abordagem fenomenológica centrada em variáveis macroscópicas. Eles descrevem o comportamento da bateria correlacionando grandezas operacionais mensuráveis externamente (corrente, tensão, temperatura) com métricas de desempenho globais (capacidade e impedâncias internas), utilizando funções matemáticas ou circuitos elétricos equivalentes.

A estrutura típica de um modelo semi-empírico de degradação envolve a decomposição do envelhecimento em dois componentes aditivos: degradação de calendário (*calendar aging*) e degradação cíclica (cycle aging) [16]. A degradação de calendário é modelada como uma função do tempo, temperatura e estado de carga (SOC), capturando as reações parasitas que ocorrem mesmo quando a bateria está em repouso. A degradação cíclica é atrelada ao fluxo de energia (*throughput*), modulada por fatores de estresse como a taxa de corrente C_{rate} e a profundidade de descarga (DoD).

A revisão de estudos comparativos indica que, para aplicações de dimensionamento de sistemas e análise econômica, os modelos semi-empíricos oferecem o melhor equilíbrio entre precisão e eficiência. Eles são capazes de executar simulações de vida útil completa (equivalente a 10-15 anos de operação) em questão de segundos, permitindo análises de sensibilidade estocástica e otimização de Monte Carlo que seriam inviáveis com modelos P2D. A precisão desses modelos, quando calibrados dentro de seu envelope operacional, é frequentemente reportada na faixa de erro de 1% a 5% para a estimativa de capacidade, o que é considerado suficiente para estudos de viabilidade tecno-econômica [17].

Além disso, a literatura enfatiza a interpretabilidade desses modelos. Através deles é possível trabalhar diretamente com o aumento da impedância interna (Z_i) e a perda de capacidade (C_f), variáveis que impactam diretamente a autonomia do veículo e a capacidade de potência do *powertrain*.

2.1.2 INDÚSTRIA AUTOMOTIVA: VEÍCULOS ELÉTRICOS LEVES

O setor de veículos elétricos leves é um dos mais maduro em termos de pesquisa aplicada sobre degradação de baterias, fornecendo uma base de dados extensa sobre o comportamento de químicas como NMC (Níquel-Manganês-Cobalto) e LFP (Lítio-Ferro-Fosfato) em ciclos de condução rodoviária.

Estudos focados em EVs demonstram que o perfil de condução (*drive cycle*) é um

determinante crítico da vida útil. Pesquisas comparando ciclos padronizado com dados reais de condução revelam que a variabilidade estocástica do mundo real (acelerações bruscas, frenagens regenerativas agressivas e variações térmicas) tende a acelerar a degradação em comparação aos testes de laboratório controlados [18]. Isso valida a necessidade de utilizar perfis de potência que capturem a agressividade da operação de mineração, ao invés de médias suavizadas.

A literatura de EVs também destaca a busca por uma autonomia maior como um motor para estudos de perda de capacidade energética. No entanto, para aplicações de alta performance, a degradação de potência, causada pelo aumento da resistência interna, é igualmente crítica. Essa degradação é acelerada por condições severas de operação, como altas correntes e temperatura, fato que foi corroborado em análises de células LG Chem E63 (NMC), onde demonstrou-se que a temperatura e o C_{rate} são os vetores mais influentes no envelhecimento, permitindo que modelos semi-empíricos atinjam um erro quadrático médio (*Root Mean Square Error*) de 1,12% na previsão de perda de capacidade [19].

Uma lição fundamental dos estudos em EVs é a predominância da degradação calendárica em veículos que passam a maior parte do tempo estacionados. Análises de dados de campo sugerem que, para perfis de uso típicos, a degradação calendárica pode responder por uma parcela substancial da perda total de saúde (SoH), especialmente se o veículo for mantido em SOC elevado (acima de 80-90%) em ambientes quentes [20]. Isso tem implicações diretas para a mineração: embora os caminhões operem intensamente, períodos de manutenção ou filas de espera, se mal gerenciados termicamente ou em SOC inadequado, podem consumir a vida útil da bateria.

2.1.3 SISTEMAS ESTACIONÁRIOS DE ARMAZENAMENTO

A literatura sobre sistemas de armazenamento de energia em baterias (BESS) estacionários oferecem informações valiosas sobre o gerenciamento econômico da degradação e o impacto de perfis de carga irregulares, como os encontrados em microrredes e integração de renováveis.

Estudos de revisão em BESS para microrredes alertam para o perigo de simplificações excessivas, como assumir que o custo de degradação é zero ou linearmente proporcional à energia processada [21]. A degradação é inerentemente não-linear, sendo agravada por ciclos profundos (alto DoD) e operação em extremos de SOC. Modelos desenvolvidos para otimização econômica de BESS demonstram que negligenciar a não-linearidade do DoD pode levar a erros grosseiros no cálculo do custo nivelado de armazenamento (LCOS) e na estratégia de despacho [22].

Para capturar essa complexidade em modelos simplificados, a técnica de contagem de ciclos *Rainflow* tornou-se o padrão da indústria. Este algoritmo permite decompor perfis de carga complexos e aleatórios em uma série de ciclos simples, cada um com uma

profundidade e SOC médio definidos, aos quais são aplicadas funções de dano específicas [23].

A análise comparativa de tecnologias para BESS estacionários favorece fortemente a química LFP devido ao seu custo decrescente, segurança térmica superior e longa vida cíclica (frequentemente >3000 ciclos a 100% DoD). Estudos tecno-econômicos mostram que, embora baterias NMC possuam maior densidade energética, a LFP oferece um LCOS menor para aplicações de longa duração e alta frequência de ciclagem [24], características análogas à operação intensiva de uma mina [25]. Além disso, a robustez da LFP contra eventos de fuga térmica (*thermal runaway*) é um fator decisivo para instalações industriais, onde a segurança é prioritária [26].

2.2 ARQUITETURA DOS CAMINHÕES ELETRO-DIESEL E OPORTUNIDADES

A arquitetura dos caminhões fora de estrada eletro-diesel difere significativamente dos veículos diesel-mecânicos tradicionais, operando com um sistema de propulsão serial, como evidenciado na Figura 2 (a). Em uma visão de alto nível da cadeia de potência, o componente primário é o motor diesel (Motor de Combustão Interna - MCI), que não aciona diretamente as rodas. Em vez disso, ele é acoplado a um gerador principal, formando um conjunto moto-gerador. Este gerador converte a energia mecânica do MCI em energia elétrica trifásica, que por sua vez é enviada a um retificador, que a transforma em corrente contínua (c.c.) de alta tensão, alimentando um barramento c.c.. Este barramento c.c. atua como o centro de distribuição de energia do veículo. Do barramento, a energia é direcionada aos motores elétricos de tração (geralmente localizados nos cubos das rodas traseiras ou eixos), que efetivamente fornecem o torque necessário para o movimento do caminhão [6].

A questão do gerenciamento de energia em caminhões convencionais é resolvida pela grade resistiva (*Dynamic Braking Resistor Grid*). Em operações tradicionais de descida, especialmente quando o caminhão está carregado, os motores de tração operam como geradores (frenagem dinâmica). A energia elétrica gerada para frenar o veículo é dissipada como calor através desta grade de resistores de alta potência e ventilada para a atmosfera. Embora esse processo represente um desperdício da energia potencial gravitacional convertida, a frenagem dinâmica é um recurso indispensável para a segurança e viabilidade operacional na mineração. Ela assume a maior parte do esforço de frenagem, preservando os freios mecânicos, que sofreriam um desgaste maior ao dissipar a carga térmica gerada em longas descidas sem o uso da frenagem dinâmica. Portanto, a dissipação na grade resistiva, ainda que energeticamente ineficiente, é crucial para garantir a controlabilidade do veículo e reduzir os custos de manutenção dos componentes de atrito [27].

A introdução da tecnologia de eletrificação e, mais especificamente, dos caminhões fora de estrada elétricos ou híbridos a bateria (e-OHTs) é definida pela conexão do

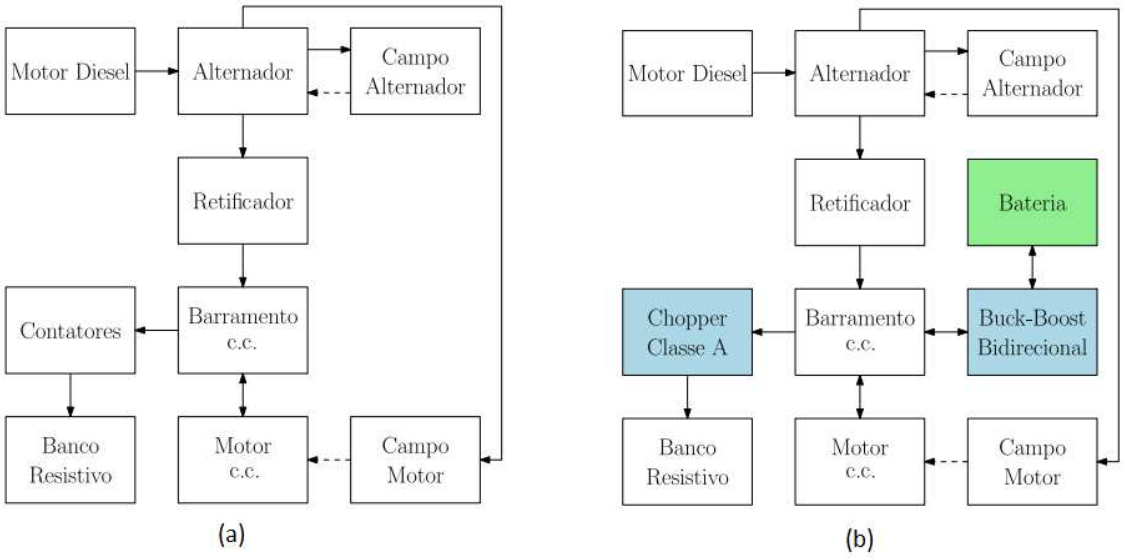
BESS diretamente ao barramento c.c. de alta tensão, frequentemente através de um conversor c.c/c.c. bidirecional (*Buck-Boost*) para adequação dos níveis de tensão [28]. Em sistemas de tração de grande porte, topologias multifásicas bidirecionais são frequentemente empregadas para gerenciar as elevadas correntes de carga e descarga, mitigando a ondulação de corrente e aumentando a eficiência global do sistema de propulsão [29].

Essa conexão, apresentada na Figura 2 (b), é o que habilita o reaproveitamento energético.

Durante a frenagem regenerativa, a energia cinética e potencial do caminhão em descida é convertida pelos motores de tração em energia elétrica e, ao invés de ser desviada para a grade resistiva, é priorizada para o carregamento do BESS. A grade resistiva permanece no sistema apenas para dissipar a energia excedente quando o BESS atinge seu estado de carga máximo (SOC_{max}) ou em situações de falha, garantindo a segurança da frenagem. A integração do BESS permite que ele atue absorvendo a energia que seria desperdiçada e fornecendo-a posteriormente para auxiliar na tração durante a subida, reduzindo a demanda sobre o gerador diesel. [7].

O princípio da frenagem regenerativa é amplamente documentado em diversas aplicações de tração elétrica, desde veículos leves até sistemas de levitação magnética [30] .

Figura 2 – Diagrama de blocos do sistema de potência do caminhão: (a) Topologia original; (b) Topologia proposta.



Fonte: Adaptado de [8].

2.3 BATERIAS EM APLICAÇÕES PESADAS

A seleção da química de bateria é um fator determinante para a viabilidade e o desempenho do BESS em aplicações pesadas, como os e-OHTs. As baterias de íons de

lítio dominam o mercado e as principais químicas consideradas para veículos elétricos incluem Níquel-Manganês-Cobalto (NMC), Níquel-Cobalto-Alumínio (NCA) e Fosfato de Ferro-Lítio (LFP - *Lithium Iron Phosphate*).

2.3.1 QUÍMICAS RELEVANTES E JUSTIFICATIVA DO USO DE LFP

A tabela 1 mostra uma comparação qualitativa dessas químicas, focada nos requisitos de mineração, revela as seguintes características:

Tabela 1 – Comparativo Técnico: Químicas de Bateria para Aplicações em e-OHTs

Característica	**NMC/NCA (Níquel-Manganês-Cobalto)**	**LFP (Fosfato de Ferro-Lítio)**
Energia Específica	Alta ($150 - 250\,\text{Wh/kg}$). Favorece longo alcance e menor peso morto no chassi.	Média/Baixa ($90 - 160\,\text{Wh/kg}$). Penalidade de massa, exigindo pacotes maiores para a mesma autonomia.
Densidade de Potência	Alta. Excelente resposta dinâmica a picos de potência (arranque em rampa).	Alta. Capaz de suportar altas taxas de descarga/carga (C_{rates} elevados) sem degradação severa.
Segurança Térmica	Moderada. Risco de *thermal runaway* a $\sim 210°\text{C}$ com liberação de oxigênio (difícil extinção).	Superior. Estrutura olivina robusta, estável até $> 270°\text{C}$. Menor risco de propagação de incêndio em minas.
Vida Útil (Ciclos)	Boa ($1.000 - 3.000$ ciclos). Sensível a altas temperaturas e descargas profundas (DoD).	Superior ($4.000 - 10.000+$ ciclos). Excelente durabilidade em regimes intensos de carga/descarga.
Custo (USD/kWh)	Moderado/Alto. Dependente de preços voláteis de *commodities* (Níquel/Cobalto).	Baixo. Materiais abundantes (Ferro, Fosfato) e cadeia de suprimento mais estável e ética.

Fonte: Adaptado de [31], [32], [33] e [34].

A escolha da química LFP para o setor de mineração é justificada por sua adequação aos eixos de prioridade dessa aplicação:

- Segurança funcional superior: O ambiente de mineração impõe condições operacionais severas, incluindo vibração mecânica e a ocorrência de picos de corrente. A LFP possui uma estrutura cristalina de olivina com fortes ligações covalentes P-O, o que confere maior estabilidade química e uma temperatura de fuga térmica (*thermal*

runaway) significativamente mais alta (>270°C) em comparação com os óxidos lamelares de NMC (210°C). Além disso, a LFP não libera oxigênio durante a decomposição térmica, minimizando drasticamente o risco de incêndios, um requisito de segurança em operações de mina.

- Vida útil e durabilidade de ciclos: Os caminhões de mineração operam em ciclos de trabalho de alta demanda, nos quais os BESS são submetidos a ciclos de carregamento e descarregamento rápidos e irregulares. A química LFP é reconhecida por sua durabilidade excepcional, suportando frequentemente mais de 4.000 a 10.000 ciclos antes de atingir 80% da capacidade inicial, enquanto baterias NMC tendem a degradar mais rapidamente sob regimes de ciclos profundos e frequentes. Isso é crucial para garantir o retorno sobre o investimento (ROI) de longo prazo, reduzindo a frequência de substituição do pack.

- Custo e sustentabilidade: A LFP utiliza materiais mais abundantes, não tóxicos e menos custosos (ferro e fosfato) em comparação com o níquel e o cobalto (usados nas NMC), resultando em um custo por quilowatt-hora (kWh) inferior e menor exposição a conflitos éticos na cadeia de suprimentos de cobalto. Embora a menor energia específica da LFP resulte em baterias mais pesadas, em caminhões de mineração de centenas de toneladas, a penalidade de peso é menos crítica do que os requisitos de robustez, segurança e custo.

A predominância de critérios como segurança e vida útil em detrimento da densidade energética máxima reflete-se diretamente nas soluções comerciais e projetos piloto emergentes no setor. Players globais de infraestrutura elétrica, como a ABB, têm desenvolvido portfólios dedicados à eletrificação de minas, focando em sistemas de carregamento de alta potência que demandam baterias com a estabilidade térmica e capacidade de C_{rate} típicas da química LFP. A convergência dessas iniciativas industriais para especificações que priorizam a robustez operacional ratifica a escolha da tecnologia LFP como a candidata mais promissora para a viabilização econômica e técnica dos e-OHTs [35] [36].

2.3.2 MÉTRICAS OPERACIONAIS

A gestão e a previsão da vida útil dos BESS dependem da monitoração e controle de métricas operacionais que influenciam diretamente a degradação e a segurança. As principais métricas definidas para este estudo são:

1. Estado de carga (*State of Charge - SOC*):

   Representa a carga remanescente na bateria em um determinado momento e é expressa como uma porcentagem da sua capacidade total (0% a 100%) [37].
   Operar a bateria em *SOC* extremos (muito baixo ou muito alto) acelera o estresse

da química interna. Portanto, os sistemas de gerenciamento de bateria (BMS) impõem limites de operação (SOC_{min} e SOC_{max}), definindo uma janela de SOC para otimizar a vida útil, geralmente mantendo-o na faixa média (20% a 80%) [38], [39].

2. Profundidade de descarga (*Depth of Discharge* - DoD):

   É o complemento do SOC, indicando a percentagem da capacidade total que foi descarregada em um ciclo específico ($DoD = 100\% - SOC$). O DoD é um dos parâmetros de estresse críticos na degradação cíclica, quanto maior o DoD (ciclos profundos), maior o estresse mecânico causado pela expansão e contração volumétrica dos materiais ativos, resultando em degradação acelerada [40].

3. Estado de saúde (*State of Health* - SoH):

   É o indicador da condição atual da bateria em relação à sua condição ideal (nova). É geralmente expresso como a porcentagem da capacidade máxima utilizável remanescente ($C_{atual}/C_{nominal}$) ou pelo aumento relativo da resistência interna [31]. O SoH é a métrica de saída final dos modelos de degradação, resumindo o impacto acumulado dos fatores de estresse (SOC extremo, alto DoD, alto C-rate e temperatura). Uma bateria é tipicamente considerada ao fim de sua vida útil (EOL - *End-of-Life*) quando seu SoH atinge 80% da capacidade inicial [41].

4. Taxa de descarga (*Current Rate* - C_{rate})

   Mede a velocidade de carregamento ou descarregamento da bateria em relação à sua capacidade nominal (C). Uma taxa de 1C significa que a bateria está sendo carregada ou descarregada em um tempo de uma hora; 2C em meia hora, etc [31]. As operações de mineração são caracterizadas por alta dinâmica, que pode impor picos de corrente de carregamento muito altos (alto C_{rate}) [32]. Um C_{rate} elevado aumenta a polarização, gera calor excessivo por efeito Joule e acelera a degradação, principalmente devido à passivação do ânodo e ao crescimento da camada SEI [40].

2.4 ESTIMATIVA DE SOC: CONTADOR DE COULOMB

A precisão na estimativa do SOC é vital para o gerenciamento eficiente e seguro do BESS. Entre os diversos métodos disponíveis, a contagem de coulomb é amplamente utilizada devido à sua simplicidade conceitual, facilidade de implementação e rastreabilidade direta dos fluxos de corrente [37].

O método baseia-se na medição contínua da corrente que entra e sai da bateria ao longo do tempo. Matematicamente, o SOC em um instante t é determinado pela diferença entre o SoC inicial conhecido $SOC(t_0)$ e a quantidade de carga que fluiu para fora ou para dentro da bateria desde t_0, normalizada pela capacidade nominal (C_n) [42].

A fórmula fundamental para o SOC usando a Contagem de Coulomb é dada por:

$$SOC(t) = SOC(t_0) - \frac{1}{C_n} \int_{t_0}^{t} I(\tau)\, d\tau, \tag{2.1}$$

onde:

- $SOC(t)$ é o estado de carga no tempo t.
- $SOC(t_0)$ é o estado de carga inicial no tempo t_0.
- C_n é a capacidade nominal da bateria (em Ampere-hora, Ah).
- $I(\tau)$ é a corrente instantânea da bateria (em Amperes, A). Por convenção, a corrente de descarga é geralmente positiva e a de carga (regeneração) é negativa.

Por sua simplicidade, o método de contagem de coulomb torna-se suscetível a erros, o que representa um desafio crucial em aplicações de longa duração, como a mineração. Alguns deles são:

- Erros acumulados (*Drift*): O método é extremamente suscetível a erros acumulados decorrentes de imprecisões nos sensores de corrente, erros de amostragem (discretização da integral) e, principalmente, perdas de eficiência de coulomb (η) [43]. Para o BESS de mineração, a η varia com a temperatura, o SOC e o C_{rate}.
- Dependência do SOC inicial: A sua dependência do SOC inicial ($SOC(t_0)$). Essa sensibilidade associada com o SOC inicial pode acabar acarretando em ineficiências da excursão e controle do SOC.

Para sistemas de gerenciamento de bateria mais avançados e a fim de corrigir o drift em tempo real, são frequentemente utilizadas alternativas ou métodos de fusão de dados. Estas incluem algoritmos baseados em estimadores como o filtro de Kalman estendido (EKF - *Extended Kalman Filter*), que utilizam um modelo elétrico da bateria para refinar a estimativa do SOC a partir de medições de tensão e corrente [44], e o método de tensão de circuito aberto (OCV - *Open Circuit Voltage*). No entanto, o contador de coulomb permanece o componente primário no núcleo do rastreamento de carga.

A eficácia da integração ampere-hora para a predição da vida útil em baterias LFP é corroborada por estudos recentes, que demonstram que a precisão do modelo pode ser refinada através de uma abordagem orientada a eventos de carga e descarga [45].

2.5 MODELOS DE DEGRADAÇÃO

A degradação de uma bateria, manifestada pela perda de capacidade (*capacity fade*) e pelo aumento da impedância interna (*impedance rise*), é um fenômeno complexo influenciado por múltiplos fatores físico-químicos, como o crescimento da camada SEI e fadiga mecânica dos materiais ativos [12]. Para fins de simulação de engenharia de longo prazo em BESS, a literatura favorece a adoção de modelos empíricos ou semi-empíricos compactos, que traduzem essa física complexa em funções matemáticas paramétricas de fácil computação [46].

2.5.1 COMPONENTES DE ENVELHECIMENTO

O envelhecimento total de uma bateria é tradicionalmente decomposto em dois processos principais que ocorrem simultaneamente e são aditivos ou, em alguns casos, sinérgicos: a degradação cíclica e a degradação de calendário [47].

1. Degradação cíclica (*Cycle Aging*):

   Refere-se à perda de capacidade e aumento da resistência causados pelo estresse imposto pelos ciclos de carga e descarga da bateria, ou seja, pelo fluxo de corrente. Este é o componente dominante em aplicações de alto uso, como os caminhões de mineração.
   É primariamente uma função da profundidade de descarga (DoD), da taxa de descarga (C_{rate}), do número de ciclos equivalentes (N) e da temperatura durante o ciclo. Altos C_{rates} e $DoDs$ profundos exacerbam o estresse mecânico e químico nas células [48].

2. Degradação de calendário (*Calendar Aging*):

   Refere-se à perda de capacidade que ocorre simplesmente pelo tempo de permanência da bateria sob tensão, independentemente da utilização (mesmo em repouso). É o resultado de reações químicas parasitas de longo prazo, principalmente a decomposição do eletrólito e o crescimento da SEI [49].
   Seus principais vetores de estresse são a temperatura de armazenamento (T) e o SOC médio. Temperaturas altas e SOC elevado (alta tensão de célula) aceleram exponencialmente essas reações [20].

Para a simulação de perfis de missão, a abordagem mais prática e computacionalmente eficiente é adotar um modelo empírico compacto que combina esses dois efeitos de forma aditiva. O modelo de perda de capacidade total (*Capacity fade* - C_f) adotado neste trabalho é representado pela soma dos termos de degradação cíclica (C_{cyc}) e de calendário (C_{cal}):

$$C_f = C_{cyc} + C_{cal} \tag{2.2}$$

A equação (2.2) está fortemente associada com o indicador de estado de saúde (SoH), sendo utilizada a fórmula

$$SoH = 1 - C_f, \tag{2.3}$$

para determinar o SoH.

As equações específicas utilizadas baseiam-se nos parâmetros validados experimentalmente para células LFP/Grafite em [50].

- Termo cíclico (C_{cyc}): Assume-se tipicamente que é proporcional a uma função do DoD, do SOC médio (SOC_m) e da temperatura (T).

$$C_{cyc}(\%) = 2,6418 \cdot e^{-0,01943SOC_m} \cdot (0,004 \cdot e^{0,01705T}) \cdot (0,0123 \cdot DoD^{0,7162}) \tag{2.4}$$

- Termo de calendário (C_{cal}): É comumente proporcional ao tempo ocioso (t) e modulado pelo SoC e pela temperatura (T):

$$C_{cal}(\%) = 1,9775 \times 10^{-11} \cdot e^{0,07511T} \cdot 1,639 \cdot e^{0,007388SOC} \cdot t^{0,8} \tag{2.5}$$

As Equações (2.4) e (2.5) são fundamentais para o modelo empírico de degradação, pois descrevem a perda de capacidade da célula em função de múltiplos fatores de estresse operacionais. Cada variável nessas equações representa um vetor de estresse que influencia diretamente os mecanismos de envelhecimento.

- O termo (T) corresponde à temperatura absoluta da célula (em °K) durante a operação ou o armazenamento. O aumento de temperatura é um fator crítico, pois acelera as reações químicas parasitas, como a decomposição do eletrólito e o crescimento da camada SEI, impactando ambas as componentes de degradação [51].
- Outro fator importante é o estado de carga médio (SOC_m), que afeta a estabilidade química dos materiais de eletrodo e o potencial de crescimento da camada SEI, sendo um fator chave no envelhecimento de calendário [20].
- O tempo de ocioso (t), expresso em meses, quantifica o período em que a célula permanece em repouso ou sob determinada condição de SOC e é o principal quantificador do envelhecimento de calendário.

- No que tange especificamente à degradação devida ao uso cíclico, a profundidade de descarga (DoD) representa a amplitude da variação do SOC de cada ciclo. Ciclos com alta DoD impõem maior estresse aos eletrodos e são mais prejudiciais à estrutura cristalina do material.

Em conjunto, a consideração desses parâmetros permite que o modelo simule de forma abrangente a redução da capacidade da bateria em função das condições de uso cíclico e do tempo de vida acumulado.

A implementação desse tipo de modelo empírico permite que o trabalho se concentre na análise de sensibilidade dos parâmetros de estresse, utilizando os perfis de potência da mina como motor de cálculo para determinar o acúmulo de dano e, assim, prever o *SoH* ao longo da vida útil do e-OHT.

2.6 INDICADORES DE DEGRADAÇÃO

Os indicadores de degradação são as métricas de saída do modelo empírico e fornecem a avaliação quantitativa do desempenho e da vida útil do BESS ao longo do tempo. A análise destes indicadores, sob os perfis operacionais de mineração, é o objetivo central do presente trabalho.

2.6.1 CURVA DE DEGRADAÇÃO DA CAPACIDADE

O principal indicador de envelhecimento é a degradação de capacidade (C_f), que quantifica a perda da capacidade máxima de armazenamento de energia (C) do BESS. Essa perda é expressa através do estado de saúde (SoH), definido como [52]:

$$\mathrm{SoH} = \frac{C_{\mathrm{atual}}}{C_{\mathrm{nominal}}} \times 100\% = 1 - C_f, \tag{2.6}$$

onde $\mathrm{C_{atual}}$ é a capacidade máxima atual e $\mathrm{C_{nominal}}$ é a capacidade inicial de fábrica.

O SoH deve ser projetado continuamente em função do número de ciclos equivalentes acumulados pelo BESS, de modo que a curva resultante, SoH versus ciclos/tempo, permita a visualização da taxa de envelhecimento sob diferentes estresses operacionais.

2.6.2 AUMENTO DA IMPEDÂNCIA INTERNA

Embora a perda de capacidade domine o foco de vida útil, o aumento da impedância interna (Z_{int}) é um indicador crítico. Esse aumento reflete o declínio na capacidade da bateria de entregar e receber corrente de forma eficiente. O mecanismo fundamental por trás do aumento da resistência interna é a diminuição da taxa de reações eletroquímicas e o impedimento do transporte de íons e elétrons dentro da célula [53]. Isso é primariamente

causado por uma série de fatores de degradação interconectados que afetam os principais componentes da bateria: o eletrólito, os eletrodos (cátodo e ânodo) e os separadores.

Os principais fatores de degradação responsáveis pelo aumento da Z_{int} em baterias incluem, em primeiro lugar, o crescimento e a alteração da SEI no ânodo. A SEI, que se forma na superfície do ânodo de grafite, pode crescer e se tornar mais espessa ou mais resistiva ao longo do tempo (fenômeno conhecido como espessamento da SEI), especialmente devido a temperaturas elevadas ou sobrecarga. Esse crescimento, embora consuma lítio ativo e eletrólito, atua principalmente como uma barreira que dificulta a intercalação e desintercalação dos íons de lítio, elevando diretamente a resistência de transferência de carga (R_{ct}), um componente significativo da resistência interna total [54].

Em segundo lugar, temos a perda de contato eletrônico e a degradação superficial no cátodo. Devido à alta estabilidade estrutural da olivina ($LiFePO_4$), a dissolução de íons de metal de transição e a instabilidade estrutural são minimizadas. Contudo, o LFP possui uma baixa condutividade eletrônica intrínseca, exigindo revestimentos de carbono. O ciclismo e as condições operacionais podem levar à degradação do revestimento de carbono ou à perda de contato entre as partículas e os ligantes e o coletor de corrente. A fratura das partículas, causada pelo estresse volumétrico do mecanismo de reação bifásico, também pode ocorrer, e todos esses fatores aumentam significativamente a resistência de contato eletrônico e a R_{ct} global [55].

Em terceiro lugar, a oxidação e decomposição do eletrólito contribuem significativamente. O eletrólito orgânico é suscetível à decomposição em potenciais extremos, gerando gases e subprodutos resistivos que se acumulam nos eletrodos ou no separador. Embora a estabilidade térmica superior do cátodo LFP mitigue a decomposição catalítica em alta temperatura, a degradação ainda ocorre, o que diminui a condutividade iônica (a capacidade dos íons de lítio de se moverem livremente no eletrólito) e aumenta a resistência iônica (R_{ion}) [56].

Por fim, o bloqueio e a degradação do separador também elevam a Z_{int}, uma vez que os poros do separador podem ser entupidos por subprodutos da degradação, impedindo o fluxo iônico eficiente[57].

Esse aumento da $\mathrm{Z_{int}}$ resulta em duas consequências operacionais diretas:

- Geração térmica elevada: Perdas por Efeito Joule ($\mathrm{P_{loss} = R_{int} \cdot I^2}$) aumentam drasticamente, elevando a temperatura interna da célula que, por sua vez, acelera ainda mais a degradação.
- Limitação de potência: O aumento da $\mathrm{Z_{int}}$ reduz a capacidade do BESS de fornecer e absorver a potência instantânea exigida, podendo comprometer a capacidade de frenagem regenerativa ou o desempenho de tração em subidas, violando o limite de tensão do BESS.

2.6.3 CRITÉRIOS DE FIM DE VIDA

A definição do ponto de fim de vida (*End of life* - EOL) é o resultado prático da projeção da curva de SoH e estabelece o horizonte de substituição ou reutilização do ativo. O padrão da indústria para aplicações veiculares elétricas é que o BESS atinge o fim de sua vida útil primária quando o estado de saúde (SoH) cai para 80% da capacidade nominal. O 20% de perda de capacidade é o ponto de referência para a perda de autonomia e o início da realocação do ativo [41].

Para um e-OHT, um outro fator determinante para o EOL é a limitação de potência. A degradação da bateria leva inevitavelmente ao aumento da resistência interna do BESS. Em um e-OHT as demandas de corrente são extremas, seja para prover a alta potência de tração necessária para subir rampas com carga máxima, ou para absorver a alta potência de regeneração durante as descidas, e quando o SoH se aproxima ou cai abaixo de 80%, o aumento da impedância interna pode impedir o BESS de fornecer ou aceitar essas correntes de pico.

Essa impedância interna elevada não é apenas um obstáculo à transferência de energia, ela também acarreta na geração de calor excessivo nas baterias. Este aquecimento excessivo impõe uma sobrecarga severa ao sistema, que se não for capaz de dissipar o calor na mesma velocidade em que é gerado, a temperatura interna das células sobe perigosamente [58].

Temperaturas elevadas também aceleram ainda mais os mecanismos eletroquímicos de degradação da bateria criando um ciclo de degradação que leva ao aumento da impedância interna, o que, por sua vez, gera mais calor, impulsionando assim mais degradação.

Essa situação pode acarretar na ocorrência de desequilíbrio térmico entre as células e, no pior dos casos, um evento de fuga térmica (thermal runaway). A fuga térmica é um processo incontrolável de aquecimento celular que pode levar à falha catastrófica da bateria e à incêndios, representando um risco de segurança operacional [26].

Em alguns casos de uso extremo, o EOL pode ser ditado pela incapacidade do BESS de atender à demanda de potência de pico do ciclo de mineração, mesmo que seu SoH ainda esteja acima de 80%. Este critério é crucial para e-OHTs, onde a alta potência de regeneração ou tração pode ser o limitador.

No entanto, o limiar de 80% marca o fim da vida primária, mas não o fim do valor do ativo pois o BESS, ainda possui uma capacidade de armazenamento considerável e gerenciável. Esses módulos de bateria podem ser reembalados para uso em sistemas de armazenamento de energia estacionários (ESS). Nestas aplicações secundárias, os requisitos de potência de carga e descarga são muito mais lentos e controlados (tipicamente taxas $C/1$ a $C/4$), permitindo que o BESS opere com segurança e eficiência por mais anos. O

planejamento do EOL aos 80% é, portanto, uma estratégia de gestão de ativos que assegura a máxima produtividade durante a vida primária e otimiza o valor residual do componente mais caro do sistema, alinhando a segurança operacional com a sustentabilidade econômica [41].

2.7 CONSIDERAÇÕES PARCIAIS

Este capítulo estabeleceu a fundamentação teórica necessária para a compreensão dos desafios e das soluções propostas para a eletrificação de frotas de mineração. A revisão bibliográfica destacou que a transição para caminhões híbridos ou elétricos (e-OHTs) é impulsionada pela necessidade de redução de custos operacionais e emissões, sendo viabilizada tecnicamente pela frenagem regenerativa.

Definiu-se a química Lítio-Ferro-Fosfato (LFP) como a tecnologia mais adequada para esta aplicação, priorizando a segurança e a longa vida útil cíclica em detrimento da densidade energética máxima, uma escolha alinhada com as necessidades do ambiente de mineração.

Se tratando da modelagem, optou-se por abordagens semi-empíricas em vez de modelos eletroquímicos complexos (como o P2D). Essa escolha justifica-se pela eficiência computacional necessária para simulações de longo prazo e pela capacidade desses modelos de representar adequadamente a perda de capacidade (C_f) e o aumento de impedância interna através da soma dos danos de degradação cíclica e de calendário. Por fim, foram estabelecidos os indicadores de fim de vida (EOL), considerando não apenas a perda de 20% da capacidade nominal, mas também as limitações de potência que podem comprometer a operação dos caminhões.

3 DESENVOLVIMENTO

Este capítulo é dedicado à aplicação dos conceitos teóricos e das métricas de degradação discutidas no Capítulo 2 em um modelo computacional funcional. O foco é a implementação de um modelo modular do BESS no ambiente Matlab/Simulink, e serão detalhados seus principais subsistemas, especificando suas entradas e saídas de dados para processamento dos perfis de potência.

3.1 MODELO DO BESS

O modelo do BESS é desmembrado em duas partes essenciais. Primeiramente, a dinâmica interna da célula é representada pelos blocos ZARC, que constituem um circuito elétrico equivalente (CEE) amplamente utilizado para simular a resposta de tensão transiente e o comportamento resistivo-capacitivo da célula.

Em segundo lugar, a simulação exige a definição dos parâmetros elétricos e limites operacionais, que configuram a montagem física do BESS (como a tensão nominal, a janela de operação do SOC e os limites de corrente de carga e descarga).

3.1.1 CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE - ZARC

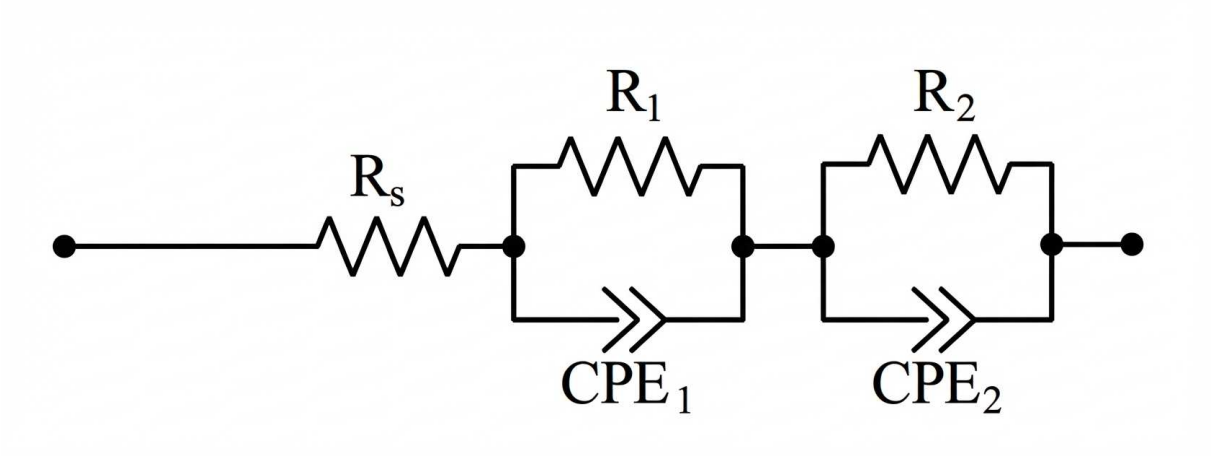
Utilizar circuitos elétricos equivalentes (CEE) representa uma das abordagens mais eficazes para a simulação da bateria, oferecendo um equilíbrio ideal entre precisão e baixo custo computacional. Diferentemente de modelos puramente eletroquímicos, o CEE descreve o comportamento dinâmico da célula a partir de componentes elétricos ideais (resistores e capacitores), cujos valores refletem o estado interno da bateria.

Neste trabalho o BESS é modelado utilizando o CEE na configuração ZARC, como proposto em [50], que consiste tipicamente em uma resistência ôhmica em série (R_s) e um ou mais circuitos paralelos RC (ou ZARC quando se trata de um elemento de fase constante (CPE)) que modelam a polarização eletroquímica e de concentração. O modelo específico que foi utilizado para este trabalho, ilustrado na Figura 3, é regrado pela equação:

$$Z_{ZARC} = R_s + \frac{R_1}{1 + (j\omega)^{n_1} Q_1 R_1} + \frac{R_2}{1 + (j\omega)^{n_2} Q_2 R_2}, \tag{3.1}$$

onde R_s representa a resistência série da bateria, R_1 e R_2 representam as demais resistências do circuito, Q_1 e Q_2 representam as capacitâncias generalizadas, n_1 e n_2 representam os fatores de depressão e ω representa a frequência angular.

Figura 3 – Modelo de CEE adotado.



Fonte: Adaptado de [50].

A formulação adotada segue o princípio de incorporar uma dimensão de envelhecimento aos parâmetros do circuito equivalente. Isso significa que cada parâmetro interno varia em função do grau de envelhecimento acumulado, regradas pelas equações de degradação apresentadas em [50]:

$$Rs_{cal}(t,T,SOC) = \left(1.6487 \cdot 10^{-11} \cdot e^{0.07559 \cdot T}\right) \cdot \left(0.5012 \cdot SoC_m^{0.4259}\right) \cdot t, \tag{3.2}$$

$$R1(t,T,SoC_m) = \left(2.1165 \cdot 10^{-12} \cdot e^{0.08192 \cdot T}\right) \cdot \left(0.9778 \cdot SoC_m^{0.4118}\right) \cdot t, \tag{3.3}$$

$$Q1(t,T,SoC_m) = \left(7.6043 \cdot 10^{-6} \cdot e^{0.03592 \cdot T}\right) \cdot \left(1.673 \cdot SoC_m^{0.1121}\right) \cdot t, \tag{3.4}$$

$$Rs_{cyc}(DoD,T) = \left(7.799 \cdot 10^{-14} \cdot e^{0.0934 \cdot T}\right) \cdot \left(2.356 \cdot 10^{-5} \cdot DoD^{0.9395}\right), \tag{3.5}$$

$$R2(DoD,T) = \left(1.3636 \cdot 10^{-11} \cdot e^{0.07742 \cdot T}\right) \cdot 5.342 \cdot 10^{-4} \cdot DoD, \tag{3.6}$$

$$Q2(DoD,T) = \left(9.457 \cdot 10^{-6} \cdot e^{0.0358 \cdot T}\right) \cdot 3.571 \cdot 10^{-5} \cdot DoD, \tag{3.7}$$

$$Rs = Rs_{cyc} + Rs_{cal} \tag{3.8}$$

onde DoD representa a profundidade de descarga, T representa a temperatura, SoC_m representa o SoC médio, e t representa o tempo ocioso.

Observa-se que o modelo segrega a degradação das impedâncias em dois blocos: as equações (3.2), (3.3) e (3.4) quantificam as perdas por calendário, ao passo que as equações (3.5), (3.6) e (3.7) modelam os efeitos da degradação cíclica.

Essa estratégia de atualização dos parâmetros baseia-se na premissa de desacoplamento dos mecanismos de envelhecimento. Assim, os parâmetros de dinâmica rápida (R_1 e Q_1), são atualizados com base em variáveis utilizadas para o cálculo degradação de calendário (SOC e tempo ocioso), refletindo o crescimento passivo da camada SEI. Já os parâmetros de dinâmica lenta (R_2 e Q_2), dominados pelos processos de difusão, são atualizados com base em variáveis utilizadas para o cálculo degradação cíclica (DoD), representando o impacto do estresse mecânico e da fadiga do material ativo.

Essa abordagem permite que o modelo acompanhe, ao longo do tempo, o aumento da impedância interna, grandeza que reflete diretamente o envelhecimento progressivo da bateria e as perdas internas.

3.1.2 PARAMETROS ELÉTRICOS E LIMITES OPERACIONAIS

A definição dos limites de SOC (SOC_{min} e SOC_{max}) é a principal estratégia de controle por software para mitigar a degradação da bateria. Embora a célula tenha uma capacidade nominal de 0% a 100%, operar nestes extremos é prejudicial para a química LFP.

Manter baterias LFP em altos estados de carga (acima de 80-85%) e altas temperaturas acelera a oxidação do eletrólito no cátodo e o crescimento da camada SEI. Além disso, em SOC elevado, na situação de o caminhão iniciar uma descida com a bateria perto de completamente carregada, não haverá capacidade para armazenar a energia regenerada, forçando o uso do banco de resistores e desperdiçando a oportunidade de recuperação energética.

Descargas profundas (abaixo de 10-15%) causam contração volumétrica excessiva na estrutura do grafite, podendo levar à delaminação do material ativo e perda de contato elétrico (aumento de impedância). Adicionalmente, em baixos SOCs, a tensão de circuito aberto cai, aumentando a corrente solicitada do BESS para suprir a potência demandada. Esse fato, combinado com as altas correntes de tração já exigidas pode causar estresse térmico no BESS.

Diante desses fatos, para esse trabalho será adotado um limite de SOC de operação entre 20 e 80%, e um nível de SOC inicial (SOC_i) de 20%.

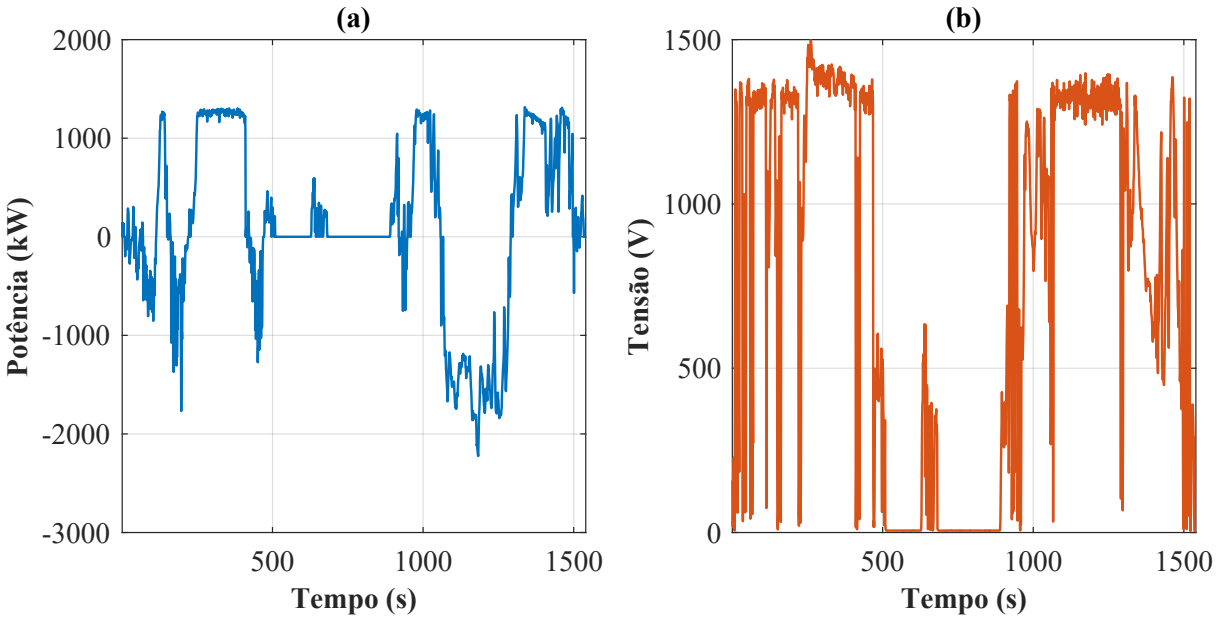
A estrutura do BESS baseia-se em um pacote formados por módulos de células interconectadas. Tanto a associação dos módulos quanto a conexão interna das células que constituem os módulos podem ser configuradas em série ou paralelo livremente, dependendo dos requisitos do sistema. A configuração de células escolhida para constituir um único módulo foi de 2 células em paralelo e 24 células em série (24s2p).

Foi selecionado para uso neste trabalho o modelo de células de bateria LFP cilíndricas ANR26650M1-B desenvolvidas pela A123 Systems [59], que possui uma tensão nominal de 3.3 V, capacidade de 2.5 Ah e uma taxa de descarga máxima de 4C. Considerando então o arranjo escolhido de 24s2p, cada módulo possui uma tensão de 79,2V e capacidade nominal de 5Ah.

A definição da tensão nominal, capacidade total e configuração topológica (N_s/N_p) não constitui apenas um caso de dimensionamento estático, trata-se de estabelecer parâmetros que assegurem a operação do sistema dentro das fronteiras térmicas e elétricas, visando a viabilidade econômica e a segurança operacional específico de cada caso de operação, uma vez que a topologia do banco de baterias atua como a materialização física dos requisitos de potência do veículo frente às limitações das células. O objetivo é configurar um arranjo que atenda à tensão do barramento, mantendo as células em sua área de operação segura, e atingindo um nível de potência à par do demandado pelo perfil de operação. Portanto, a determinação da topologia do BESS deve ser necessariamente precedida pela análise dos perfis de potência e tensão do ambiente elétrico em questão.

Para exemplificar o processo de determinação da topologia, utiliza-se um perfil de operação real de uma mina, cujos dados de potência e tensão durante um ciclo foram medidos experimentalmente e estão apresentados na Figura 4.

Figura 4 – (a) Perfil de potência utilizado e (b) Perfil de tensão utilizado.



Fonte: (Autor)

Com base na dinâmica de tensão do barramento ilustrada na Figura 4, definiu-se uma tensão alvo de 1300 V para o BESS. Ressalta-se que a conexão do banco de baterias ao barramento é realizada através de um conversor de interface, o que permite desacoplar a tensão do arranjo da tensão do barramento.

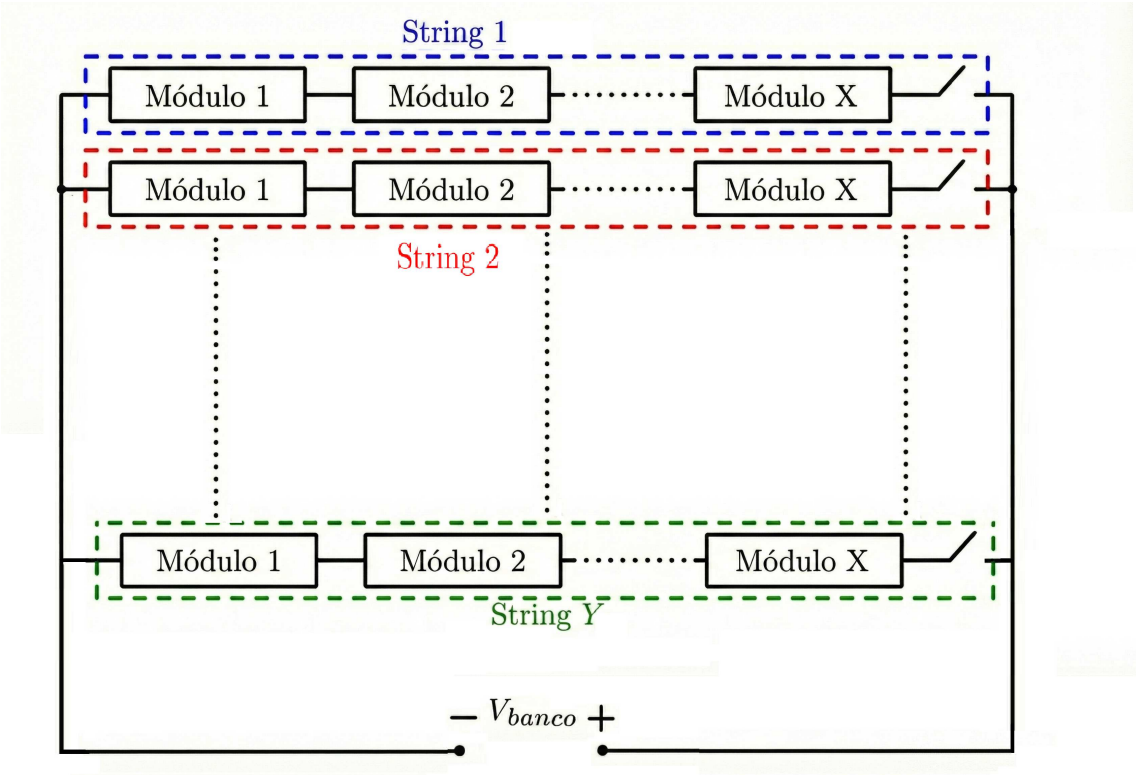
Desta forma, não sendo mandatória a paridade exata de tensões, e considerando a organização interna dos módulos em 24s2p (compostos por células de 2,5 Ah, taxa de 4C e tensão nominal de 3,3 V), optou-se pela associação em série de 16 módulos. Conforme detalhado na Seção **3.1.2**, cada módulo apresenta uma tensão terminal de 79,2 V, resultando em uma tensão total de 1267,2 V para o sistema, sendo a adequação final aos níveis do barramento realizada pelo controle do conversor.

Para satisfazer os requisitos de potência, estipulou-se a necessidade de uma corrente total de 1200 A. Visto que cada *string* é capaz de fornecer 20 A (devido à configuração 2p das células), foram dispostas 60 *strings* em paralelo. Essa configuração consolida uma topologia final composta por 384 células em série por *string* e 120 células efetivas em paralelo, totalizando 46.080 células. O arranjo resultante oferece uma capacidade de 300 Ah e uma potência máxima de 1,52 MW.

Um esquemático genérico da organização de módulos de baterias do BESS é explicitado na Figura 5.

Concluído o dimensionamento da topologia e a definição dos parâmetros do BESS, procede-se à simulação do modelo.

Figura 5 – Esquema genérico simplificado do banco de baterias proposto.



Fonte: (Autor)

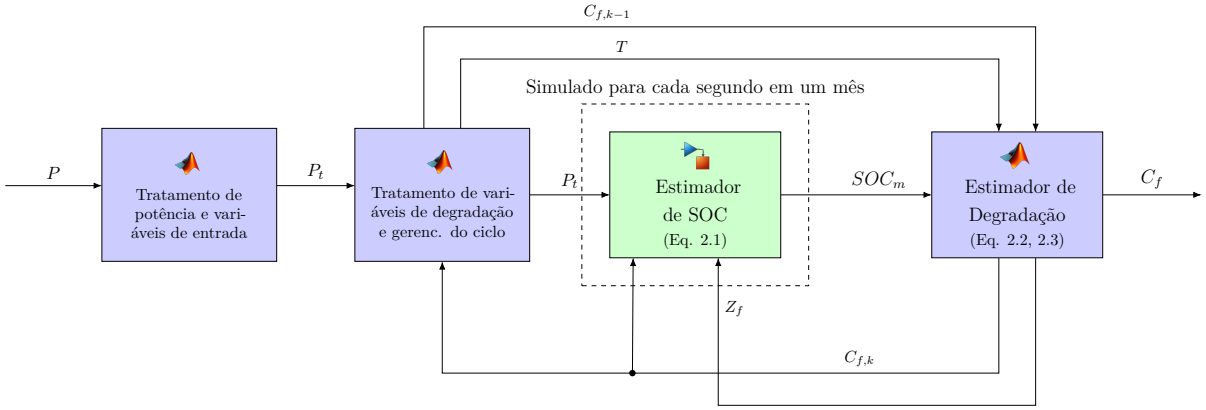
3.2 VISÃO GERAL DO AMBIENTE DE SIMULAÇÃO

O modelo proposto opera sob uma lógica de horizonte estendido, onde a simulação é segmentada em ciclos com duração de um mês. Dentro de cada ciclo, a dinâmica elétrica é resolvida com uma discretização temporal de 1s, o que resulta em 2.629.800 pontos simulados para cada mês no horizonte de planejamento.

A arquitetura do modelo, ilustrada na Figura 6, é composta por dois subsistemas:

1. Estimador de SOC: Um modelo dinâmico que calcula a excursão do estado de carga ($SOC(t)$) e a resposta de tensão terminal da bateria sob carga.
2. Estimador de Degradação: Calcula a degradação a partir do comportamento do $SOC(t)$.

Figura 6 – Organização do modelo de simulação.



Fonte: (Autor)

onde as variáveis apresentadas no diagrama de blocos representam:

P : Perfil de potência sem tratamento.

T: Temperatura da bateria.

P_t: Perfil de potência tratado para repetição mensal.

SOC_m: Valores de SOC calculados para o ciclo mensal.

C_f: Perda de capacidade da bateria, que se subdivide em 3: o primeiro ($C_{f,k-1}$) representando a degradação do BESS ao final do mês anterior da etapa atual da simulação, o segundo ($C_{f,k}$) representando a degradação ao final do mês simulado e o terceiro (C_f) representando a degradação total ao final do horizonte de simulação.

Z_f: Degradação dos parâmetros internos da bateria.

O modelo recebe o conjunto de parâmetros globais que regem toda a simulação. Estes dados de entrada classificam-se em:

- Configuração da simulação: Topologia do banco (número de células em série e paralelo), limites operacionais (SOC_{min}, SOC_{max}), condição inicial (SOC_i) e temperatura;
- Parâmetros da bateria: Características intrínsecas como impedâncias, capacidade nominal, taxa de descarga e a curva característica de tensão de circuito aberto em função do SOC;
- Demanda de potência: Os dados brutos do perfil de potência.

O fluxo de simulação é iniciado pelo processamento desse perfil de potência, que representam o ciclo operacional típico de um caminhão de mineração. A dinâmica de potência imposta é a base para o cálculo instantâneo do $SOC(t)$, variável que, por sua vez, alimenta os modelos de degradação conforme as relações estabelecidas nas Equações (2.4) e (2.5) .

Primeiramente, o modelo atua na padronização dos parâmetros de entrada e saída, assegurando a integridade dos dados para as etapas seguintes e orquestrando a execução dos subsistemas. Adicionalmente, controla a lógica ciclica da simulação, permitindo a configuração do horizonte de simulação e garantindo a continuidade do SOC, ao transferir o valor final de um ciclo mensal como $SOC_{inicial}$ do próximo.

Na sequência, o perfil de potência é processado para corresponder a um mês completo de operação. Caso o dado de entrada represente um intervalo menor (como, por exemplo, 2 horas), o algoritmo concatena repetições consecutivas desse ciclo até preencher a duração mensal. A lógica cíclica do sistema então projeta esse perfil padronizado ao longo de todo o horizonte de simulação, estendendo-se pelo número de meses definido ou até atingir o critério de parada.

Em seguida, tem-se o subsistema Estimador de SOC, que recebe como entrada o perfil de potência ($P(t)$), parâmetros de configuração da modelagem e parâmetros do BESS. Sua função é, utilizando a lei de Watt ($P = V \times I$), determinar a corrente a cada instante de simulação para calcular o valor do SOC ao longo do horizonte da simulação.

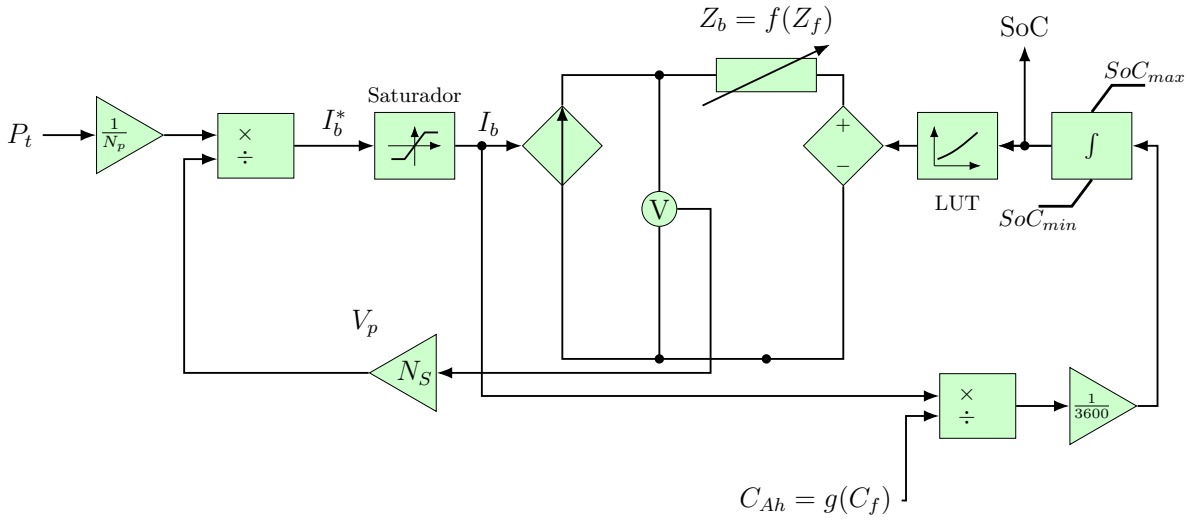
Finalmente, o subsistema de Estimação de Degradação recebe como entrada os valores de $SOC(t)$ e calcula as componentes de degradação cíclica e de calendário, retornando a degradação total ao final do ciclo mensal.

3.2.1 ESTIMADOR DE SOC

Implementado em Simulink, o Estimador de SOC, que é representado estruturalmente pela Figura 7, processa um conjunto de variáveis de entrada que inclui o perfil de

potência ($P(t)$), os limites operacionais (SOC_{min} e SOC_{max}), o SOC inicial do ciclo (SOC_i), a capacidade atual da bateria e os parâmetros intrínsecos do BESS, como impedâncias internas, características da célula e do BESS.

Figura 7 – Diagrama de blocos da lógica utilizada no Estimador de SoC com Integrador Saturado.



Fonte: (Autor)

onde as variáveis apresentadas no diagrama de blocos representam:

P_t: Perfil de potência tratado;

N_p: Número de ramos de células em paralelo;

I_b^*: Corrente calculada antes da saturação;

I_b: Corrente calculada após a saturação;

Z_b: Impedância interna da bateria (dependente da degradação);

Z_f: Degradação da impedância interna;

C_f: Fator de degradação (*Capacity Fade*);

V_p: Tensão total do BESS;

N_s: Número de células conectadas em série em um ramo;

LUT: Tabela de busca (*Look-Up Table*) que relaciona tensão de circuito aberto com SOC;

SoC: Estado de Carga (SOC);

C_{Ah}: Capacidade da bateria (dependente da degradação).

A partir da potência instantânea, da tensão da célula e da configuração do banco (número de células em série e paralelo), o sistema determina a corrente que flui por uma célula unitária. Adota-se a convenção de corrente positiva para situações de demanda de potência (tração) e negativa para o recebimento de energia (frenagem regenerativa). Ressalta-se que a modelagem matemática é realizada em nível de célula, assumindo-se que este comportamento representa de forma homogênea todo o conjunto de baterias.

A tensão da bateria necessária para o cálculo da corrente é determinada pelo modelo de circuito elétrico equivalente (CEE). Este modelo elétrico utiliza a corrente calculada e a tensão de circuito aberto, que é dependente do SOC com seus valores sendo definidos via *look-up table* (LUT), para calcular a tensão dinâmica da bateria. O uso do CEE permite simular a dinâmica das perdas internas da célula, uma vez que à medida que a bateria degrada, a impedância interna da célula aumenta, alterando a queda de tensão no mês seguinte.

Este valor de corrente é então submetido a um limitador para simular as restrições operacionais de corrente máxima e mínima das células, com a energia excedente sendo direcionada ao grid resistivo. O limite de corrente, de fórmula apresentada na equação (3.9), é um valor diretamente atrelado à capacidade da bateria, sendo, portanto, um parâmetro variável que se ajusta em função da perda de capacidade causada pela degradação ocorrida durante seu uso.

$$lim_C = C_{Ah} \times C_{rate} \tag{3.9}$$

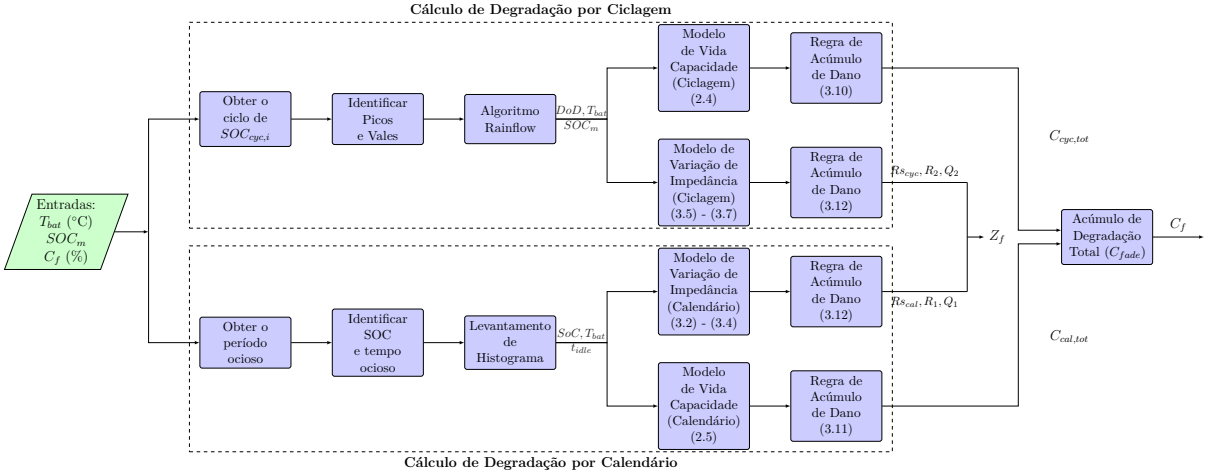
A corrente resultante é dividida pela capacidade atual da bateria (convertida para Ampére-segundo ao invés de Ampére-hora, já que a discretização do sistema é em segundos) para se normalizar o fluxo de carga em relação ao tamanho total do acumulador. O valor resultante alimenta um integrador, que implementa o método da contagem de coulomb (Equação (2.1)). É importante ressaltar que, embora este método seja vulnerável a erros de deriva (*drift*) em aplicações embarcadas (devido a ruídos de instrumentação), no ambiente determinístico de simulação ele oferece o desempenho adequado. Desta forma, o integrador acumula a carga para determinar o SOC instantâneo, aplicando saturação dinâmica para garantir que o resultado permaneça estritamente entre os limites de SOC_{min} e SOC_{max}.

3.2.2 MÓDULO DE DEGRADAÇÃO

O módulo de degradação é responsável por quantificar o envelhecimento da bateria ao longo do horizonte de simulação. Para tal, utiliza o perfil SOC mensal como dado de entrada para extrair os parâmetros necessários ao cálculo da degradação, que são: profundidade de descarga (DoD), temperatura (T_{bat}), tempo ocioso(t_{idle}) e SOC médio ($SOC_{médio}$) por ciclo, como explicitado na Figura 8.

A temperatura é um fator determinante na vida útil das baterias, influenciando significativamente tanto o envelhecimento de calendário quanto o cíclico. Nesse contexto, para esse trabalho, foi assumido um modelo térmico simplificado, implicando a adoção de um sistema de gerenciamento térmico para manter a temperatura dentro da faixa segura estipulada pelos fabricantes, visando estender a durabilidade do componente e garantir a segurança operacional. Para fins de avaliação, os resultados de vida útil consideram um cenário com controle de temperatura fixado em 35°C.

Figura 8 – Fluxograma detalhado do módulo de degradação com variáveis de saída.



Fonte: (Autor)

A quantificação da degradação cíclica exige a decomposição da série temporal de SOC em ciclos fechados. Para tal, este trabalho emprega o algoritmo de contagem de ciclos *rainflow*, uma técnica padrão na análise de fadiga de materiais que também é amplamente utilizada no estudo do envelhecimento de baterias de íon-lítio.

O processamento inicia-se com a simplificação da série temporal do SOC, onde são identificados os extremos locais (picos e vales) para reconstruir o sinal apenas com seus pontos de reversão, eliminando ruídos e variações não significativas. Sobre esse perfil simplificado, o *rainflow* opera segmentando o histórico de uso em uma série de eventos de histerese, classificando-os como ciclos completos ou meios-ciclos. Essa decomposição permite extrair os parâmetros dinâmicos para a modelagem de envelhecimento de cada evento individual: profundidade de descarga e o $SOC_{médio}$. A partir dessa discretização, o estimador de degradação calcula as contribuições de dano de cada sub-ciclo isoladamente aplicando-se a Equação (2.4) aos parâmetros de DoD, temperatura (T) e $SOC_{médio}$ específicos de cada evento de carga/descarga identificado.

Concomitantemente, o subsistema isola os intervalos de repouso (períodos sem variação de SOC) que ocorrem entre os eventos de carga e descarga. Esses períodos de repouso são essenciais para a degradação de calendário, visto que esta componente é fortemente influenciada pelo tempo de permanência da célula em um determinado estado de carga. Sendo assim, a degradação de calendário é calculada pela Equação (2.5), aplicada

aos intervalos de repouso identificados, considerando o $SOC_{médio}$, a duração desses períodos e a temperatura.

Contudo, o escopo de cálculo do subsistema restringe-se à degradação ocorrida em ciclos individuais. Portanto, para determinar a degradação acumulado ao longo do horizonte de simulação, torna-se necessário aplicar um método de acumulação dos danos. Neste trabalho, adota-se a estratégia de acumulação não linear fundamentada em [60]:

$$C_{f_{cyc}} = \sqrt{C_{f_{cyc,i}}^2 + C_{f_{cyc,i-1}}^2}, \tag{3.10}$$

$$C_{f_{cal}} = \left[C_{f_{cal,i}}^{\frac{8}{10}} + C_{f_{cal,i-1}}^{\frac{10}{8}} \right]^{\frac{10}{8}}, \tag{3.11}$$

onde a equação (3.10) se refere à degradação cíclica, a equação (3.11) se refere à degradação de calendário, os termos i se referem a degradação encontrada naquele ciclo específico e os termos $i-1$ se referem a degradação acumulada até o ciclo anterior.

Adicionalmente, o comportamento de SOC ao longo do mês e a temperatura são utilizados para atualizar os parâmetros internos do modelo, baseando-se nas equações (3.2) à (3.7). Analogamente ao cálculo da perda de capacidade, a degradação das impedâncias internas é computada para ciclos individuais, exigindo, portanto, um método de acumulação de danos. Visto que a impedância interna tende a apresentar um crescimento linear ao longo da vida útil [16], adotou-se neste trabalho um modelo de acumulação linear das contribuições de cada ciclo.

$$Z_{total} = Z_{f,i} + Z_{i-1} \tag{3.12}$$

Esse procedimento emula o envelhecimento físico do componente, refletindo-se no aumento progressivo da impedância interna e das perdas do BESS.

Ao término de cada ciclo mensal, o módulo exporta a degradação total acumulada de capacidade e impedâncias internas. Estes valore atuam como condição inicial para a iteração do mês subsequente, assegurando a continuidade e a coerência temporal da simulação.

3.3 ENTRADA DA SIMULAÇÃO: PERFIL DE POTÊNCIA DA MINA

A precisão de qualquer modelo de simulação de baterias é altamente dependente da fidelidade dos dados de demanda de potência que o alimentam. O perfil de potência ($P(t)$), que representa a série temporal de energia solicitada e regenerada pelo caminhão ao longo de sua rota operacional, constitui a principal entrada para a simulação. Esta seção detalha as estratégias adotadas para o tratamento e obtenção desses dados, cobrindo duas vertentes cruciais: a análise de perfis reais obtidos a partir de dados de campo e

a metodologia de um gerador de perfis sintéticos proposto. O objetivo é garantir que a simulação seja baseada em dados medidos ou em perfis plausíveis e representativos das condições operacionais típicas de minas.

3.3.1 PERFIS REAIS

O processo de tratamento do perfil de potência inicia-se com a importação e a classificação dos dados medidos, separando a potência consumida na tração (P^+) da potência regenerada na frenagem (P^-). Para obter a potência total líquida instantânea (P_t), a potência de frenagem é condicionada mediante a inversão do seu sinal, seguindo a convenção onde a potência solicitada (tração) é positiva e a potência injetada na bateria (frenagem) é negativa. Em seguida, a P é calculada pela soma algébrica das potências de tração e de frenagem em cada instante de amostragem. Este perfil resultante representa a demanda real e variável imposta à bateria ao longo de um ou mais ciclos operacionais.

Uma vez que o perfil de campo é de duração limitada, mas a simulação exige um horizonte estendido (neste trabalho cada ciclo é composto por um mês), é necessário realizar a expansão do perfil. O perfil de potência líquida é replicado sequencialmente para gerar uma série temporal contínua que cobre todo o período de simulação. Por fim, o vetor expandido é ajustado e truncado no número exato de amostras correspondente ao horizonte temporal predefinido (2.592.000 amostras para um mês), garantindo que a simulação seja contínua, cíclica e precisa em sua duração. Esta série temporal é, então, fornecida ao subsistema de estimador de SOC como entrada.

3.3.2 GERADOR DE PERFIS SINTÉTICOS PROPOSTO

Embora a utilização de dados reais de campo garanta fidelidade a um cenário operacional específico, a sua disponibilidade é frequentemente limitada e não permite a exploração de diferentes topologias de lavra. Para superar essa restrição, foi desenvolvido um gerador de perfis sintéticos fundamentado na dinâmica longitudinal do veículo. Esta ferramenta permite a construção de ciclos de missão parametrizáveis, calculando a demanda de potência de tração e o potencial de regeneração a partir de variáveis físicas determinísticas, tais como a geometria da rampa (inclinação e extensão), a massa do veículo (nos estados carregado e vazio) e velocidade do veículo durante o ciclo de operação. Dessa forma, o gerador viabiliza a simulação do comportamento do BESS em diversos contextos operacionais, garantindo a generalidade da análise de degradação proposta.

O modelo computacional foi implementado em linguagem Python e opera calculando a demanda instantânea de potência nas rodas necessária para vencer as forças resistivas, gravitacionais e, crucialmente, as forças inerciais decorrentes da variação de velocidade do caminhão.

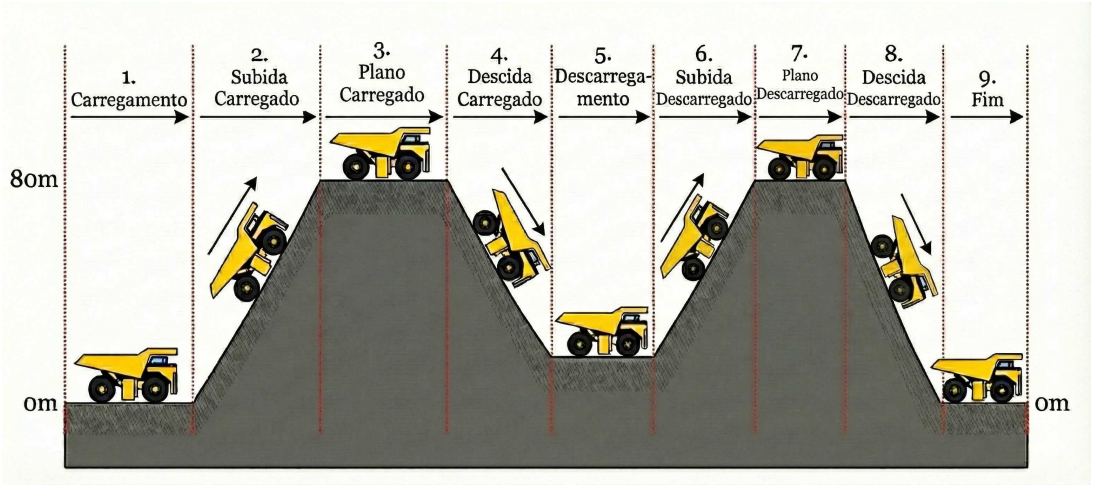
Para a parametrização destes perfis sintéticos, foram adotados valores baseados

na literatura técnica: inclinações máximas de rampa entre 8 e 10% [61], velocidades em trajetos carregados entre 12 e 15 km/h (subida) e 20 a 35 km/h (planos/descidas) [7], velocidades para trajetos descarregados entre 20 e 45 km/h [10] e resistência de rolamento típica de 2% [62].

A construção do ciclo de missão completo é feita através de uma estrutura de segmentos, onde o usuário define sequencialmente os trechos da mina (ex: rampa de subida, trecho plano, descida), especificando a distância, a inclinação e a velocidade alvo. O algoritmo concatena esses segmentos, gerenciando automaticamente a transição de massa (carregado/vazio) e gerando uma série temporal contínua para a simulação.

A Figura 9 apresenta uma representação visual dos segmentos adotados para ser gerado pelo perfil sintético.

Figura 9 – Representação do ciclo adotado para o perfil sintético.



Fonte: (Autor)

A fundamentação teórica do gerador baseia-se na aplicação da Segunda Lei de Newton. A potência mecânica instantânea nas rodas (P_t) é calculada pelo equilíbrio de forças, conforme descrito na Equação (3.13):

$$P(t) = [F_{inercia}(t) + F_{grav}(t) + F_{rol}(t)] \cdot v(t), \tag{3.13}$$

que expandindo os termos para as variáveis operacionais, têm-se:

$$P(t) = [(m \cdot a(t)) + (m \cdot g \cdot \sin(\theta) + (m \cdot g \cdot C_{rr} \cdot \cos(\theta))] \cdot v(t), \tag{3.14}$$

onde:

- m: Massa total do veículo (kg), variando dinamicamente entre a tara (150t) e a carga máxima (340t);

- $a(t)$: Aceleração longitudinal instantânea (m/s^2). No algoritmo, esta variável é obtida através da derivada numérica (dv/dt) do perfil de velocidade alvo;
- g: Aceleração da gravidade (9,81 m/s^2);
- θ: Ângulo da rampa, derivado da inclinação do trecho;
- v: Velocidade instantânea (m/s).
- C_{rr}: Coeficiente de resistência ao rolamento (adotado 0,02 para vias de terra compactada);

A inclusão da inércia no modelo é essencial para a fidelidade da simulação. Em caminhões de grande porte, com massa bruta carregada, a potência necessária para acelerar essa massa ($P = m \cdot a \cdot v$) gera picos de corrente significativos, que contribuem diretamente para o aquecimento e a degradação cíclica, mesmo em trechos de inclinação nula.

Adicionalmente, para garantir que os perfis sintéticos representem a realidade operacional e não apenas curvas teóricas idealizadas, o gerador implementa uma abordagem estocástica. Um ruído gaussiano, com amplitude de até 5% da velocidade atual mas limitado à 5km/h, é aplicado ao perfil de velocidade alvo antes do cálculo da derivada. Isso simula as pequenas oscilações naturais causadas pela irregularidade do terreno e pela resposta do condutor, resultando em um perfil de potência ruidoso e não-estacionário, características essenciais para uma análise de degradação. O resultado visual dessa modelagem é apresentado na Figura 10, que ilustra um ciclo de operação completo gerado pelo algoritmo.

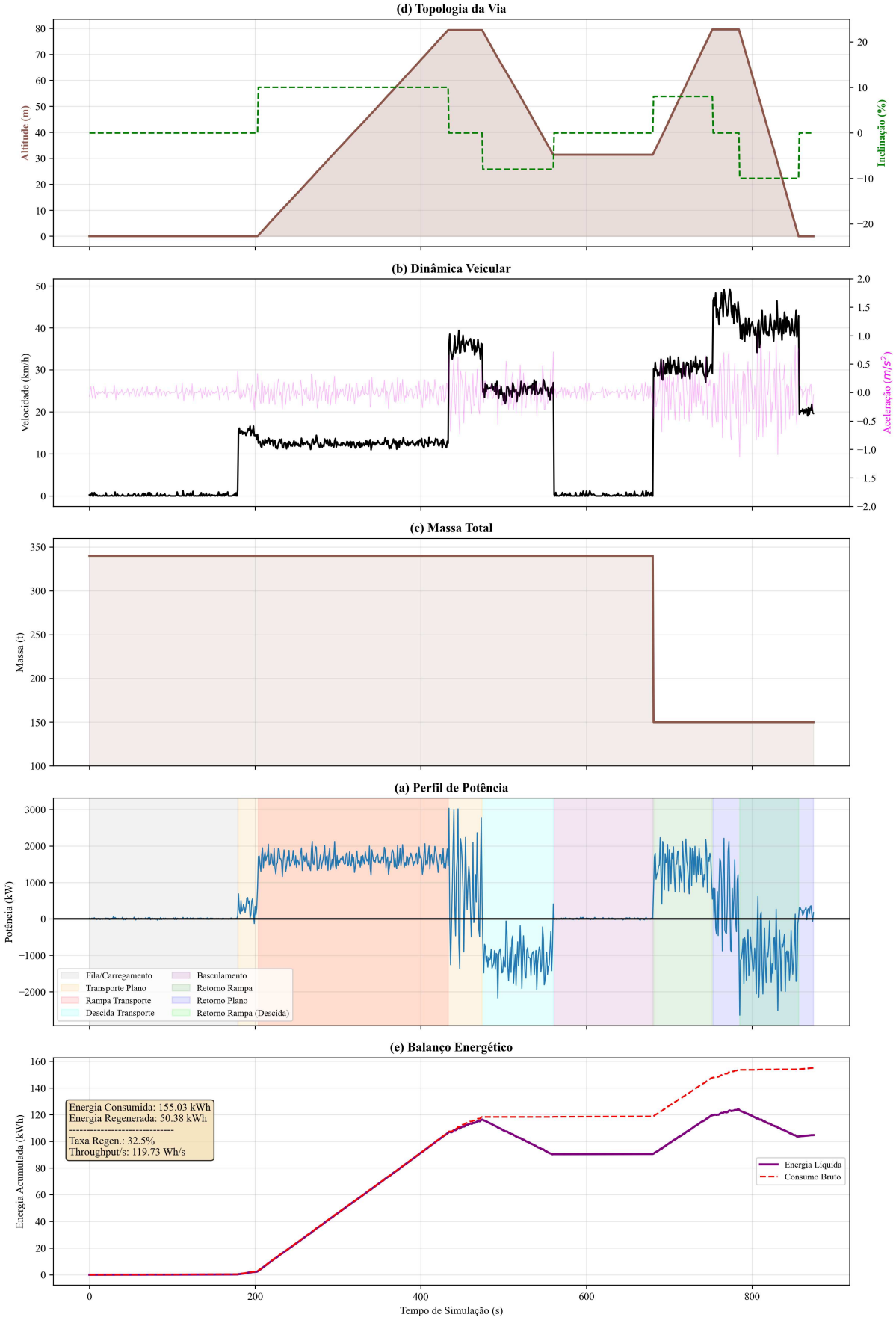
A coerência física dos resultados é evidenciada na Figura 10. Observa-se que, durante os trechos de descida (Figura 10d), a potência torna-se negativa (Figura 10a), resultando na redução do saldo líquido de energia (Figura 10e) devido à frenagem regenerativa. Reciprocamente, nos trechos de subida e deslocamento em plano, a potência apresenta-se positiva, elevando o consumo energético acumulado.

Observa-se, também, na Figura 10 a correlação direta entre o perfil vertical da mina (Figura 10d) e a demanda de potência (Figura 10a). O modelo captura o comportamento ruidoso e não-estacionário da operação, bem como a dinâmica de velocidade (Figura 10b) e massa (Figura 10c). A Figura 10e demonstra a capacidade do algoritmo em contabilizar o balanço energético, discriminando a energia consumida e o potencial regenerativo acumulado ao longo do trajeto.

A implementação deste gerador sintético confere ao trabalho a flexibilidade necessária para extrapolar as análises de degradação para além das limitações impostas pela escassez de dados de campo. Ao garantir a coerência física e o balanço energético dos ciclos simulados, a ferramenta estabelece uma base para a investigação de múltiplos cenários operacionais. Dessa forma, os perfis gerados poderão atuar como a entrada primária para

o modelo de envelhecimento do BESS, permitindo quantificar como diferentes topologias de mina e dinâmicas de condução impactam a vida útil e a viabilidade econômica do sistema de armazenamento.

Figura 10 – Resultados do perfil gerados sinteticamente: (a) perfil de potência, (b) dinâmica de velocidade e aceleração do veículo, (c) dinâmica de massa do veículo , (d) perfil vertical e topologia, (e) balanço energético acumulado e bruto.



3.4 ESTUDO DE CASO PARA VALIDAÇÃO BÁSICA DO MODELO

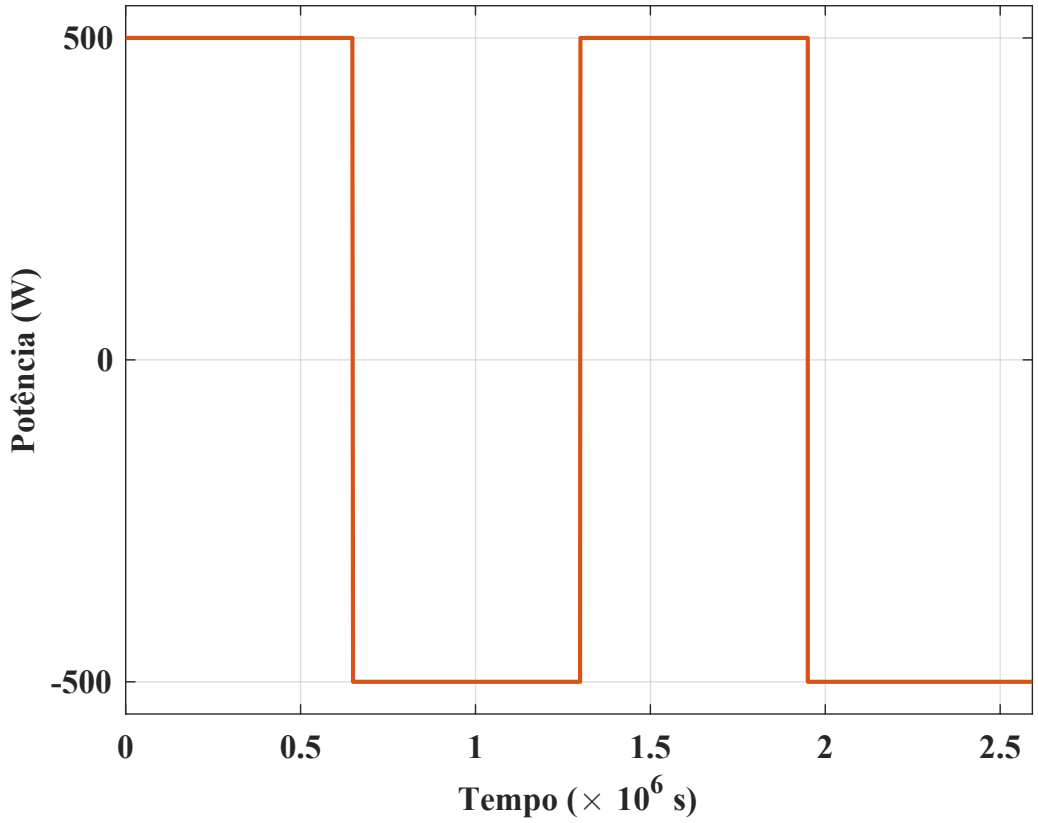
Essa seção tem como objetivo prover uma validação básica da metodologia utilizada no modelo, comprovando que os resultados provenientes da simulação são coerentes com os esperados advindos das equações (2.5) e (2.4) para ao cálculo de degradação e equação (2.1) para o cálculo do SOC.

Para esta etapa, foram utilizados os parâmetros de bateria detalhados na Seção **3.1.2**, baseando-se na célula LFP cilíndrica ANR26650M1-B (A123 Systems) [59], que apresenta tensão nominal de 3.3 V, capacidade de 2.5 Ah e taxa de descarga de 4C. Foram definidos os limites operacionais de SOC entre $SOC_{min} = 20\%$ e $SOC_{max} = 80\%$ e $SOC_i = 20\%$. Adicionalmente, como serão utilizados dados de entrada sintéticos, não há valor de tensão a ser atingido, então adotou-se uma configuração composta por 16 módulos em série e 32 *strings* em paralelo, resultando em um arranjo total de 384 células em série e 64 células em paralelo.

3.4.1 VALIDAÇÃO DO SUBSISTEMA ESTIMADOR DE SOC

A validação do Estimador de SOC baseia-se na aplicação de um perfil sintético de potência como entrada do subsistema. O objetivo consiste em analisar o resultado da aplicação direta da Equação (2.1) e confrontá-lo com a resposta dinâmica da simulação do modelo. Para tal, elaborou-se uma forma de onda quadrada com amplitude variando entre 500 W e -500 W, com alternância a cada 648000s (0,25 meses), conforme detalhado na Figura 11.

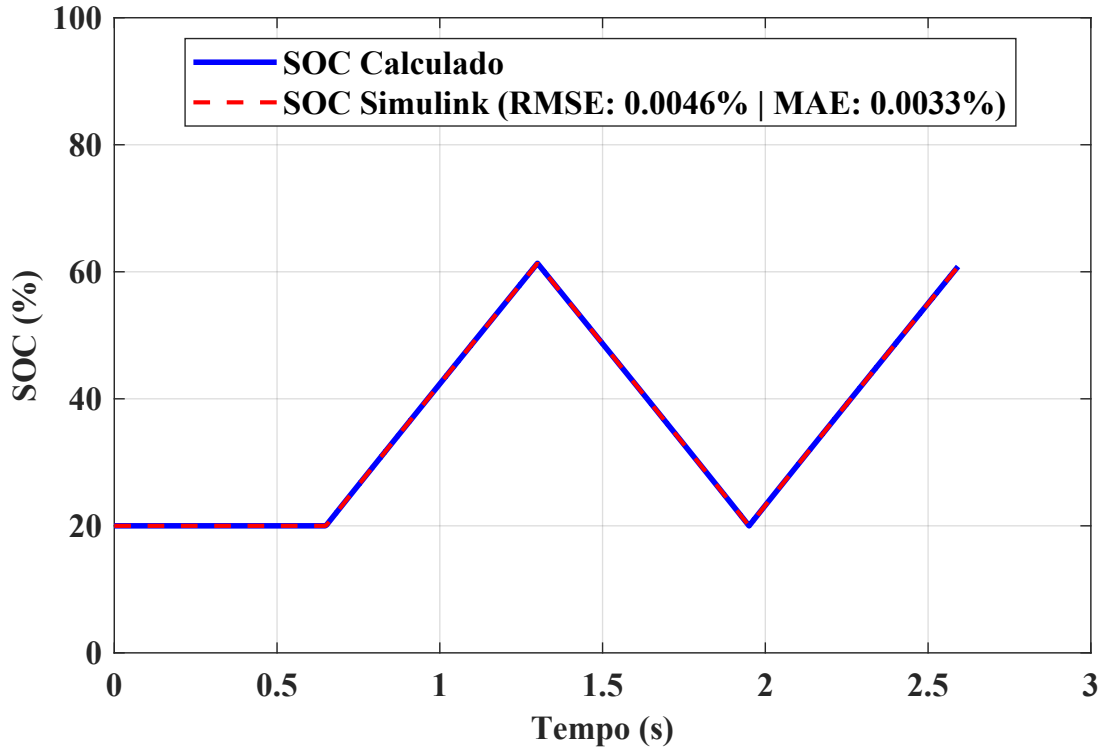
Figura 11 – Perfil de potência quadrado para validação do Estimador de SOC.



Fonte: (Autor)

Para o cálculo via integração de coulomb, primeiramente converteu-se o perfil de potência em corrente, dividindo-o pela tensão (obtida através da relação entre SOC e tensão de circuito aberto). Em seguida, realizou-se a integração conforme descrito na Equação (2.1). As curvas resultantes, provenientes tanto do cálculo numérico quanto da simulação do modelo, são comparadas na Figura 12.

Figura 12 – Comparação de perfil de SOC.



Fonte: (Autor)

Observa-se um comportamento coerente com as premissas do sistema: no primeiro ciclo, onde a potência é positiva (descarga) e o SOC já se encontra no limite inferior, mantém-se o estado de carga constante (saturação). Subsequentemente, ao inverter-se a potência para valores negativos (carga), nota-se a elevação do SOC conforme esperado. A comparação dos resultados apresenta um erro médio absoluto (MAE) de 0,0033% e um erro quadrático médio (RMSE) de 0,0046%, o que indica que o estimador de SoC é capaz de estimar, com uma precisão satisfatória, os valores de SoC para dado perfil de potência de entrada.

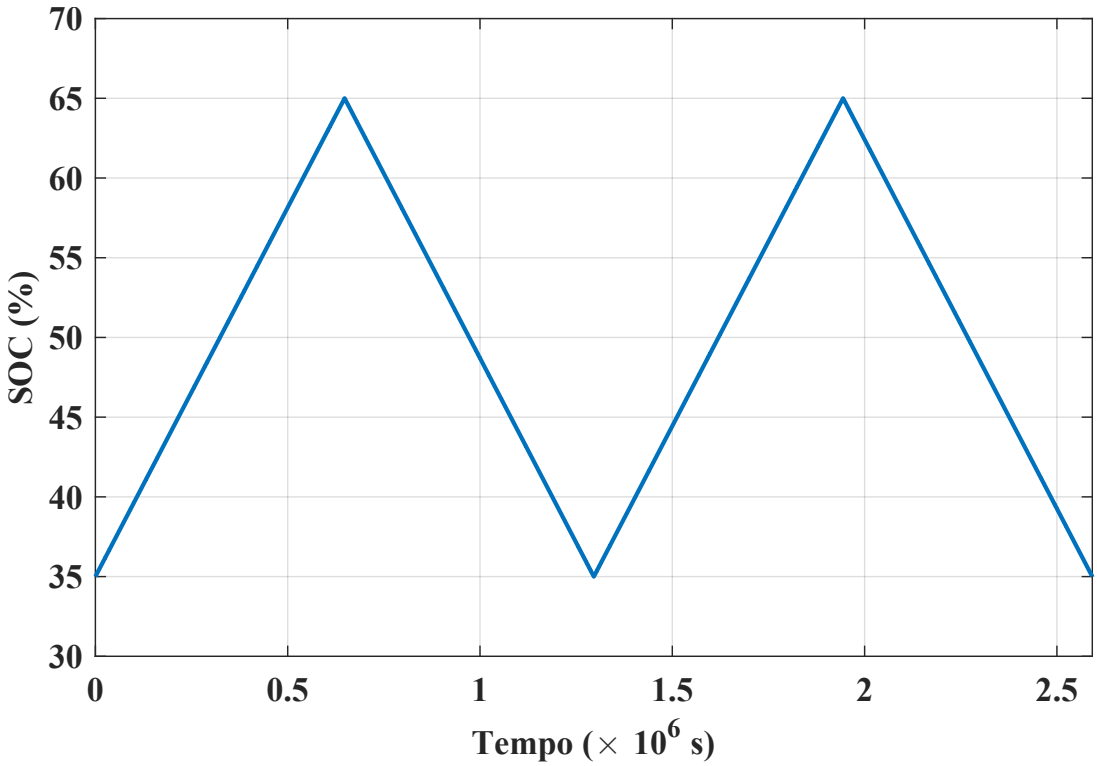
3.4.2 VALIDAÇÃO DO SUBSISTEMA ESTIMADOR DE DEGRADAÇÃO

Analogamente à validação do Estimador de SOC, a verificação do modelo do Estimador de Degradação baseia-se na aplicação de um perfil sintético de SOC como entrada do subsistema. O objetivo consiste em analisar os parâmetros intermediários e confrontar os resultados da simulação com as estimativas teóricas calculadas através das Equações (2.5) e (2.4). Para este fim, elaborou-se uma forma de onda triangular com amplitude variando entre 35 e 65% e período de 1.296.000 s. Esta configuração resulta em dois ciclos completos ao longo de um mês (2592000s), conforme ilustrado na Figura 13.

O perfil sintético gerado caracteriza-se pelos seguintes parâmetros: $SOC_m = 50\%$, $DoD = 30\%$ e $T = 50°C$. A aplicação destes valores na Equação (2.4) resulta em uma degradação de 0,1964%, valor que apresenta exata concordância com o resultado obtido na

simulação do modelo. Observa-se ainda a ausência de períodos de inatividade neste perfil, implicando na nulidade do termo de envelhecimento por calendário, condição devidamente validada pelos resultados da simulação.

Figura 13 – Perfil de SOC triangular para validação da degradação cíclica.

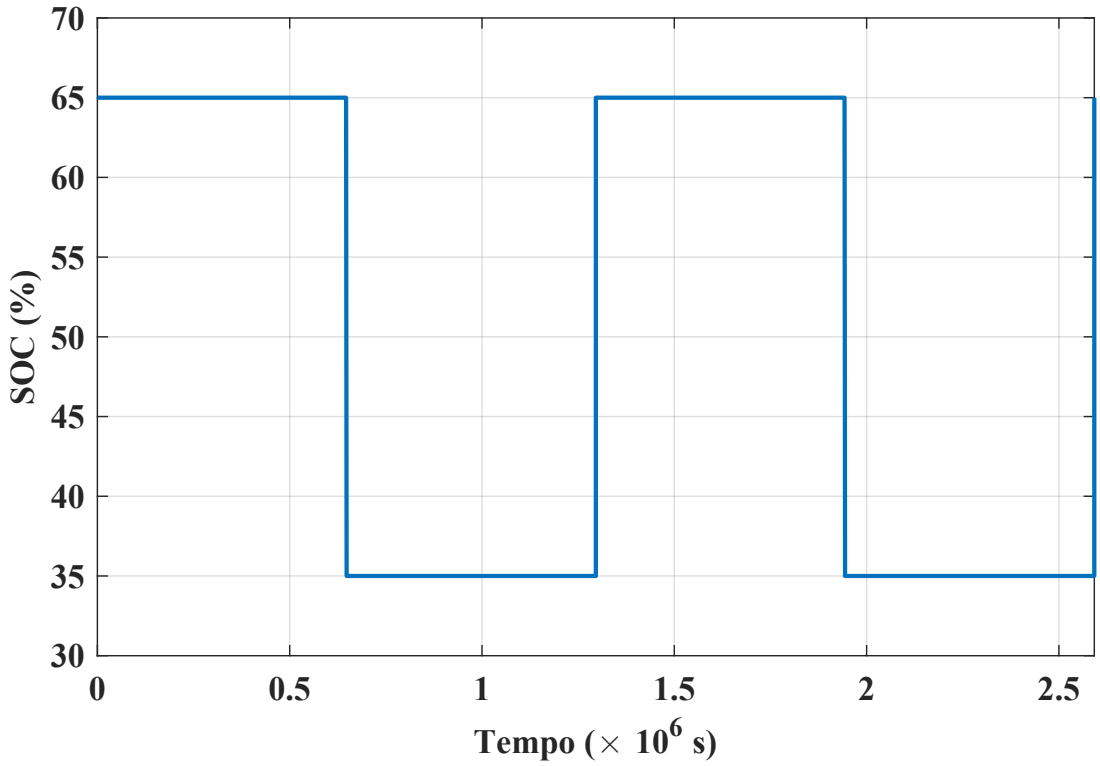


Fonte: (Autor)

Visando validar a componente de calendário do estimador, realizou-se um ensaio similar utilizando uma forma de onda quadrada. A Figura 14 apresenta o perfil de SOC adotado para este cenário.

De maneira similar, este perfil compõe-se de dois ciclos com $SOC_m = 50\%$, $DoD = 30\%$, $T = 50°C$ e tempo de repouso $t = 0,25$ meses. Utilizando as Equações (2.4) e (3.10) para a degradação cíclica e as Equações (2.5) e (3.11) para o envelhecimento por calendário, obtiveram-se, respectivamente, as os valores de 0,1964% e 1,6427%. Tais valores apresentam exata concordância com o resultado obtido na simulação do modelo.

Figura 14 – Perfil de SOC quadrado para validação da degradação por calendário.



Fonte: (Autor)

Conclui-se, portanto, que os ensaios de validação básica confirmaram a consistência física e matemática do modelo desenvolvido. A concordância numérica exata nos testes de degradação assegura a correta implementação algorítmica das equações de envelhecimento. Dessa forma, considera-se o modelo validado e apto para ser submetido aos cenários de operação nas etapas subsequentes deste trabalho.

3.5 CONSIDERAÇÕES PARCIAIS

Neste capítulo, detalhou-se o desenvolvimento e a implementação do modelo computacional em ambiente MATLAB/Simulink, estruturado para processar perfis de potência e estimar a degradação do BESS ao longo de um horizonte de planejamento. A metodologia baseou-se na representação da bateria através de um circuito elétrico equivalente (modelo ZARC), cujos parâmetros $(R_s, R_1, R_2, Q_1, Q_2)$ são atualizados dinamicamente, permitindo simular o comportamento do BESS longo do tempo.

A arquitetura da simulação foi dividida em dois subsistemas principais: o Estimador de SOC, que utiliza o método de contagem de Coulomb para rastrear o estado de carga , e o Estimador de Degradação, que aplica o algoritmo *rainflow* para decompor os ciclos de operação e calcular os danos de fadiga cíclica e envelhecimento temporal.

Um outro ponto do desenvolvimento foi a criação de um gerador de perfis sintéticos fundamentado na dinâmica longitudinal do veículo. Esta ferramenta mitiga a escassez de

dados reais, permitindo a criação de cenários operacionais parametrizáveis (inclinação, carga e velocidade) que respeitam o balanço energético físico do caminhão.

Por fim, a validação básica do modelo de degradação realizada com formas de onda padrão confirmou a precisão matemática dos algoritmos implementados, assegurando que o modelo está apto para as simulações de cenários reais apresentadas no próximo capítulo

4 RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir das simulações realizadas com o modelo computacional desenvolvido. O objetivo central consiste em avaliar o desempenho do BESS e quantificar a degradação acumulada ao longo do horizonte de planejamento, validando a aplicação da tecnologia LFP frente às exigências de caminhões fora de estrada.

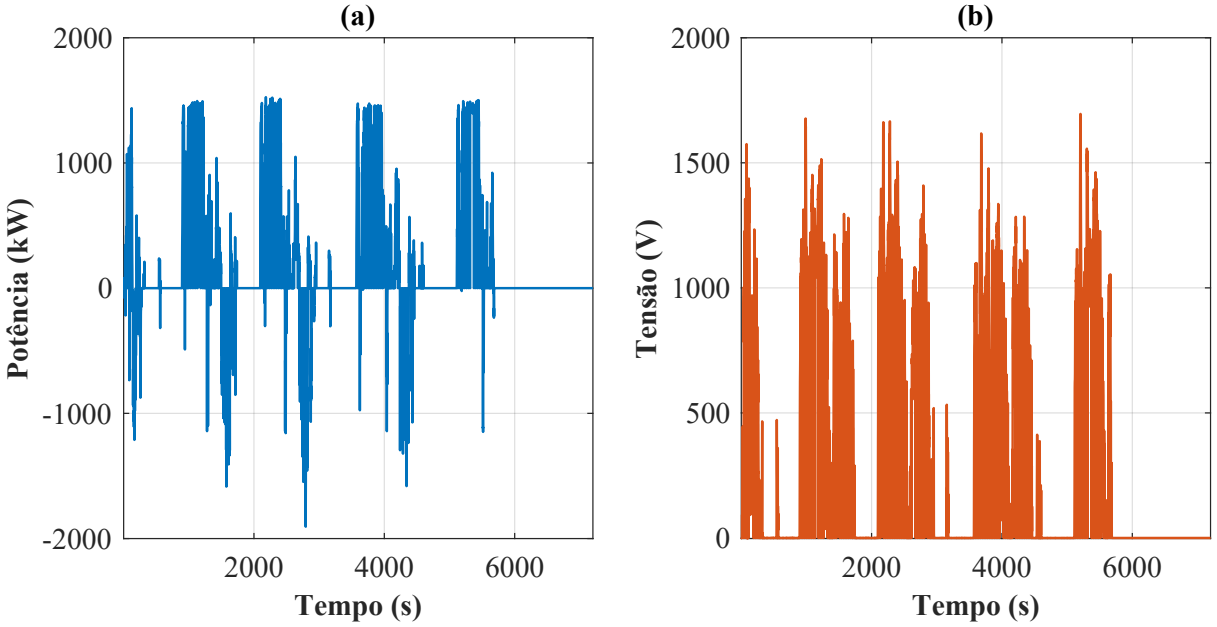
A fim de garantir a representatividade da análise frente a diferentes perfis operacionais, o estudo submete o modelo a três perfis de potência reais distintos, obtidos a partir de dados de campo de mineração e um perfil de potência artificial, obtido a partir do gerador de perfis sintéticos discutido anteriormente. Em consonância com a metodologia de avaliação demonstrada na seção **3.1.2**, a análise de cada cenário inicia-se pela apresentação dos gráficos de demanda de potência e de comportamento da tensão de barramento, apresentadas nas Figuras 15, 16, 17 e 18. Estas curvas constituem a base para o dimensionamento da topologia do BESS, permitindo a especificação adequada do arranjo de células (série e paralelo) necessário para atender aos requisitos de potência e segurança operacional específicos de cada perfil de missão. Adicionalmente, o perfil sintético não apresenta um perfil de tensão para o dimensionamento do BESS, por isso será considerado uma tensão objetivo de 1400V.

De acordo com a lógica apresentada na seção **3.1.2**, os seguintes arranjos para cada perfil foram considerados:

Tabela 2 – Parâmetros de dimensionamento e resultados alcançados.

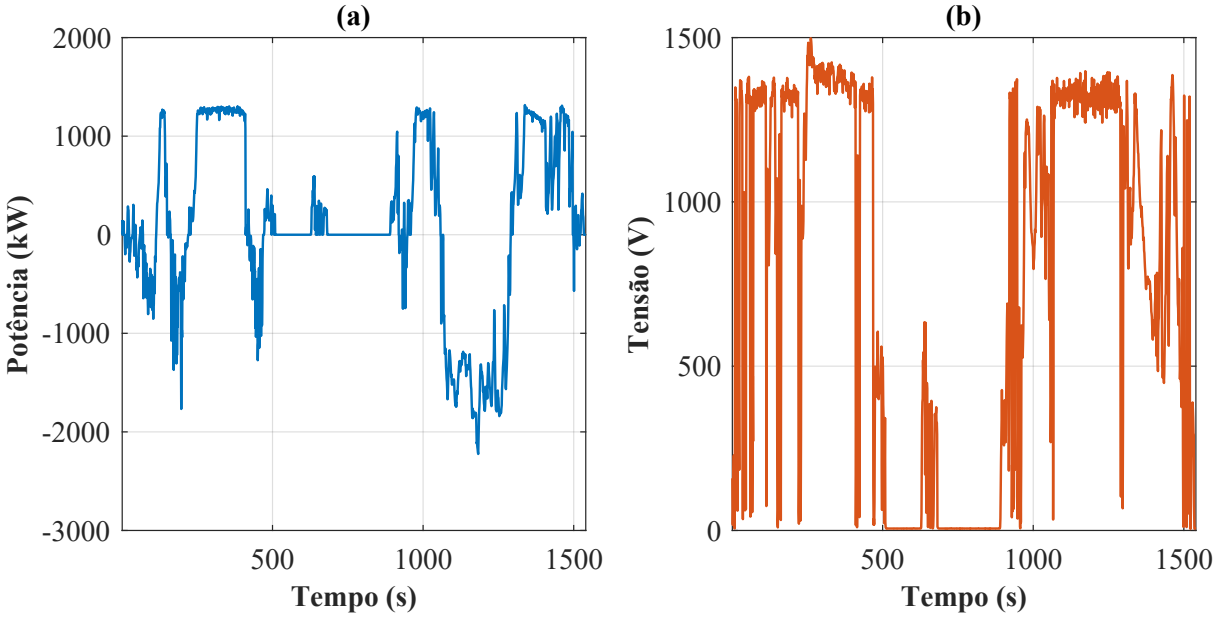
Perfil	Tensão Objetivo (V)	Corrente Objetivo (A)	Potência Objetivo (kW)	Nº Módulos em Série	Nº Módulos em Paralelo	Tensão Atingida (V)	Corrente Atingida (A)	Potência Atingida (kW)	Nº Células em Série	Nº Células em Paralelo
1	1300	1153,85	1500	16	59	1267,2	1180	1495,3	384	118
2	1400	1000	1400	17	52	1346,4	1040	1400,25	408	104
3	1300	1538,46	2000	16	77	1267,2	1540	1951,48	384	154
4	1400	1200	1680	17	60	1346,4	1200	1615,68	408	120

Figura 15 – Potência (a) e tensão (b) experimentais do perfil 1.



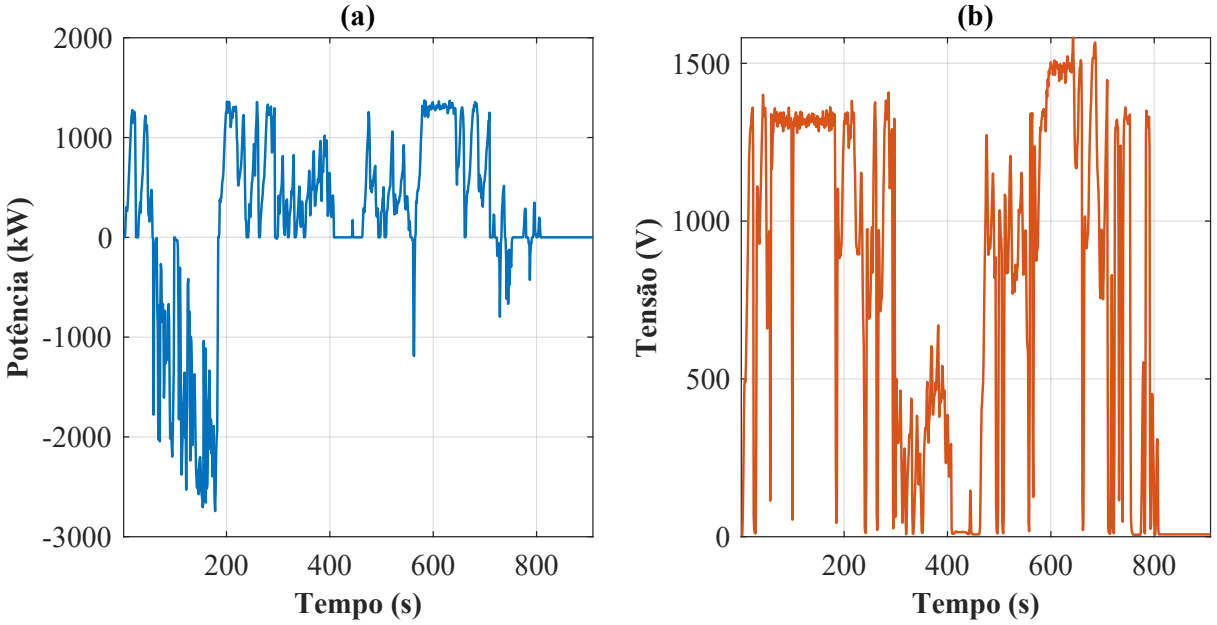
Fonte: (Autor)

Figura 16 – Potência (a) e tensão (b) experimentais do perfil 2.



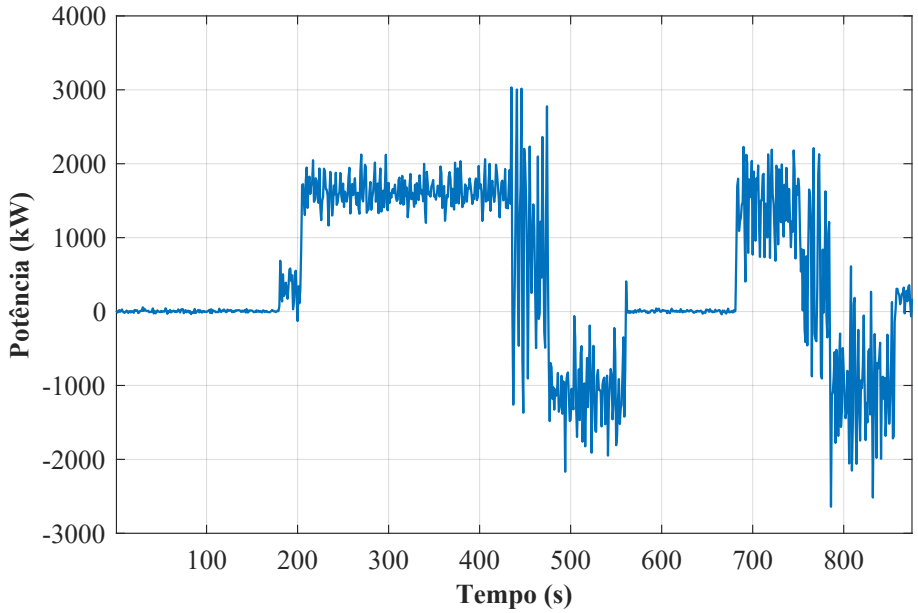
Fonte: (Autor)

Figura 17 – Potência (a) e tensão (b) experimentais do perfil 3.



Fonte: (Autor)

Figura 18 – Potência sintética perfil 4.

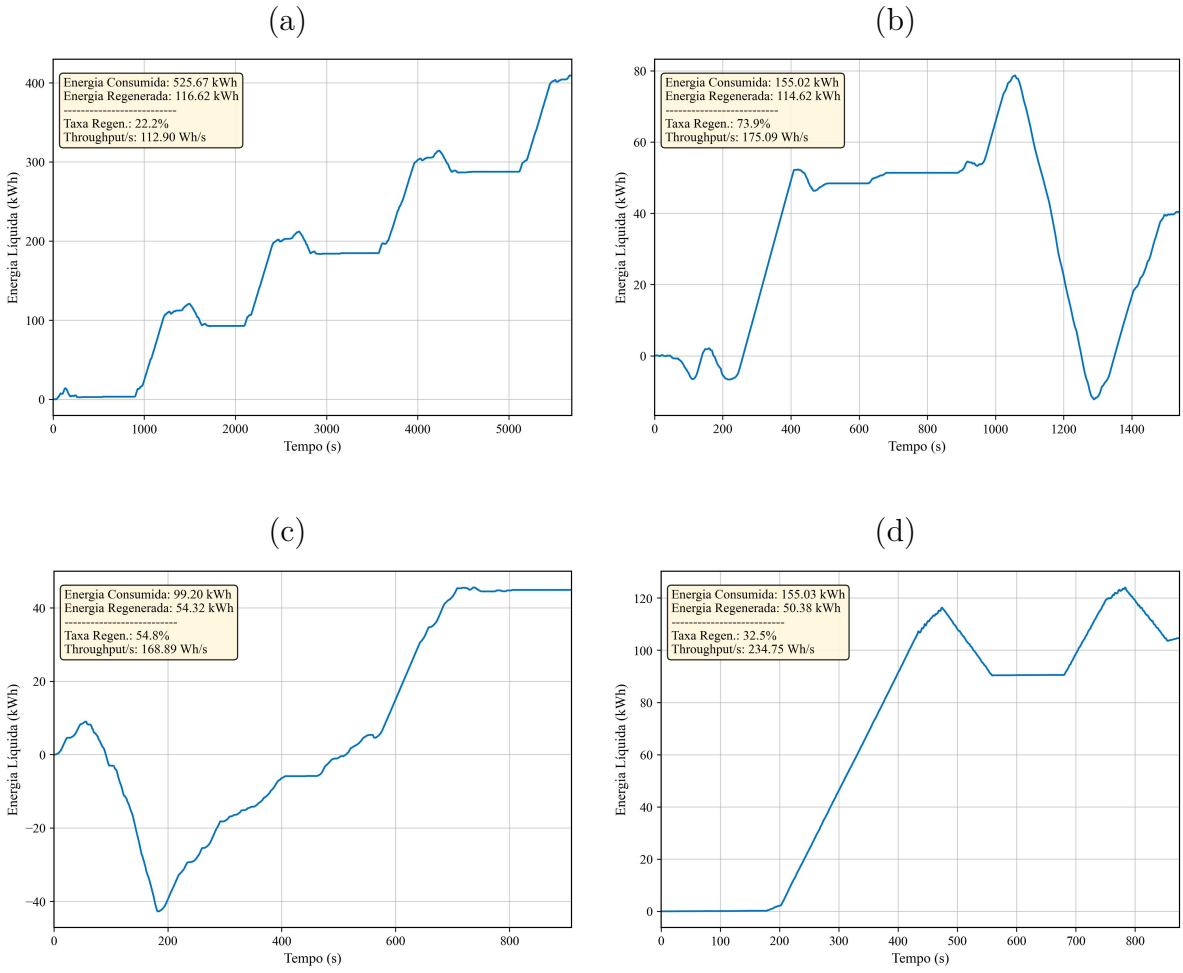


Fonte: (Autor)

A Figura 19 ilustra a evolução da energia acumulada para cada ciclo, obtida através da integração temporal dos dados de potência. Estes perfis permitem mensurar tanto a demanda energética total quanto o potencial de recuperação via frenagem regenerativa. A análise resulta em duas métricas principais: a taxa de regeneração, que indica a proporção de energia passível de recuperação, e o *throughput* energético normalizado pelo tempo (Wh/s), que quantifica o fluxo total de energia (carga e descarga) e reflete a intensidade

de uso da bateria. Os resultados indicam taxas de regeneração de 22,2%, 73,9%, 54,8% e 32,5% para os perfis 1, 2, 3 e 4 respectivamente. Em termos de intensidade de ciclagem, observou-se um *throughput* de 112,90 Wh/s no perfil 1, 175,09 Wh/s no perfil 2, 168,89 Wh/s no perfil 3 e 234,75 Wh/s no perfil 4.

Figura 19 – Energias líquidas experimentais: (a) Perfil 1, (b) Perfil 2, (c) Perfil 3 e sintética (d) Perfil 4.



Fonte: (Autor)

4.1 ANÁLISE DAS VARIÁVEIS ELÉTRICAS DO SISTEMA

Para a simulação, foram adotados os limites operacionais discutidos na seção **3.1.2**, $SOC_{min} = 20\%$ e $SOC_{max} = 80\%$ e $SOC_i = 20\%$, bem como uma temperatura constante de operação de 35ºC, ou 308,15K. O horizonte de simulação adotado foi de 12 meses.

As Figuras 20, 21, 22 e 23 apresentam os resultados de métricas elétricas intermediarias, consequências imediatas dos efeitos da degradação do banco de baterias.

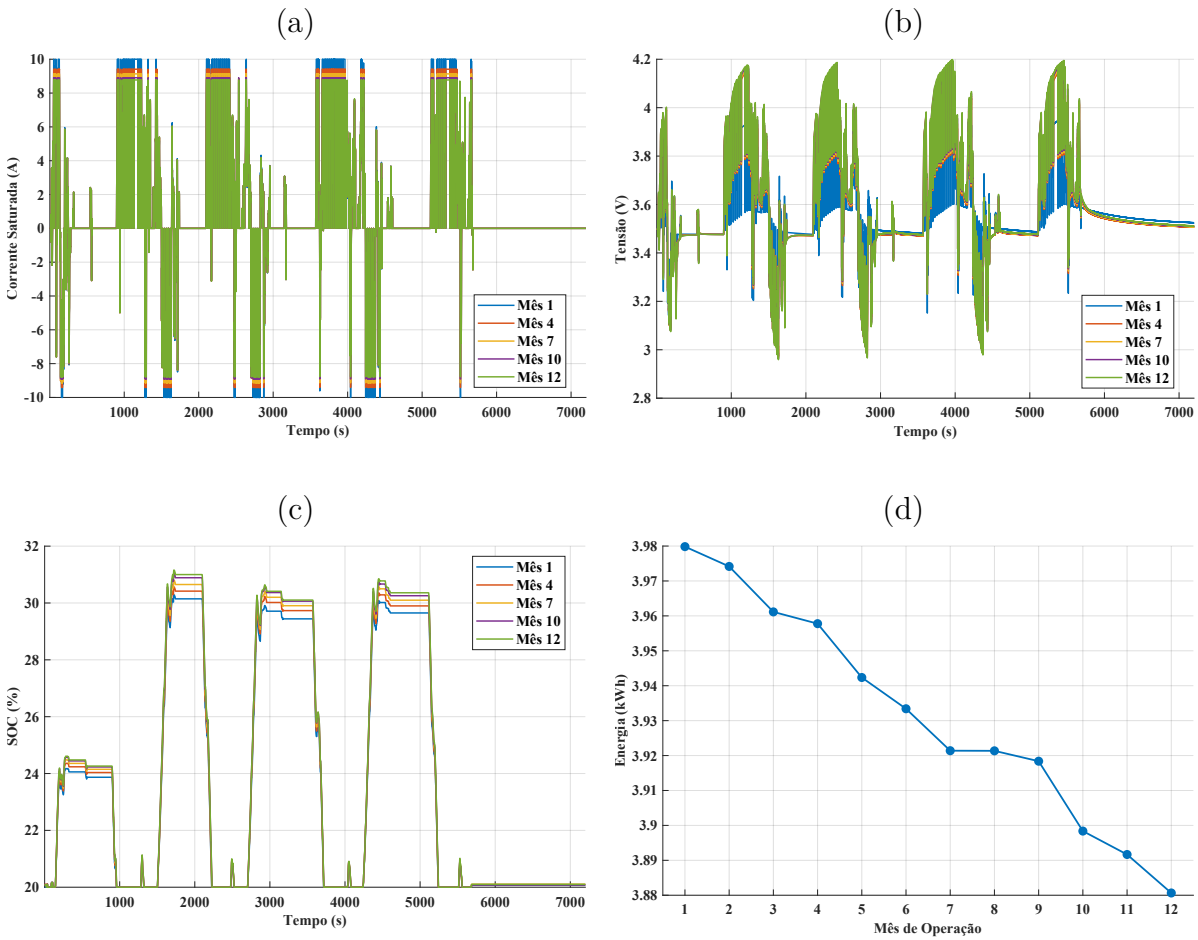
As Figuras 20c, 21c, 22c e 23c ilustram o efeito resultante da interação de dois fenômenos simultâneos. O primeiro aspecto refere-se à definição do SOC em relação à capacidade máxima atual: para uma mesma quantidade de energia absorvida, a redução

da capacidade total (C_{atual}) implica em uma maior variação percentual do SOC. Em contrapartida, conforme evidenciado nas Figuras 20a, 21a, 22a e 23a, bem como das figuras 20d, 21d, 22d e 23d o aumento da degradação da capacidade torna a limitação de corrente (Eq. (3.9)) mais restritiva. Isso ocasiona o corte de picos de corrente regenerativa e, consequentemente, uma menor injeção de energia durante esses eventos, o que tenderia a reduzir a variação do SOC. Contudo, a soma desses fenômenos indica que o efeito da redução de capacidade predomina, resultando em uma maior excursão do SOC conforme a bateria envelhece.

Paralelamente, as Figuras 20b, 21b, 22b e 23b demonstra o impacto do aumento da impedância interna. Através dos perfis de tensão plotados trimestralmente até o décimo segundo mês, observa-se uma notável ampliação da excursão de tensão em ambos os sentidos de corrente. Este comportamento é consequência direta da elevação da impedância interna, que intensifica a queda de tensão durante a circulação de corrente pela célula.

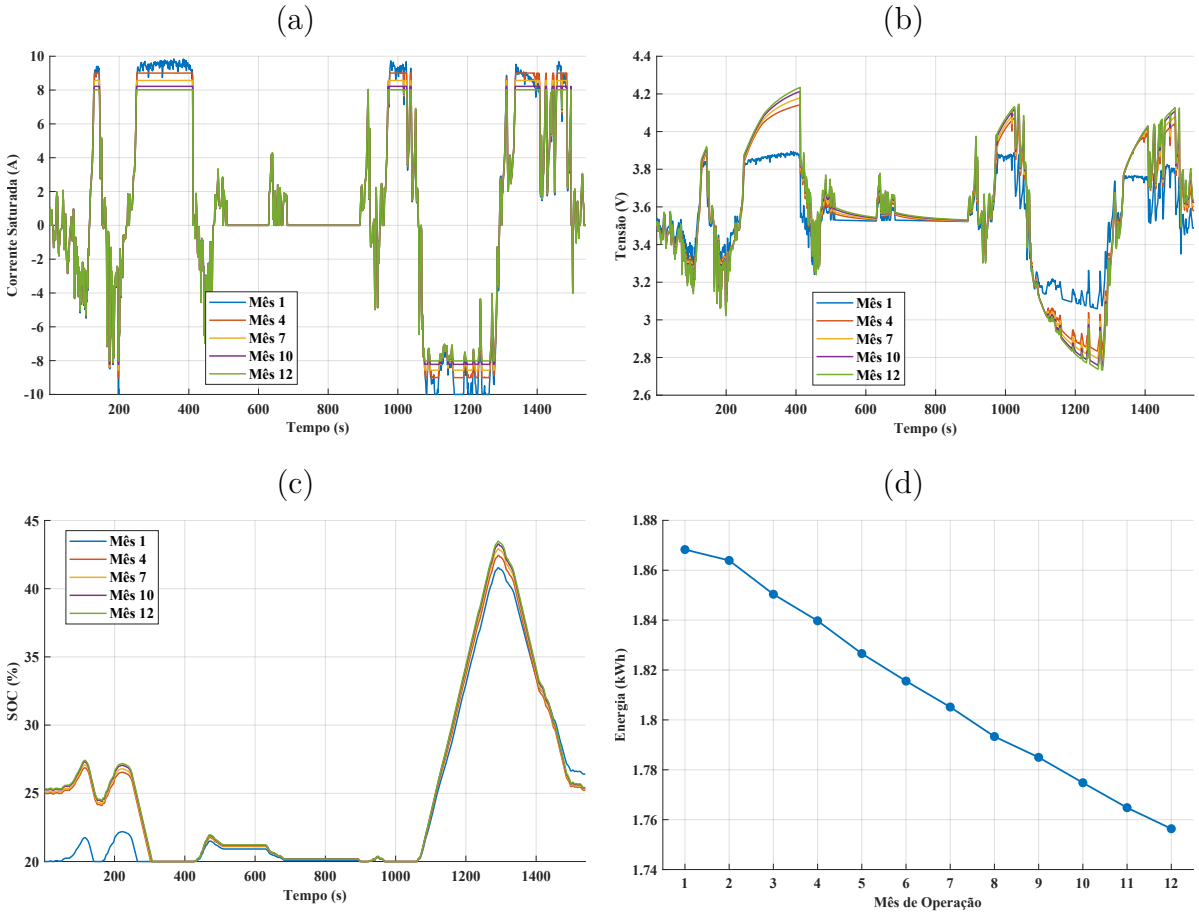
Em suma, os resultados obtidos validam a consistência física do modelo e a adequação do dimensionamento proposto frente aos perfis de carga. A análise conjunta dos indicadores intermediários demonstra a capacidade da ferramenta em capturar fenômenos complexos de envelhecimento, como a interação entre a saturação de corrente e a perda de capacidade, fornecendo uma base sólida para a estimativa da vida útil e para o planejamento operacional do sistema de armazenamento.

Figura 20 – Resultados para o perfil de potência experimental 1: (a) Corrente, (b) Tensão, (c) SOC e (d) Energia regenerada por ciclo mensal.



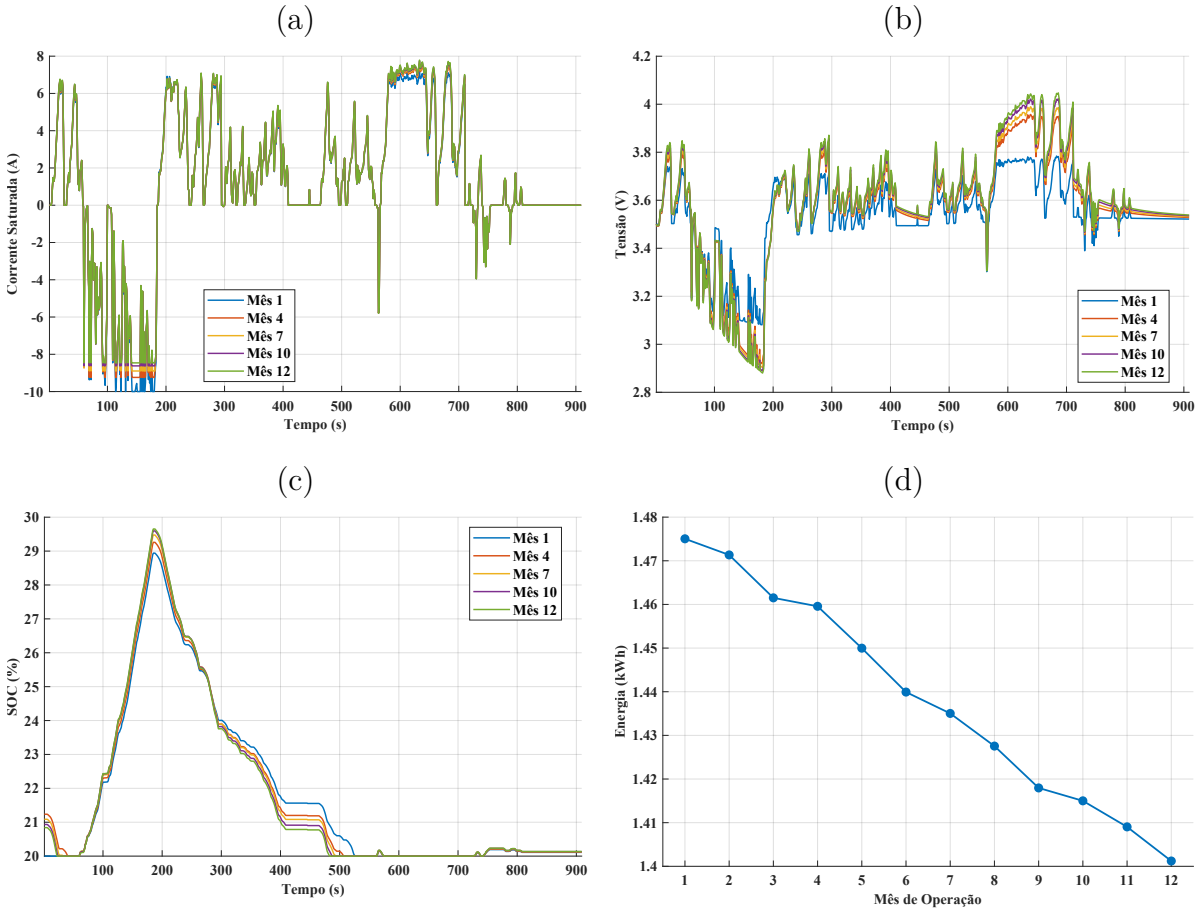
Fonte: (Autor)

Figura 21 – Resultados para o perfil de potência experimental 2: (a) Corrente, (b) Tensão, (c) SOC e (d) Energia regenerada por ciclo mensal.



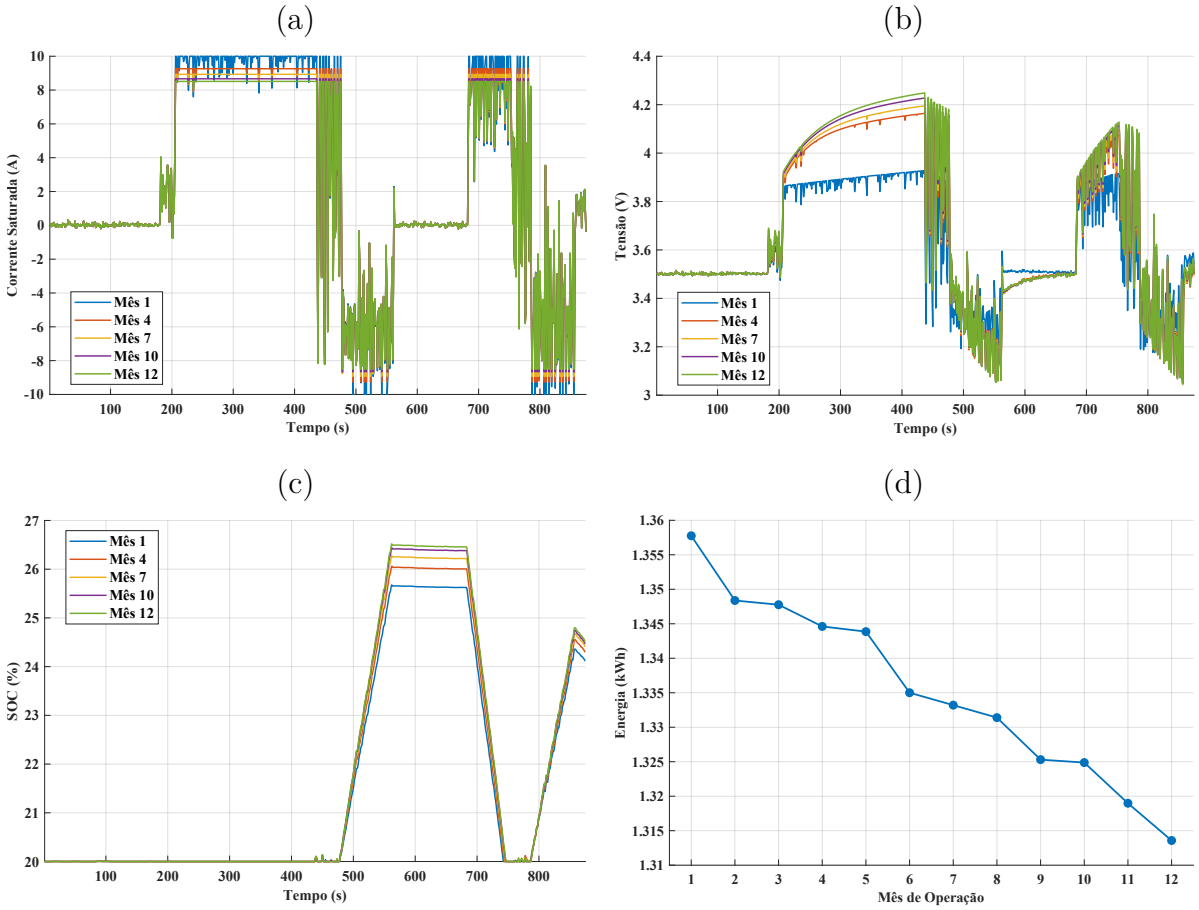
Fonte: (Autor)

Figura 22 – Resultados para o perfil de potência experimental 3: (a) Corrente, (b) Tensão, (c) SOC e (d) Energia regenerada por ciclo mensal.



Fonte: (Autor)

Figura 23 – Resultados para o perfil de potência sintético 4: (a) Corrente, (b) Tensão, (c) SOC e (d) Energia regenerada por ciclo mensal.



Fonte: (Autor)

4.2 ANÁLISE DE DEGRADAÇÃO DAS BATERIAS

Esta seção tem como objetivo quantificar a degradação acumulada do BESS, meta central do modelo proposto.

A Figura 24 apresenta o comparativo da perda de capacidade da bateria para os perfis analisados, decompondo o efeito total (Figura 24c) nas parcelas de envelhecimento de calendário (Figura 24a) e cíclico (Figura 24b).

Observa-se um decaimento acentuado nos meses iniciais, o qual se atenua progressivamente. Embora a maior excursão do SOC (agravada com o aumento da degradação, conforme explicado na seção anterior) sugira intuitivamente um estresse crescente, esse comportamento é justificado pela modelagem matemática adotada (equações (3.11) e (3.10)). Tais formulações consideram o estado de saúde prévio, de modo que, quanto mais degradada a célula estiver no início do período, menor será o impacto do ciclo atual na degradação total.

Nota-se uma correlação direta entre as métricas energéticas definidas na Seção

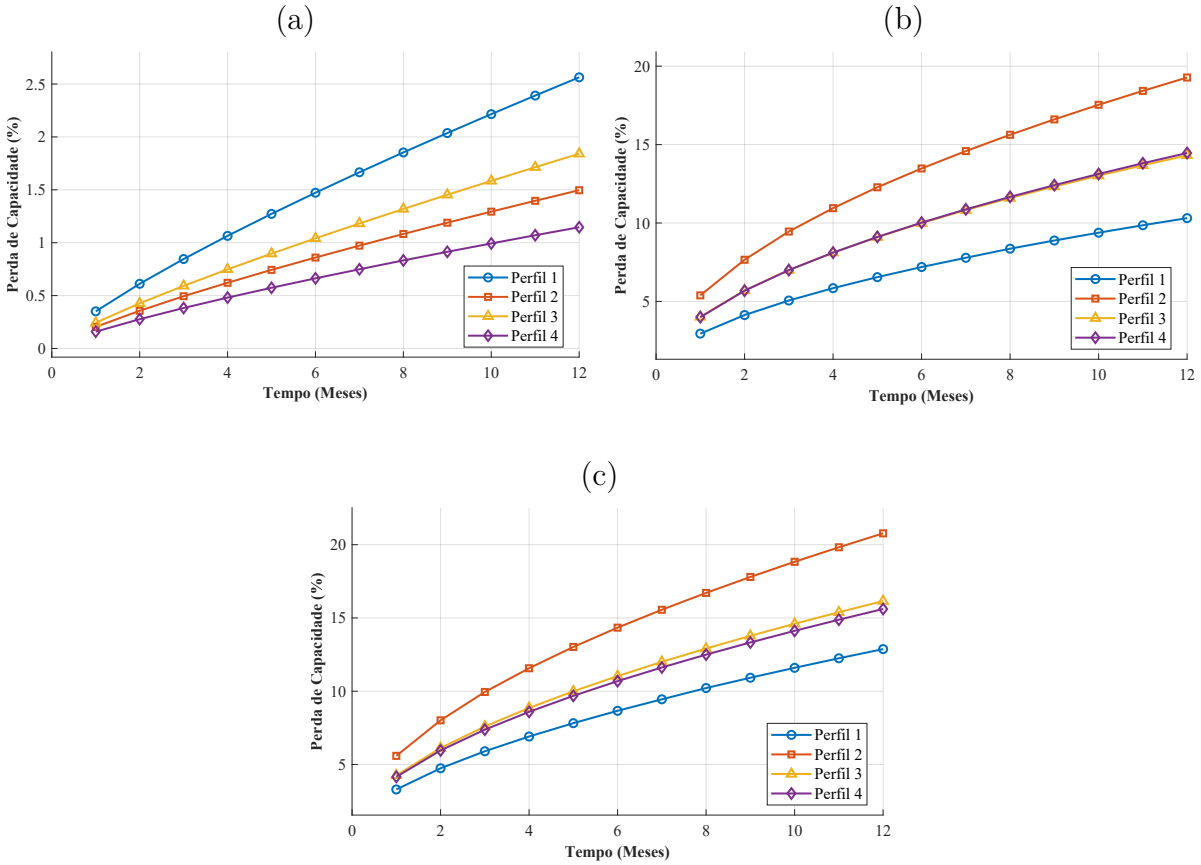
4 e a degradação da capacidade do BESS. A análise dos resultados revela que o Perfil 2, que possui maior taxa de regeneração (73,9%), sofreu a perda de capacidade mais acentuada, apesar de não registrar o maior *throughput* entre os cenários simulados. Em contrapartida, o Perfil 1 exibiu os menores índices para ambas as métricas (22,2% e 112,90 Wh/s), resultando no menor desgaste acumulado.

Observa-se, ainda, um comportamento particular entre os Perfis 3 e 4, que apresentaram níveis de degradação cíclica muito próximos ao longo de todo o horizonte de planejamento. Essa similaridade ocorre apesar da discrepância significativa nas taxas de regeneração (54,8% e 32,5%, respectivamente), sendo compensada pelo fato de o *throughput* do Perfil 4 ser aproximadamente 39% superior ao do Perfil 3.

Tal constatação, aliada ao fato de o Perfil 2 (que possui a maior taxa de regeneração) ter apresentado a degradação mais severa, evidencia que a taxa de regeneração exerce uma influência maior sobre a degradação cíclica do BESS, superando o peso do *throughput* na severidade do envelhecimento.

Por fim, destaca-se que o Perfil 2 atingiu, ao final do décimo segundo mês, uma degradação acumulada de capacidade superior 20%. Caso fosse adotado estritamente o padrão da indústria para o fim de vida útil com SoH de 80%, a substituição do pack de baterias seria mandatória. No entanto, a análise das Figuras 21a e 21d revela que as perdas energéticas decorrentes da degradação ainda são pouco expressivas neste estágio. Isso indica que, mediante um gerenciamento térmico adequado, a extensão da operação do banco de baterias abaixo de 80% de SoH pode se manter técnica e economicamente viável.

Figura 24 – Comparativo da degradação do BESS para os perfis de potência: (a) Degradação de calendário, (b) Degradação cíclica e (c) Degradação total acumulada.



Fonte: (Autor)

O modelo de circuito elétrico equivalente adotado, detalhado na Figura 3, é composto por cinco elementos principais: R_s, R_1, R_2, Q_1 e Q_2. A evolução desses parâmetros de impedância interna para os cenários simulados é apresentada na Figura 25,

Como explicado anteriormente na seção **3.1.1**, a atualização desses parâmetros assume um desacoplamento entre os modos de degradação, onde os componentes de dinâmica rápida (R_1, Q_1) são associados à degradação de calendário e os componentes de dinâmica lenta (R_2, Q_2) são associados à degradação cíclica.

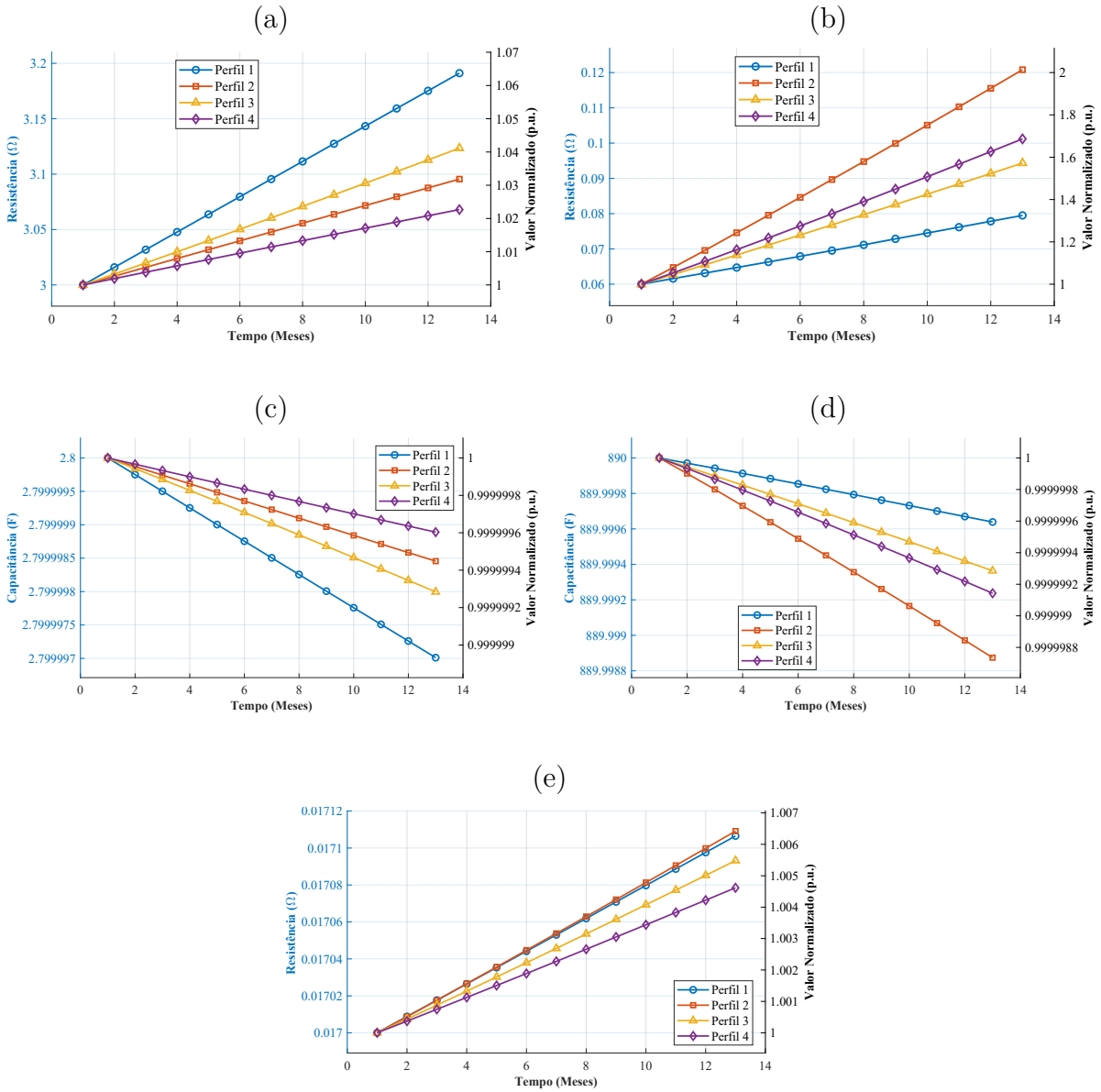
Os resultados corroboram esse comportamento físico, evidenciando que o elevado estresse de ciclagem imposto pelos perfis analisados provoca uma variação em R_2 significativamente superior à observada em R_1. No cenário mais crítico, o incremento de R_2 supera 1 p.u., ao passo que a variação de R_1 limita-se a 0,1 p.u.

Adicionalmente, ratifica-se esse comportamento também, ao se analisar os termos R_1 e Q_1, onde os perfis que apresentam maior degradação de calendário, também apresentam maior degradação nessas impedâncias. O mesmo acontece para R_2 e Q_2 quando analisada a degradação cíclica.

Vale lembrar que o valor das capacitâncias decaem conforme a degradação aumenta

pois, na Equação (3.1), a capacitância é um fator do denominador, ou seja, valores menores aumentam a impedância resultante.

Figura 25 – Evolução normalizada dos parâmetros do modelo CEE: (a) R1, (b) R2, (c) Q1, (d) Q2 e (e) Rs.



Fonte: (Autor)

A tabela 3, apresenta um resumo dos perfis analisados, suas métricas energéticas, e seus resultados de degradação ao final do horizonte de 12 meses.

Tabela 3 – Resumo comparativo das métricas energéticas e degradação final para os perfis simulados.

Perfil	**Taxa Regen.** [%]	***Throughput*/s** [Ah/s]	C_{cyc} [%]	C_{cal} [%]	C_f [%]	R_s [p.u.]	R_1 [p.u.]	R_2 [p.u.]	Q_1 [p.u.]	Q_2 [p.u.]
Perfil 1	22,2	112,90	10,310	2,563	12,874	1,0063	1,0637	1,3250	0,9999989	0,9999995
Perfil 2	73,9	175,09	19,279	1,496	20,775	1,0064	1,0318	2,0135	0,9999994	0,9999987
Perfil 3	54,8	168,89	14,312	1,841	16,153	1,0055	1,0411	1,5723	0,9999992	0,9999992
Perfil 4	32,5	234,75	14,465	1,146	15,611	1,0046	1,0227	1,6867	0,9999996	0,9999991

4.3 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Os resultados discutidos na seção anterior basearam-se em condições de contorno fixas, como uma temperatura de operação constante de $35°C$ e perfis de missão determinísticos. No entanto, a operação real de caminhões de mineração está sujeita a incertezas e variabilidades ambientais e operacionais. Desta forma, esta seção dedica-se à análise de sensibilidade do modelo de degradação proposto.

O objetivo é quantificar isoladamente a influência de parâmetros de estresse sobre a velocidade de envelhecimento do BESS. Essa análise permite identificar quais variáveis atuam como os aceleradores preponderantes da degradação, fornecendo subsídios para estratégias de gerenciamento térmico e logístico mais eficientes, equilibrando produtividade e preservação do ativo.

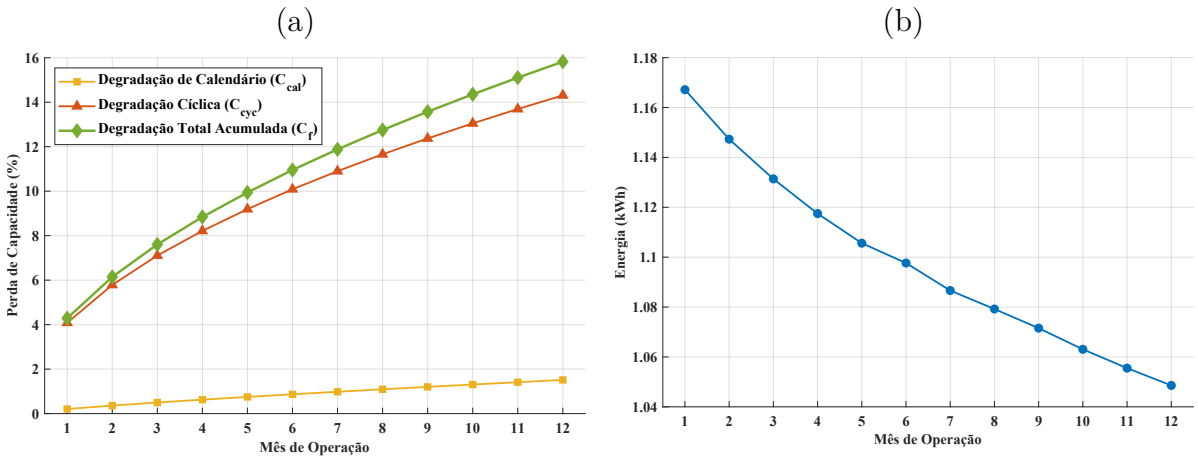
Para a execução desta análise, elegeu-se o Perfil 2 como caso-base para a variação paramétrica. A seleção deste perfil justifica-se pela sua severidade operacional: ao apresentar o maior índice de taxa de regeneração entre os cenários estudados, ele intensifica os processos de degradação. Essa condição de estresse elevado permite isolar e identificar com maior clareza a sensibilidade da degradação da capacidade do BESS frente às alterações das variáveis de entrada.

A primeira análise investiga o efeito da limitação da corrente de operação. Para este cenário, reduziu-se o limite de taxa de descarga (C_{rate}) de 4C (nominal) para 2C, mantendo-se as demais variáveis constantes. Os resultados são apresentados na Figura 26. Ao comparar este cenário com o caso base (apresentado na Figura 21b), observa-se uma redução significativa na degradação acumulada. Enquanto o cenário original ultrapassou 20% de perda de capacidade ao final de 12 meses, a limitação em 2C conteve a degradação total em patamares próximos a 16% (Figura 26a). Tal fenômeno fundamenta-se na saturação da corrente elétrica: ao impor um limite mais restritivo, os picos de potência regenerativa sofrem corte. Esse processo reduz o fluxo energético efetivo absorvido pelo BESS e, consequentemente, diminui a amplitude de excursão do SOC, atenuando os vetores de estresse que aceleram a degradação.

Contudo, a Figura 26b evidência a escolha conflituosa dessa estratégia: a energia absorvida mensalmente caiu drasticamente, situando-se entre 1,04 kWh e 1,17 kWh, em

contraste com os valores de 1,82 kWh a 1,90 kWh observados no cenário de 4C. Isso indica que limitar o C_{rate} preserva a bateria, mas compromete a capacidade do caminhão de aproveitar a frenagem regenerativa, desperdiçando energia potencial nos resistores de frenagem.

Figura 26 – Resultados para o perfil 2 com $C_{rate} = 2$: (a) Evolução mensal da degradação de capacidade e (b) Energia absorvida mensalmente.



Fonte: (Autor)

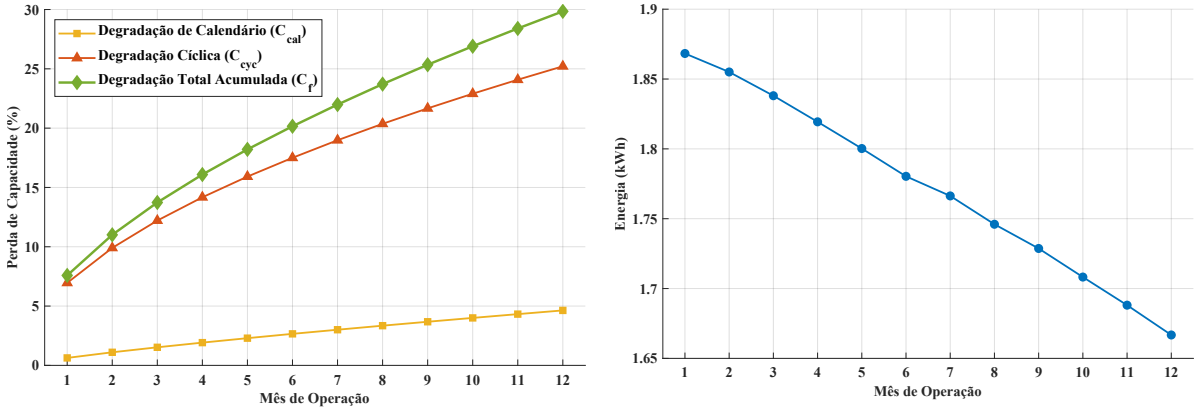
A segunda análise avalia a influência térmica, elevando a temperatura de operação de 35°C para 50°C. Este cenário simula uma condição de falha no sistema de refrigeração ou operação em ambientes sem o devido gerenciamento térmico. Os resultados são ilustrados na Figura 27.

A temperatura demonstrou ser o fator mais agressor à vida útil do BESS. Conforme evidenciado na Figura 27a, a degradação total acumulada aumenta drasticamente, atingindo aproximadamente 30% de perda de capacidade ao final do período. Esse aumento severo deve-se à aceleração das reações químicas parasitas, notadamente o crescimento da camada SEI e a perda de lítio ciclável, processos descritos pela equações (2.4) e (2.5).

A Figura 27b mostra que a energia absorvida se mantém na faixa de 1,65 kWh a 1,87 kWh, valores próximos ao cenário base porém menores, considerando a maior degradação na capacidade do BESS. Isso demonstra que, diferentemente da limitação de corrente, a temperatura não impede o fluxo de energia imediato, mas exerce um efeito de degradação acelerado na saúde do ativo.

Figura 27 – Resultados para o perfil 2 com $T = 50^{o}$C: (a) Evolução mensal da degradação de capacidade e (b) Energia absorvida mensalmente.

(a) (b)



Fonte: (Autor)

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho cumpriu seu objetivo geral ao desenvolver e implementar um ambiente de simulação computacional para a estimativa de degradação de sistemas de armazenamento de energia a baterias (BESS) aplicados a caminhões de mineração híbridos e elétricos. A metodologia proposta permitiu quantificar o impacto de perfis de missão severos sobre a vida útil de baterias de Lítio-Ferro-Fosfato (LFP), fornecendo métricas essenciais para o planejamento de ativos em operações de mina a céu aberto.

A principal contribuição deste estudo reside na estruturação de um modelo de simulação modular e reproduzível em ambiente MATLAB/Simulink. A integração eficaz entre o modelo de circuito elétrico equivalente (ZARC), o estimador de SOC por contagem de Coulomb e o algoritmo estimador de degradação permitiu simular a dinâmica de envelhecimento com precisão satisfatória frente às equações teóricas.

Os resultados obtidos evidenciaram o impacto crítico das estratégias de recuperação de energia na durabilidade do BESS. As simulações demonstraram que perfis com altas taxas de regeneração (como o Perfil 2, com 73,9% de regeneração) impõem um throughput energético significativamente maior, acelerando a degradação cíclica. Foi observado que, em cenários de alta demanda, a perda de capacidade pode ultrapassar 20% ao final de um horizonte de 12 meses, sugerindo que o simples cumprimento dos limites de SOC não é suficiente para garantir a longevidade do ativo sem um dimensionamento térmico e de potência adequados.

Complementarmente, a análise de sensibilidade permitiu hierarquizar os fatores de estresse que impactam a vida útil do BESS. Ficou evidenciado que a temperatura é o vetor mais crítico: uma elevação de 15°C na operação resultou em um aumento abrupto na taxa de degradação, podendo elevar a perda de capacidade em até 50%, comparado com o caso de temperatura operacional normal, no mesmo período. Por outro lado, a investigação sobre a limitação da taxa de corrente (C_{rate}) revelou um importante dilema operacional. Embora a restrição da corrente de 4C para 2C tenha atenuado o envelhecimento, ela comprometeu drasticamente a eficiência energética do sistema, reduzindo a energia regenerada em cerca de 40%. Esses resultados sublinham que a longevidade do ativo depende não apenas do perfil da mina, mas de um sistema de gerenciamento térmico adequado e de um dimensionamento preciso dos parâmetros do BESS, que deve equilibrar a preservação da bateria com a meta de economia de combustível.

Adicionalmente, o desenvolvimento do gerador de perfis sintéticos constitui uma contribuição relevante para a superação da escassez de dados de campo. A ferramenta, fundamentada na dinâmica longitudinal do veículo, provou-se capaz de criar cenários operacionais plausíveis e parametrizáveis, permitindo a exploração de diferentes topologias de lavra e a análise de sensibilidade do BESS antes mesmo da implementação física da

frota. Dada a relevância dessa ferramenta, o aprofundamento de suas capacidades, bem como a validação dos perfis gerados frente a dados reais, será explorada de forma mais aprofundada em trabalhos futuros.

Apesar da consistência dos resultados obtidos, o modelo apresenta limitações inerentes às simplificações adotadas. A principal restrição refere-se à ausência de um modelo térmico dinâmico acoplado. As simulações consideraram uma temperatura de operação constante (fixada em 35°C), assumindo a existência de um sistema de gerenciamento térmico ideal. No entanto, em operações reais, os picos de corrente de tração e frenagem geram calor por efeito Joule que, se não dissipado instantaneamente, eleva a temperatura interna da célula, acelerando reações de degradação de forma não linear, o que não foi capturado nesta modelagem.

Outra limitação tange à parametrização do modelo de envelhecimento. Os coeficientes das equações semi-empíricas de degradação e os parâmetros do circuito equivalente foram extraídos da literatura para uma célula LFP comercial genérica, e não obtidos através de ensaios experimentais específicos para as células que comporiam um pack de mineração de alta tensão. Além disso, a validação do trabalho restringiu-se ao ambiente de simulação, não contemplando validações experimentais em bancada ou em campo.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Visando o aprimoramento da ferramenta e a continuidade da pesquisa, sugerem-se as seguintes abordagens para trabalhos futuros:

- Incorporar um modelo térmico nodal que calcule a temperatura da bateria em função da corrente instantânea e da resistência térmica do BESS, permitindo avaliar o impacto do aquecimento transiente na degradação e na segurança operacional.
- Realizar ensaios de envelhecimento acelerado em laboratório com células de lítio destinadas a aplicações pesadas, visando levantar parâmetros de degradação próprios para refinar a precisão do modelo semi-empírico.
- Aprimorar o algoritmo de geração de perfis para incluir correlações mais complexas entre a topografia da mina (curvas, resistência ao rolamento variável) e o comportamento estocástico do condutor.
- Integrar o modelo de degradação a uma análise de Custo Total de Propriedade (TCO), cruzando os dados de perda de vida útil com a economia de combustível proporcionada pela frenagem regenerativa, para determinar o ponto ótimo econômico de substituição das baterias e o dimensionamento ideal do BESS.
- Criar funções que mapeiem parâmetros de desempenho e degradação baseadas em métricas do perfil de potência (taxa de regeneração e throughput/s), utilizando perfis

sintéticos de operação para a validação preliminar dos modelos, seguidos de testes com perfis reais para confirmação dos resultados.

REFERÊNCIAS

1 HUND, K.; PORTA, D. L.; FABREGAS, T. P.; LAING, T.; DREXHAGE, J. *Minerals for Climate Action: The Mineral Intensity of the Clean Energy Transition*. Washington, D.C., 2020.

2 AZADI, M.; NORTHEY, S.; ALI, S.; EDRAKI, M. Transparency on greenhouse gas emissions from mining to enable climate change mitigation. *Nature Geoscience*, Springer Nature, v. 13, n. 2, p. 100–104, 2020.

3 MBOYO, H. L.; HUO, B.; MULENGA, F. K.; FOGANG, P. M.; KASONGO, J. K. K. Distribution of operating costs along the value chain of an open-pit copper mine. *Applied Sciences*, MDPI, v. 15, n. 3, 2025.

4 PARICHEH, M.; OSANLOO, M. Determination of the optimum in-pit crusher location in open-pit mining under production and operating cost uncertainties. In: *6th International Conference on Computer Applications in the Minerals Industries (CAMI)*. Istanbul, Turkey: CAMI, 2016. p. 1–8.

5 PORTO, P. H. E. *Análise descritiva da carga da frota de transporte de uma mineração a céu aberto*. Dissertação (Monografia (Especialização em Estatística)) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2022.

6 PONTT, J.; RODRIGUEZ, J.; HUERTA, R.; NEWMAN, P.; HOLTZ, J.; ALZAMORA, G. Recent advances in mining haul trucks. In: IEEE. *Conference Record of the 2006 IEEE Industry Applications Conference Forty-First IAS Annual Meeting*. [S.l.], 2006. v. 4, p. 1789–1796.

7 ESFAHANIAN, E.; MEECH, J. A. Hybrid electric haulage trucks for open pit mining. *IFAC Proceedings Volumes*, Elsevier, v. 46, n. 16, p. 104–109, 2013.

8 TRAVASSOS, F. C.; SOARES, G. M.; CUPERTINO, A. F. Sistema de armazenamento de energia para reaproveitamento energético em um caminhão fora de estrada para mineração. *Congresso Brasileiro de Automática - CBA*, SBA - Sociedade Brasileira de Automática, v. 4, n. 1, 2024.

9 ESAKA, T. et al. Development of battery electric rigid dump truck with trolley charging system. *Hitachi Review*, Hitachi, Ltd., v. 70, n. 4, p. 126–131, 2021.

10 CHIDAMBARAM, R. K.; CHATTERJEE, D.; BARMAN, B.; DAS, P. P.; TALER, D.; TALER, J.; SOBOTA, T. Effect of regenerative braking on battery life. *Energies*, MDPI, v. 16, n. 14, p. 5303, 2023.

11 MAREEV, I.; BECKER, J.; SAUER, D. U. Battery dimensioning and life cycle costs analysis for a heavy-duty truck considering the requirements of long-haul transportation. *Energies*, MDPI, v. 11, n. 1, p. 55, 2018.

12 VETTER, J.; NOVáK, P.; WAGNER, M. R.; VEIT, C.; MöLLER, K. C.; BESENHARD, J. O.; WINTER, M.; WOHLFAHRT-MEHRENS, M.; VOGLER, C.; HAMMOUCHE, A. Ageing mechanisms in lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, Elsevier, v. 147, n. 1-2, p. 269–281, 2005.

13 DOYLE, M.; FULLER, T. F.; NEWMAN, J. Modeling of galvanostatic charge and discharge of the lithium/polymer/insertion cell. *Journal of the Electrochemical Society*, IOP Publishing, v. 140, n. 6, p. 1526–1533, 1993.

14 RAMADESIGAN, V.; NORTHROP, P. W. C.; DE, S.; SANTHANAGOPALAN, S.; BRAATZ, R. D.; SUBRAMANIAN, V. R. Modeling and simulation of lithium-ion batteries from a systems engineering perspective. *Journal of the Electrochemical Society*, IOP Publishing, v. 159, n. 3, p. R31, 2012.

15 FOTOUHI, A.; AUGER, D. J.; PROPP, K.; LONGO, S.; WILD, M. A review on electric vehicle battery modelling: From li-ion toward li-s. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 56, p. 1008–1021, 2016.

16 SCHMALSTIEG, J.; KäBITZ, S.; ECKER, M.; SAUER, D. U. A holistic aging model for li(nimnco)o2 based 18650 lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, Elsevier, v. 257, p. 325–334, 2014.

17 ECKER, M.; NIETO, N.; KäBITZ, S.; SCHMALSTIEG, J.; BLANKE, H.; WARNECKE, A.; SAUER, D. U. Calendar and cycle life study of li(nimnco)o2-based 18650 lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, Elsevier, v. 248, p. 839–851, 2014.

18 SAXENA, S.; FLOCH, C. L.; MACDONALD, J.; MOURA, S. Quantifying ev battery end-of-life through analysis of travel needs with vehicle powertrain models. *Journal of Power Sources*, Elsevier, v. 282, p. 265–276, 2016.

19 SALDAÑA, G.; MARTÍN, J. I. S.; ZAMORA, I.; ASENSIO, F. J.; OÑEDERRA, O.; GONZÁLEZ, M. Empirical electrical and degradation model for electric vehicle batteries. *IEEE Access*, IEEE, v. 8, p. 155576–155589, 2020.

20 KEIL, P.; SCHUSTER, S. F.; WILHELM, J.; TRAVI, J.; HAUSER, A.; KARL, R. C.; JOSSEN, A. Calendar aging of lithium-ion batteries. i. impact of the cathode chemistry and state of charge. *Journal of The Electrochemical Society*, IOP Publishing, v. 163, n. 9, p. A1872–A1880, 2016.

21 XU, B.; OUDALOV, A.; ULBIG, A.; ANDERSSON, G.; KIRSCHEN, D. S. Modeling of lithium-ion battery degradation for cell life assessment. *IEEE Transactions on Smart Grid*, IEEE, v. 9, n. 2, p. 1131–1140, 2018.

22 HESSE, H. C.; SCHIMPE, M.; KUCEVIC, D.; JOSSEN, A. Lithium-ion battery storage for the grid—a review of stationary battery storage system applications. *Energies*, MDPI, v. 10, n. 12, p. 2107, 2017.

23 XU, B.; OUDALOV, A.; ULBIG, A.; ANDERSSON, G.; KIRSCHEN, D. S. Factoring the cycle aging cost of batteries participating in electricity markets. *IEEE Transactions on Power Systems*, IEEE, v. 33, n. 2, p. 2248–2259, 2018.

24 KEBEDE, A. A.; KALOGIANNIS, T.; MIERLO, J. V.; BERECIBAR, M. Techno-economic analysis of lithium-ion and lead-acid battery energy storage systems for stationary applications. *Journal of Energy Storage*, Elsevier, v. 40, p. 102748, 2021.

25 PREGER, Y.; BARKHOLTZ, H. M.; FRESQUEZ, A.; CAMPBELL, D. L.; JARRN, B. W.; FERREIRA, S. R. Degradation of commercial lithium-ion cells as a function of chemistry and cycling conditions. *Journal of The Electrochemical Society*, IOP Publishing, v. 167, n. 12, p. 120532, 2020.

26 FENG, X.; OUYANG, M.; LIU, X.; LU, L.; XIA, Y.; HE, X. Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: A review. *Energy Storage Materials*, Elsevier, v. 10, p. 246–267, 2018.

27 MIRZAEI, S.; FERNANDEZ, A. Retard system solution on electric mining trucks. In: *2012 IEEE International Symposium on Sensorless Control for Electrical Drives (SLED)*. Milwaukee, WI, USA: IEEE, 2012. p. 1–5.

28 KIISKI, T. *Comparison of High-Power DC-DC Converter Topologies for a Non-Road Mobile Machinery Application*. 1–85 p. Dissertação (Master's Thesis) — Lappeenranta-Lahti University of Technology LUT, Lappeenranta, Finland, 2023. School of Energy Systems, Electrical Engineering.

29 MAYER, R.; PéRES, A.; OLIVEIRA, S. V. G. Conversor cc-cc multifásico bidirecional em corrente não isolado aplicado a sistemas elétricos de tração de veículos elétricos e híbridos. *Eletrônica de Potência (SOBRAEP)*, SOBRAEP, v. 20, n. 3, p. 311–321, 2015.

30 OLIVEIRA, R. A. H. de; MATTOS, L. S.; FERREIRA, A. C.; STEPHAN, R. M. Regenerative braking of a linear induction motor used for the traction of a maglev vehicle. *Eletrônica de Potência*, SOBRAEP, v. 19, n. 3, p. 241–251, 2014.

31 MIAO, Y.; HYNAN, P.; JOUANNE, A. von; YOKOCHI, A. Current li-ion battery technologies in electric vehicles and opportunities for advancements. *Energies*, MDPI, v. 12, n. 6, p. 1074, 2019.

32 SHISHIN, D.; VOHIN, V.; VOROTNIKOV, A.; SHEVYREV, Y. Optimization of energy balance and powertrain for electric mining dump trucks in coal mine reclamation operations. *World Electric Vehicle Journal*, MDPI, v. 16, n. 11, p. 601, 2024.

33 KUSLAP, E.; LI, J.; TALEHATIBIEKE, A.; HITCH, M. Battery electric vehicles in underground mining: Benefits, challenges, and safety considerations. *Energies*, MDPI, v. 18, n. 14, p. 3588, 2025.

34 LINDGREN, L.; GRAUERS, A.; RANGGÅRD, J.; MÄKI, R. Drive-cycle simulations of battery-electric large haul trucks for open-pit mining with electric roads. *Energies*, MDPI, v. 15, n. 13, p. 4871, 2022.

35 ABB. *ABB eMine™: Mining electrification*. [S.l.]: ABB Group, 2025. Acessado em: 2025.

36 MAZUMDAR, M. et al. Energy consumption and battery size of battery trolley electric trucks in surface mines. *Energies*, MDPI, v. 17, n. 6, p. 1494, 2024.

37 HANNAN, M.; LIPU, M.; HUSSAIN, A.; MOHAMED, A. A review of lithium-ion battery state of charge estimation and management system in electric vehicle applications: Challenges and recommendations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 78, p. 834–854, 2017.

38 WIKNER, E.; THIRINGER, T. Extending battery lifetime by avoiding high soc. *Applied Sciences*, MDPI, v. 8, n. 10, p. 1825, 2018.

39 LU, L.; HAN, X.; LI, J.; HUA, J.; OUYANG, M. A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles. *Journal of Power Sources*, Elsevier, v. 226, p. 272–288, 2013.

40 EDGE, J.; O'KANE, S.; PROSSER, R. et al. Lithium ion battery degradation: what you need to know. *Physical Chemistry Chemical Physics*, Royal Society of Chemistry, v. 23, n. 14, p. 8200–8221, 2021.

41 MARTINEZ-LASERNA, E.; GANDIAGA, I.; SARASKETA-ZABALA, E.; BADEDA, J. et al. Battery second life: Hype, hope or reality? a critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 93, p. 701–718, 2018.

42 NG, K. S.; MOO, C. S.; CHEN, Y. P.; HSIEH, Y. C. Enhanced coulomb counting method for estimating state-of-charge and state-of-health of lithium-ion batteries. *Applied Energy*, Elsevier, v. 86, n. 9, p. 1506–1511, 2009.

43 ZHANG, J.; LEE, J. A review on prognostics and health monitoring of li-ion battery. *Journal of Power Sources*, Elsevier, v. 196, n. 15, p. 6007–6014, 2011.

44 PLETT, G. L. Extended kalman filtering for battery management systems of lipb-based hev battery packs: Part 1. background. *Journal of Power Sources*, Elsevier, v. 134, n. 2, p. 252–261, 2004.

45 BOLSI, P. C.; PRADO, E. O.; NAZARé, R. J.; SARTORI, H. C.; PINHEIRO, J. R. Simple method to estimate battery lifetime and upkeep of lead-acid and lithium-ion batteries. *Eletrônica de Potência (SOBRAEP)*, SOBRAEP, v. 29, p. e202456, 2024.

46 BARRé, A.; DEGUILHEM, B.; GROLLEAU, S.; GéRARD, M.; SUARD, F.; RIU, D. A review on lithium-ion battery ageing mechanisms and estimations for automotive applications. *Journal of Power Sources*, Elsevier, v. 241, p. 680–689, 2013.

47 WANG, J.; LIU, P.; HICKS-GARNER, J.; SHERMAN, E.; SOUKIAZIAN, S.; VERBRUGGE, M.; TATARIA, H.; MUSSER, J.; FINAMORE, P. Cycle-life model for graphite-lifepo4 cells. *Journal of Power Sources*, Elsevier, v. 196, n. 8, p. 3942–3948, 2011.

48 OMAR, N.; MONEM, M. A.; FIROUZ, Y.; SALMINEN, J.; SMEKENS, J.; HEGAZY, O.; GAULAS, H.; MULDER, G.; BOSSCHE, P. Van den; COOSEMANS, T.; MIERLO, J. V. Lithium iron phosphate based battery – assessment of the aging parameters and development of cycle life model. *Applied Energy*, Elsevier, v. 113, p. 1575–1585, 2014.

49 REDONDO-IGLESIAS, E.; VENET, P.; PELISSIER, S. Eyring equation adaptation to model lithium-ion batteries calendar life. *Journal of Energy Storage*, Elsevier, v. 19, p. 148–156, 2018.

50 STROE, D.-I. *Lifetime Models for Lithium-ion Batteries used in Virtual Power Plant Applications*. Tese (Doctoral Dissertation) — Aalborg University, Aalborg, Denmark, 2014.

51 WALDMANN, T.; WILKA, M.; KASPER, M.; FLEISCHHAMMER, M.; WOHLFAHRT-MEHRENS, M. Temperature dependent ageing mechanisms in lithium-ion batteries – a post-mortem study. *Journal of Power Sources*, Elsevier, v. 262, p. 129–135, 2014.

52 BERECIBAR, M.; GANDIAGA, I.; VILLARREAL, I.; OMAR, N.; MIERLO, J. V.; BOSSCHE, P. Van den. Critical review of state of health estimation methods of li-ion batteries for real applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 56, p. 572–587, 2016.

53 BROUSSELY, M.; BIENSAN, P.; BONHOMME, F.; BLANCHARD, P.; HERREYRE, S.; NECHEV, K.; STANIEWICZ, R. J. Main aging mechanisms in li-ion batteries. *Journal of Power Sources*, Elsevier, v. 146, n. 1-2, p. 90–96, 2005.

54 AGUBRA, V. A.; FERGUS, J. W. The formation and stability of the solid electrolyte interface on the graphite anode. *Journal of Power Sources*, Elsevier, v. 268, p. 153–162, 2013.

55 KABIR, M. M.; DEMIROCAK, D. E. Degradation mechanisms in li-ion batteries: a state-of-the-art review. *International Journal of Energy Research*, Wiley Online Library, v. 41, n. 14, p. 1963–1986, 2017.

56 XU, K. Electrolytes and interphases in li-ion batteries and beyond. *Chemical Reviews*, ACS Publications, v. 114, n. 23, p. 11503–11618, 2014.

57 ARORA, P.; ZHANG, Z. J. Battery separators. *Chemical Reviews*, ACS Publications, v. 104, n. 10, p. 4419–4462, 2004.

58 BANDHAUER, T. M.; GARIMELLA, S.; FULLER, T. F. A critical review of thermal issues in lithium-ion batteries. *Journal of the Electrochemical Society*, IOP Publishing, v. 158, n. 3, p. R1–R25, 2011.

59 A123 Systems, Inc. *Nanophosphate® High Power Lithium Ion Cell ANR26650MI-B*. [S.l.], 2012. Technical Data Sheet.

60 PINTO, J. H. D. G.; AMORIM, W. C. S.; CUPERTINO, A. F.; PEREIRA, H. A.; JUNIOR, S. I. S.; TEODORESCU, R. Optimum design of MMC-based ES-STATCOM systems: The role of the submodule reference voltage. *IEEE Transactions on Industry Applications*, IEEE, v. 57, n. 3, p. 3064–3076, 2021.

61 HUSTRULID, W. A.; KUCHTA, M.; MARTIN, R. K. *Open Pit Mine Planning and Design*. 3. ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2013. v. 1. ISBN 978-1-4665-7512-7.

62 Caterpillar Inc. *Caterpillar Performance Handbook*. 49. ed. Peoria, IL: Caterpillar Inc., 2019.