

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Thiago Duque Saber de Lima

**Dimensionamento de um Sistema Híbrido de Armazenamento de Energia
para Caminhões de Mineração Considerando as Características Energéticas
da Mina**

Juiz de Fora

2025

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

·
Dimensionamento de um Sistema Híbrido de Armazenamento de
Energia para Caminhões de Mineração Considerando as Características
Energéticas da Mina / Thiago Duque Saber de Lima. – 2025.

144 f. : il.

Orientador: Pedro Santos Almeida

Coorientador: Guilherme Márcio Soares

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Juiz de Fora,
Faculdade de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Elétrica, 2025.

1. sistemas de propulsão híbrida. 2. propulsão elétrica. 3.
armazenamento de energia. I. Sobrenome, Nome do orientador, orient.
II. Título.

Thiago Duque Saber de Lima

**Dimensionamento de um Sistema Híbrido de Armazenamento de Energia
para Caminhões de Mineração Considerando as Características Energéticas
da Mina**

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Elétrica da Universidade Federal de Juiz de
Fora como requisito parcial à obtenção do
título de Mestre em Engenharia Elétrica.
Área de concentração: Sistemas Eletrônicos
- Eletrônica de Potência

Orientador: Dr. Eng. Pedro Santos Almeida

Coorientador: Dr. Eng. Guilherme Márcio Soares

Juiz de Fora

2025

Thiago Duque Saber de Lima

**Dimensionamento de um Sistema Híbrido de Armazenamento de Energia para Caminhões de Mineração
Considerando as Características Energéticas da Mina**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.
Área de concentração: Sistemas Eletrônicos

Aprovada em 16 de março de 2026.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Pedro Santos Almeida - Orientador

Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Guilherme Márcio Soares - Coorientador

Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Rodrigo Cássio de Barros

Universidade Federal de Ouro Preto

Prof. Dr. Leonardo Willer de Oliveira

Universidade Federal de Juiz de Fora

Profa. Dra. Janáina Gonçalves de Oliveira

Universidade Federal de Juiz de Fora

Juiz de Fora, 26/02/2026.



Documento assinado eletronicamente por **Pedro Santos Almeida, Professor(a)**, em 16/03/2026, às 22:39, 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 16/03/2026, às 23:33, 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 17/03/2026, às 00:05, 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 **Rodrigo Cassio de Barros, Usuário Externo**, em 17/03/2026, às 10:26, 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 **Janaina Goncalves de Oliveira, Professor(a)**, em 17/03/2026, às 20:58, 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-Uffj (www2.uffj.br/SEI) através do ícone Conferência de Documentos, informando o código verificador **2887807** e o código CRC **15ADFDAE**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço profundamente aos meus pais, irmãos e a toda a minha família, que sempre estiveram ao meu lado ao longo de toda a minha vida, apoiando cada passo que me trouxe da graduação ao mestrado. O incentivo constante aos estudos, o suporte diário e a confiança no meu caminho foram fundamentais durante todo esse percurso.

À minha namorada, Juliana, deixo meu sincero agradecimento pelo companheirismo, amor e compreensão durante toda essa jornada, especialmente nos últimos anos, quando a distância física tornou tudo mais desafiador. Sua paciência e apoio tornaram este período muito mais leve.

Aos meus amigos de longa data, que caminharam comigo durante a graduação e permaneceram presentes mesmo após a formatura, agradeço pela parceria, pelas conversas e pelo apoio em todas as fases dessa trajetória.

Aos amigos de trabalho Ramon, Fabrício, Victor, Heitor, Lucca e Rudson, que conheci na U&M, agradeço por fazerem parte do meu crescimento pessoal e profissional, tanto no período de estágio quanto na vida profissional. As experiências compartilhadas e o aprendizado conjunto tiveram papel essencial na minha formação.

Aos meus orientadores, Pedro e Guilherme, expresso minha enorme gratidão pela paciência, atenção e compreensão ao longo de todo este período em que precisei conciliar vida profissional, pessoal e acadêmica, muitas vezes à distância e com tempo reduzido. A orientação cuidadosa e a confiança depositada em mim foram determinantes para que este trabalho se concretizasse.

Agradeço à Universidade Federal de Juiz de Fora e ao ensino público de qualidade, por oferecerem o ambiente e os recursos que tornaram esta pesquisa possível.

À U&M Construção e Mineração, expresso minha gratidão por ter proporcionado um espaço de grande desenvolvimento profissional e pessoal, além de disponibilizar os dados que permitiram a realização deste estudo.

RESUMO

A crescente demanda por redução de custos operacionais e emissões no setor de mineração tem impulsionado o desenvolvimento de caminhões fora de estrada com arquiteturas eletrificadas. Nesse contexto, este trabalho propõe uma metodologia estruturada para o dimensionamento ótimo de sistemas híbridos de armazenamento de energia (HESS), compostos por baterias e supercapacitores, aplicados a caminhões de mineração. A metodologia baseia-se na utilização de perfis reais de potência das minas e na formulação do dimensionamento como um problema de otimização sujeito a restrições elétricas, operacionais e econômicas. A abordagem integra a modelagem energética do veículo a partir de ciclos reais de operação, uma avaliação técnico-econômica considerando custos de investimento, preço do diesel, taxa mínima de atratividade e parâmetros de mercado, além da proposição de uma arquitetura hierárquica de controle com separação explícita de responsabilidades em múltiplos níveis. O problema de dimensionamento é resolvido por meio de um algoritmo de otimização baseado em algoritmo genético, responsável por determinar a configuração ótima dos bancos de baterias e supercapacitores, bem como o limiar de potência utilizado na estratégia de gerenciamento energético. Os resultados obtidos para diferentes perfis de minas demonstram que a inclusão do HESS possibilita significativa recuperação de energia durante eventos de frenagem, resultando em elevada economia de combustível e valores expressivos de retorno econômico. Observou-se ainda uma predominância do uso de baterias no sistema híbrido, enquanto os supercapacitores desempenham um papel complementar associado principalmente à absorção de picos transitórios de potência. As análises de sensibilidade indicam que o problema apresenta maior sensibilidade a parâmetros diretamente associados ao fluxo de caixa, como o preço do diesel e o *C-rate* das baterias, e menor sensibilidade a variações nos custos de investimento dos componentes. Os resultados também evidenciam que o dimensionamento orientado pelo perfil específico de cada mina é fundamental para evitar sobre ou subdimensionamentos, assegurando uma relação mais eficiente entre investimento inicial e retorno econômico. Dessa forma, a metodologia proposta mostra-se uma alternativa tecnicamente viável e economicamente atrativa para a eletrificação parcial de caminhões de mineração.

Palavras-chave: Sistemas híbridos de armazenamento de energia; Caminhões de mineração; Dimensionamento ótimo; Controle hierárquico; Eficiência energética; Recuperação de energia.

ABSTRACT

The growing demand for reducing operational costs and emissions in the mining sector has driven the development of off-highway trucks with electrified architectures. In this context, this work proposes a structured methodology for the optimal sizing of hybrid energy storage systems (HESS), composed of batteries and supercapacitors, applied to mining trucks. The methodology is based on the use of real mine power profiles and formulates the sizing problem as an optimization task subject to electrical, operational, and economic constraints. The proposed approach integrates the energy modeling of the vehicle using real operating cycles with a techno-economic evaluation that considers investment costs, diesel price, minimum attractive rate of return, and market-related parameters. In addition, a hierarchical control architecture is proposed, with explicit separation of responsibilities across multiple control levels. The sizing problem is solved using an optimization algorithm based on a genetic algorithm, which determines the optimal configuration of the battery and supercapacitor banks as well as the power threshold used in the energy management strategy. Results obtained for different mine profiles demonstrate that the inclusion of the HESS enables significant energy recovery during braking events, leading to substantial fuel savings and high economic returns. The results also indicate a predominance of battery usage in the hybrid system, while supercapacitors play a complementary role mainly associated with absorbing transient power peaks. Sensitivity analyses show that the problem is more sensitive to parameters directly related to cash flow, such as diesel price and battery C-rate, while exhibiting lower sensitivity to variations in component investment costs. Furthermore, the results highlight that sizing based on the specific operational profile of each mine is essential to avoid over- or undersizing, ensuring a more efficient balance between initial investment and economic return. Therefore, the proposed methodology represents a technically feasible and economically attractive alternative for the partial electrification of mining trucks.

Keywords: *Hybrid Energy Storage Systems; Mining haul trucks; Optimal sizing; Hierarchical control; Energy efficiency; Regenerative energy recovery.*

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.	15
Figura 1.2 – Exemplos de equipamentos de mineração com tração elétrica.	17
Figura 1.3 – Trajeto típico de um caminhão de mineração em operação.	18
Figura 2.1 – Arquitetura simplificada do sistema de tração diesel-elétrico original do caminhão fora-de-estrada Komatsu 730E.	25
Figura 2.2 – Comportamento típico do sistema diesel-elétrico nos modos de tração e frenagem - (a) estado dos contadores; (b) tensão e corrente no barramento de tração.	25
Figura 2.3 – Arquitetura original no modo de operação de tração.	26
Figura 2.4 – Arquitetura original no modo de operação de frenagem dinâmica. . . .	27
Figura 2.5 – Principais componentes elétricos de um caminhão fora-de-estrada com tração diesel-elétrica.	28
Figura 2.6 – Componentes do <i>powertrain</i> do Komatsu 730E.	28
Figura 2.7 – Motor diesel V16 Cummins K2000E, de potência nominal 2000 hp. . . .	30
Figura 2.8 – Curvas características do motor Cummins K2000E: (a) torque versus rotação, (b) potência versus rotação e (c) consumo específico versus rotação. . . .	30
Figura 2.9 – Corte esquemático do gerador síncrono G.E. GTA-22, evidenciando estator, rotor e respectivos enrolamentos. Há um soprador (<i>blower</i>) diretamente acoplado ao eixo, destinado ao arrefecimento dos componentes elétricos do sistema de tração (retificador principal e gabinete elétrico).	31
Figura 2.10 – Conjunto motogerador do caminhão Komatsu 730E, constituído pelo motor diesel Cummins K2000E, pelo sistema de arrefecimento por radiador (ao fundo) e pelo gerador síncrono principal G.E. GTA-22 acoplado mecanicamente ao eixo do motor, localizado na região frontal da imagem.	31
Figura 2.11 – Retificador trifásico de seis pulsos com filtro associado, utilizado para alimentação do barramento c.c. de tração.	32
Figura 2.12 – Painel 17FM528 do retificador trifásico principal de tração, com a entradas c.a. (três barramentos internos) e a saída c.c. (dois barramentos dos extremos). Os dispositivos semicondutores encontram-se na parte inferior do painel, posicionados no fluxo de ar do soprador do alternador, sendo refrigerados por convecção forçada.	33
Figura 2.13 – Instalação do painel retificador 17FM528 no espaço traseiro do deck do caminhão, acima do alternador: (1) gabinete elétrico; (2) duto de entrada de ar do <i>blower</i> ; (3) painel do filtro RC; (4) painel do retificador; (5) deck traseiro; (6) duto de transição; (7) alternador e <i>blower</i> ; (8) duto de ar para gabinete elétrico; (9) deck dianteiro.	33

Figura 2.14–Esquemático do banco de frenagem dinâmica (grades resistivas), com associação controlada por contatores.	34
Figura 2.15–Vistas frontal e superior do banco de frenagem dinâmica, evidenciando os sopradores centrais responsáveis pela refrigeração por convecção forçada nas grades resistivas.	35
Figura 2.16–Diagrama elétrico dos motores de tração em corrente contínua e respectivos circuitos de excitação de campo.	35
Figura 2.17–Corte esquemático de uma das rodas com o motor de tração c.c. GE788FS instalado, destacando armadura (rotor), comutador (à direita) e enrolamentos de campo (estator), além da transmissão planetária que acopla o eixo do motor às rodas (à esquerda).	36
Figura 2.18–Retificador monofásico semicontrolado a tiristores tipo SCR - esquema do circuito de potência e formas de onda típicas.	36
Figura 2.19–Diagrama simplificado do circuito de potência da excitatriz estática de campo do alternador (AFSE - <i>Alternator Field Static Exciter</i>).	38
Figura 2.20–Diagrama simplificado do circuito de potência da excitatriz estática de campo dos motores (MFSE - <i>Motor Field Static Exciter</i>).	39
Figura 2.21–Configuração elétrica do banco de baterias em associações série-paralelo e organização modular.	40
Figura 2.22–Influência da temperatura no ciclo de vida da bateria.	42
Figura 2.23–Classificação de baterias por química adotada.	44
Figura 2.24–Comparação entre as principais químicas de baterias empregadas em aplicações embarcadas.	46
Figura 2.25–Célula de bateria de lítio-ferro-fosfato (C7-LFP40W/N-6C).	47
Figura 2.26–Curva de Tensão por Estado de carga da bateria.	48
Figura 2.27–Curva de degradação da bateria com base em ciclos completos.	49
Figura 2.28–Comparação entre dois tipos de elementos armazenadores de energia elétrica em corrente contínua - supercapacitores e baterias.	51
Figura 2.29–Classificação de supercapacitores.	53
Figura 2.30–Modelo de supercapacitor adotado (BCAP3000 P300 K04/05).	54
Figura 2.31–Curva de degradação do supercapacitor com base em ciclos completos.	56
Figura 2.32–Exemplificação de um conversor de três portas.	57
Figura 2.33–Diagrama de ligação e fluxo de potência.	58
Figura 2.34–Fluxograma esquematizando o controle hierárquico proposto.	59
Figura 2.35–Figura de potência hipotética para análise do controle hierárquico.	60
Figura 3.1 – Arquitetura de tração proposta com a inclusão de um Sistema Híbrido de Armazenamento de Energia (HESS) baseado em baterias e supercapacitores.	63

Figura 3.2 – Curvas de tensão e corrente no barramento c.c. de alimentação dos motores de tração durante uma operação típica.	66
Figura 3.3 – Perfil de potência de tração obtido a partir das medições de tensão e corrente no barramento c.c.	66
Figura 3.4 – Fluxograma do funcionamento do controle secundário.	70
Figura 3.5 – Diagrama de blocos esquematizando a simulação computacional do sistema.	72
Figura 3.6 – Perfil sintético de operação do caminhão.	75
Figura 3.7 – Gráficos de potência, corrente e potência rejeitada para os elementos armazenadores utilizando um perfil de validação.	77
Figura 3.8 – Gráficos de estado de carga, tensão e corrente para os elementos armazenadores utilizando um perfil de validação.	78
Figura 3.9 – Comparação entre as potencia demandadas, administradas e absorvidas ou fornecidas pelos sistema de armazenamento para um perfil sintético. . .	79
Figura 4.1 – Perfil de operação para a Mina de Conceição do Mato Dentro.	89
Figura 4.2 – Perfil de operação para a Mina de Araxá.	90
Figura 4.3 – Perfil de operação para a Mina de Riacho dos Machados.	92
Figura 4.4 – Fluxo de caixa mensal para a Mina de Conceição do Mato Dentro . . .	100
Figura 4.5 – Curva de degradação da bateria para a simulação utilizando o perfil de Conceição do Mato Dentro.	101
Figura 4.6 – Curva de degradação do banco de supercapacitor para a simulação utilizando o perfil de Conceição do Mato Dentro.	101
Figura 4.7 – Gráficos de potência, corrente e potência rejeitada para os elementos armazenadores considerando a operação na Mina de Conceição do Mato Dentro.	102
Figura 4.8 – Gráficos de Estado de Carga, Tensão e corrente dos elementos armazenadores considerando a operação na Mina de Conceição do Mato Dentro.	103
Figura 4.9 – Comparação entre as potencia demandadas, administradas e absorvidas ou fornecidas pelos sistema de armazenamento para o perfil de Mina de Conceição do Mato Dentro.	104
Figura 4.10–Comparação entre o VPL considerando a configuração ótima e a configuração base para a Mina de Conceição do Mato Dentro.	110
Figura 4.11–Volume total dos bancos ótimo de elementos armazenadores para cada variação paramétrica.	112
Figura A.1–Fluxo de caixa mensal para a Mina de Araxá.	125
Figura A.2–Curva de degradação da bateria para a simulação utilizando o perfil de Araxá.	126
Figura A.3–Curva de degradação do banco de supercapacitor para a simulação utilizando o perfil de Araxá.	127

Figura A.4–Gráficos de potência, corrente e potência rejeitada para os elementos armazenadores considerando a operação na Mina de Araxá.	127
Figura A.5–Gráficos de Estado de Carga, Tensão e corrente dos elementos armazenadores considerando a operação na Mina de Araxá.	128
Figura A.6–Comparação entre as potencia demandadas, administradas e absorvidas ou fornecidas pelos sistema de armazenamento para o perfil de Mina de Araxá.	129
Figura A.7–Fluxo de caixa mensal para a Mina de Riacho dos Machados.	132
Figura A.8–Curva de degradação da bateria para a simulação utilizando o perfil de Riacho dos Machados.	133
Figura A.9–Curva de degradação do banco de supercapacitor para a simulação utilizando o perfil de Araxá.	133
Figura A.10–Gráficos de potência, corrente e potência rejeitada para os elementos armazenadores considerando a operação na Mina de Riacho dos Machados.	134
Figura A.11–Gráficos de Estado de Carga, Tensão e corrente dos elementos armazenadores considerando a operação na Mina de Riacho dos Machados.	135
Figura A.12–Comparação entre as potencia demandadas, administradas e absorvidas ou fornecidas pelos sistema de armazenamento para o perfil de Mina de Riacho dos Machados.	136
Figura B.1 – Comparação entre o VPL considerando a configuração ótima e a configuração base para a Mina de Araxá.	138
Figura B.2 – Comparação entre o VPL considerando a configuração ótima e a configuração base para a Mina de Riacho dos Machados.	141

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Características da célula C7-LFP40W/N-6C.	47
Tabela 2.2 – Comparação entre baterias e supercapacitor.	52
Tabela 2.3 – Exemplos de <i>part numbers</i> de supercapacitores.	54
Tabela 3.1 – Tabela com parâmetros para o modelo de validação da simulação. . . .	76
Tabela 4.1 – Análise do perfil de operação da Mina de Conceição do Mato Dentro. .	88
Tabela 4.2 – Análise do perfil de operação da Mina de Araxá.	89
Tabela 4.3 – Análise do perfil de operação da Mina de Riacho dos Machados. . . .	91
Tabela 4.4 – Comparação entre os parâmetros observados na três minas.	93
Tabela 4.5 – Parâmetros elétricos das células de armazenamento.	93
Tabela 4.6 – Parâmetros de arranjo dos bancos e restrições elétricas.	94
Tabela 4.7 – Parâmetros energéticos do diesel.	95
Tabela 4.8 – Parâmetros econômicos do modelo.	96
Tabela 4.9 – Parâmetros operacionais.	97
Tabela 4.10–Tabela evolutiva do algoritmo de otimização para o perfil da Mina de Conceição do Mato Dentro.	98
Tabela 4.11–Resultado ótimo obtido pelo algoritmo de otimização para a Mina de Conceição do Mato Dentro.	99
Tabela 4.12–Resultado ótimo obtido pelo algoritmo de otimização para a Mina de Araxá.	104
Tabela 4.13–Resultado ótimo obtido pelo algoritmo de otimização para a Mina de Riacho dos Machados.	105
Tabela 4.14–Tabela demonstrativa dos valores avaliados na análise de sensibilidade.	106
Tabela 4.15–Análise de sensibilidade considerando alterações dos parâmetros para o dimensionamento base para a Mina de Conceição do Mato Dentro. . .	107
Tabela 4.16–Análise de sensibilidade para a Mina de Conceição do Mato Dentro considerando alterações dos parâmetros e executado novamente o algoritmo de otimização.	109
Tabela 4.17–Análise de sensibilidade considerando alterações dos parâmetros para o dimensionamento base para a Mina de Araxá.	110
Tabela 4.18–Análise de sensibilidade considerando alterações dos parâmetros para o dimensionamento base para a Mina de Riacho dos Machados.	111
Tabela 4.19–Resultado ótimo obtido pelo algoritmo de otimização para o perfil sintético.	113
Tabela A.1–Tabela evolutiva do algoritmo de otimização para o perfil da Mina de Araxá.	122
Tabela A.2–Resultado ótimo obtido pelo algoritmo de otimização para a Mina de Araxá.	124

Tabela A.3–Tabela evolutiva do algoritmo de otimização para o perfil da Mina de Riacho dos Machados.	130
Tabela A.4–Resultado ótimo obtido pelo algoritmo de otimização para a Mina de Riacho dos Machados.	131
Tabela B.1–Análise de sensibilidade considerando alterações dos parâmetros para o dimensionamento base para a Mina de Araxá.	137
Tabela B.2–Análise de sensibilidade considerando alterações dos parâmetros juntamente com o algoritmo de otimização para a Mina de Araxá.	138
Tabela B.3–Análise de sensibilidade considerando alterações dos parâmetros para o dimensionamento base para a Mina de Riacho dos Machados.	139
Tabela B.4–Análise de sensibilidade considerando alterações dos parâmetros juntamente com o algoritmo de otimização para a Mina de Riacho dos Machados. .	140
Tabela C.1–Tabela de análise de sensibilidade para a Mina de Conceição do Mato Dentro.	142
Tabela C.2–Simulação do perfil base para todos os cenários da análise de sensibilidade - Mina de Conceição do Mato Dentro.	142
Tabela D.1–Tabela de análise de sensibilidade para a Mina de Araxá.	143
Tabela E.1 –Tabela de análise de sensibilidade para a Mina de Riacho dos Machados.	144

SUMÁRIO

1	Introdução	15
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	15
1.2	O CONTEXTO OPERACIONAL DE CAMINHÕES FORA-DE-ESTRADA	18
1.3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
1.4	OBJETIVOS	22
1.4.1	Objetivo Geral	22
1.4.2	Objetivos Específicos	22
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	23
2	Fundamentos Teóricos e Metodologias Adotadas	24
2.1	SISTEMA EM ESTUDO	24
2.2	ELEMENTOS DO CAMINHÃO KOMATSU 730E	27
2.2.1	Motor Diesel	29
2.2.2	Gerador Síncrono	29
2.2.3	Retificador Principal e Filtro	32
2.2.4	Grades de Frenagem Dinâmica	32
2.2.5	Motores CC de Tração	34
2.2.6	Sistemas de Excitação	36
2.2.6.1	Excitatriz estática do alternador - <i>Alternator Field Static Exciter</i> - AFSE	37
2.2.6.2	Excitatriz estática dos motores - <i>Motor Field Static Exciter</i> - MFSE . .	39
2.3	SISTEMA DE ARMAZENAMENTO EM BATERIAS	40
2.3.1	Características Eletroquímicas	40
2.3.1.1	Densidade de Energia, Densidade de Potência e Energia Específica . . .	41
2.3.1.2	Ciclo de Vida e Calendário de Vida	41
2.3.1.3	Avalanche Térmica e Segurança de Baterias	42
2.3.1.4	Cadeia de Fornecimento	43
2.3.2	Modelos Matemáticos Adotados	47
2.3.2.1	Estimação de Tensão e SoC	47
2.3.2.2	Modelo de Degradação	48
2.4	SISTEMA DE ARMAZENAMENTO EM SUPERCAPACITORES . . .	50
2.4.1	Características Elétricas e Construtivas	52
2.4.1.1	Pseudocapacitores	53
2.4.1.2	Capacitor Eletroquímico de Duas Camadas	53
2.4.2	Modelos Matemáticos Adotados	55
2.4.2.1	Estimação de SoC e Tensão	55
2.4.2.2	Modelo de Degradação	55
2.5	SISTEMA HÍBRIDO DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA	57

2.5.1	Conversor de Três Portas	57
2.5.2	Controle hierárquico	58
2.6	ALGORITMOS PARA A SOLUÇÃO DE PROBLEMAS DE OTIMIZAÇÃO	60
3	Modelagem e Projeto do Sistema Híbrido de Armazenamento de Energia	63
3.1	ANÁLISE DOS PERFIS OPERACIONAIS DO CAMINHÃO	64
3.2	ESTRATÉGIAS DE CONTROLE HIERÁRQUICO	67
3.2.1	Controle Terciário	67
3.2.1.1	<i>Gerenciamento primário por limiar de potência</i>	68
3.2.1.2	<i>Balanceamento por histerese do supercapacitor</i>	69
3.2.2	Controle Secundário	69
3.3	SIMULAÇÃO DINÂMICA DO SISTEMA COM HESS	72
3.3.1	Modelo de Simulação Computacional	72
3.3.2	Validação do Modelo de Simulação	74
3.4	METODOLOGIA DE PROJETO ÓTIMO PROPOSTA	79
3.4.1	O Custo Inicial do Sistema	81
3.4.2	Benefício Econômico da Regeneração Energética Provida pelo HESS	82
3.4.3	O Custo de Substituição dos Bancos de Armazenamento	83
3.4.4	A Solução do Problema de Otimização a partir do Algoritmo NSGA-II	84
3.5	Resumo do Capítulo	86
4	Resultados	87
4.1	Análise dos Perfis	87
4.1.1	Mina de Conceição do Mato Dentro	87
4.1.2	Mina de Araxá	88
4.1.3	Mina de Riacho dos Machados	91
4.2	Parâmetros Usados no Projeto	93
4.2.1	Parâmetros das Células de Armazenamento	93
4.2.2	Parâmetros de Arranjo e Restrições Elétricas	93
4.2.3	Parâmetros Energéticos do Diesel	94
4.2.4	Parâmetros Econômicos	95
4.2.5	Parâmetros Operacionais	97
4.3	Resultados de Projeto e Simulações dos Sistemas de Armazenamento Ótimos para as Minas	97
4.4	Análise de Sensibilidade	105
4.5	Análise Consolidada	111
5	Conclusões e Propostas de Trabalhos Futuros	114

5.1	Conclusões	114
5.2	Principais Contribuições	115
5.3	Trabalhos Futuros	116
	REFERÊNCIAS	118
A	Projeto ótimo e resultados para os outros perfis	122
A.1	Mina de Araxá	122
A.2	Mina de Riacho dos Machados	129
B	Análise de Sensibilidade para as outras minas	137
B.1	Mina de Araxá	137
B.2	Mina de Riacho dos Machados	139
C	Tabela de Sensibilidade para a Mina de Conceição do Mato Dentro	142
D	Tabela de Sensibilidade para a Mina de Araxá	143
E	Tabela de Sensibilidade para a Mina de Riacho dos Machados	144

1 Introdução

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A eletrificação e a hibridização de sistemas de transporte têm se consolidado como estratégias relevantes no contexto da transição energética e da mitigação das emissões de gases de efeito estufa. A substituição parcial ou total de sistemas propulsivos baseados puramente em combustíveis fósseis por soluções eletrificadas tem sido impulsionada por metas de descarbonização, avanços tecnológicos em eletrônica de potência e sistemas de armazenamento de energia, além da crescente pressão regulatória sobre setores energeticamente intensivos, como é o caso da mineração.

Paralelamente, essa transição tecnológica pode se alinhar aos princípios de uma economia circular, uma vez que a hibridização de plataformas já existentes — por meio da incorporação de sistemas de armazenamento, juntamente com seus respectivos conversores de potência — permite o aproveitamento de ativos de alto valor agregado já existentes. Essa abordagem reduz a necessidade de uma substituição integral dos equipamentos, aumenta a eficiência energética do ciclo operacional e contribui para a diminuição do consumo de combustível e, conseqüentemente, das emissões de CO₂.

Figura 1.1 – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.



Fonte: (UNIDAS, 2015)

Em setembro de 2015, durante a Cúpula das Nações Unidas para o Desenvolvimento Sustentável, os 193 Estados-membros da Organização das Nações Unidas firmaram a Agenda 2030, estabelecendo os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). A Agenda 2030 sucedeu os Objetivos de Desenvolvimento do Milênio (ODM), ampliando o escopo das metas globais e incorporando novas dimensões relacionadas à sustentabilidade ambiental, social e econômica (FIA, 2020). Ao todo, foram definidos 17 objetivos voltados à promoção do desenvolvimento sustentável, com

ênfase na erradicação da pobreza, na preservação ambiental e na garantia de qualidade de vida para as gerações atuais e futuras.

Entre os ODS, destacam-se especialmente o Objetivo 7 — Energia Limpa e Acessível — e o Objetivo 13 — Ação contra a Mudança Global do Clima — que tratam da ampliação do uso de fontes energéticas sustentáveis e da redução das emissões associadas ao setor de transportes e às atividades industriais em geral. No Brasil, a cadeia minero-siderúrgica possui relevância significativa nesse contexto. Segundo dados consolidados pelo Observatório do Clima (OEC, 2025), em 2020 o conjunto das atividades associadas à mineração e à siderurgia emitiu aproximadamente 107,6 milhões de toneladas de CO₂, valor equivalente a cerca de 5% das emissões nacionais naquele ano, configurando-se como parcela expressiva das emissões industriais do país.

A mineração é reconhecida como uma atividade de elevada intensidade energética, com impactos relevantes em termos de emissões atmosféricas. De acordo com o Poder360 (2024), em 2022 o setor foi responsável pela emissão de aproximadamente 13 milhões de toneladas de CO₂, além de 1,5 tonelada de metano (CH₄) — cujo potencial de aquecimento global é cerca de 28 vezes superior ao do CO₂ — e aproximadamente 0,5 tonelada de óxido nitroso (N₂O), com potencial cerca de 265 vezes maior. Esses valores representam aproximadamente 0,55% das emissões totais de gases de efeito estufa do país. Conforme apresentado em IBRAM (2024), cerca de 59% dessas emissões estão associadas à operação de maquinário pesado movido a diesel, empregado nas etapas de lavra, transporte e beneficiamento mineral.

Em escala global, a mineração e o processamento de minerais respondem por parcela relevante das emissões antropogênicas de gases de efeito estufa. Só no Brasil, segundo dados do SEEG (OEC, 2025), o setor de processos industriais emitiu aproximadamente 94 Mt CO₂¹ em 2024, dos quais cerca de 49 Mt estão associados à produção de metais e 32 Mt à fabricação de produtos minerais. Considerando um total nacional de aproximadamente 2145 Mt CO₂, somente a produção de metais representa pouco mais de 2% das emissões brasileiras.

Paralelamente, o setor de mineração ocupa posição estratégica na transição energética em curso, em função da crescente demanda por minerais considerados críticos para tecnologias de baixo carbono, como lítio (Li), cobalto (Co), níquel (Ni) e cobre (Cu), além de minerais com elementos de terras raras, especialmente neodímio (Nd), praseodímio (Pr) e disprósio (Dy) (IEA, 2021). Esses materiais constituem insumos essenciais para a fabricação de baterias eletroquímicas, sistemas estacionários de armazenamento de energia, módulos fotovoltaicos e semicondutores; os elementos de terras raras, em particular, são fundamentais para a produção de ímãs permanentes do tipo NdFeB, amplamente empregados em motores e geradores elétricos de alta

¹ Mt CO₂ = milhões de toneladas de dióxido de carbono

densidade de potência para sistemas motrizes e de geração renovável.

Empresas do setor de mineração têm investido de forma crescente no desenvolvimento de tecnologias de mobilidade pesada, com o objetivo de atender à demanda por operações mais sustentáveis. A Caterpillar, por exemplo, desenvolve novos projetos de caminhões elétricos (Caterpillar Inc., 2022), enquanto a Vale já opera caminhões elétricos de 72 toneladas na mina de Água Limpa, em Minas Gerais (VALE, 2022). Esses equipamentos são apresentados na Figura 1.2.



(a) Caminhão fora-de-estrada elétrico Caterpillar 793E (Caterpillar Inc., 2022)



(b) Caminhão elétrico da Vale (VALE, 2022)

Figura 1.2 – Exemplos de equipamentos de mineração com tração elétrica.

Apesar desses investimentos em sustentabilidade, os fabricantes de equipamentos de mineração não demonstram interesse significativo no desenvolvimento de soluções estruturadas de *retrofit* para caminhões já existentes. Tais soluções poderiam viabilizar a renovação parcial da frota com aproveitamento de ativos, especialmente de veículos que já dispõem de tração elétrica nas rodas, preservando parte substancial da infraestrutura eletromecânica instalada e reduzindo a necessidade de substituição integral do equipamento. Segundo a Caterpillar Inc. (2016), a vida útil estimada de um caminhão fora-de-estrada típico de mineração é da ordem de 100.000 horas de operação, podendo ser significativamente estendida por meio de manutenção adequada, reformas estruturais e recondicionamento de máquinas, sistemas e subsistemas elétricos.

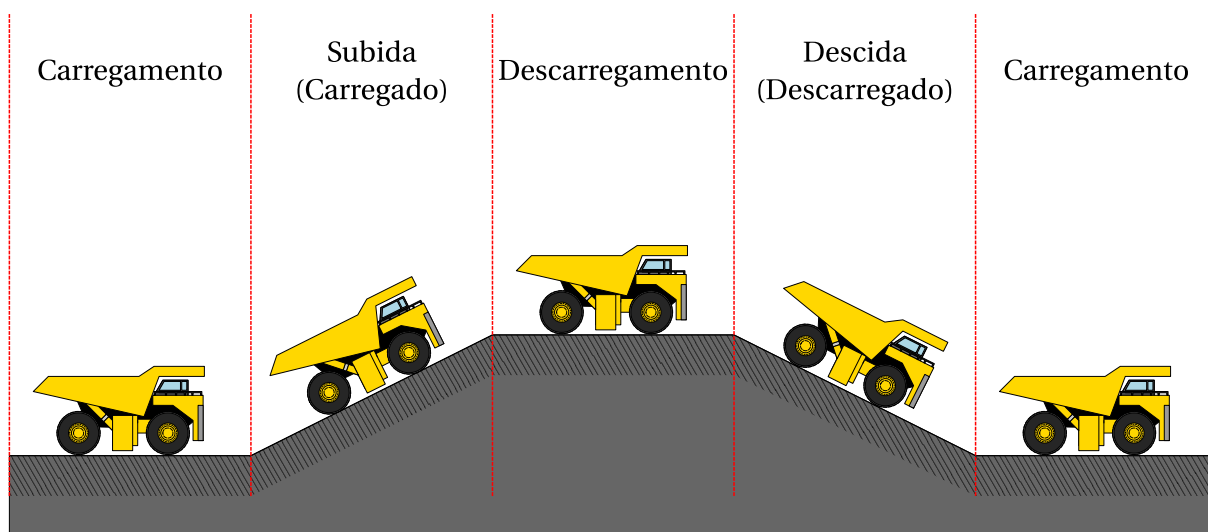
Esse cenário evidencia um ponto relevante: embora haja investimentos expressivos no desenvolvimento de novos modelos elétricos, equipamentos considerados tecnologicamente defasados ainda permanecerão em operação por muitos anos. Além disso, devido ao elevado custo de aquisição desses veículos, sua substituição imediata por modelos mais modernos, eficientes e sustentáveis é, na maioria dos casos, inviável sob os pontos de vista econômico e operacional. Por fim, os próprios conceitos de sustentabilidade e de economia circular incorporam os princípios dos 3Rs — Reduzir, Reutilizar e Reciclar —, de modo que a adaptação de equipamentos existentes não

apenas se mostra coerente com esses princípios, como também se apresenta como uma estratégia economicamente viável e ambientalmente consistente.

1.2 O CONTEXTO OPERACIONAL DE CAMINHÕES FORA-DE-ESTRADA

Caminhões de mineração são veículos responsáveis por transportar grandes volumes de minério dentro de uma mina. Durante o período de operação, o caminhão percorre essencialmente quatro etapas, conforme ilustrado na Figura 1.3:

Figura 1.3 – Trajeto típico de um caminhão de mineração em operação.



Fonte: (TRAVASSOS; SOARES; CUPERTINO, 2024)

Os cenários ilustrados na Figura 1.3 podem ser descritos como:

- **Carregamento**: o caminhão permanece parado enquanto uma retroescavadeira enche a caçamba com o material a ser transportado;
- **Deslocamento / Subida de cava**: após o carregamento, o veículo inicia o trajeto rumo a um ponto de maior altitude, onde o minério será descarregado ou armazenado;
- **Descarregamento**: já no patamar superior, o caminhão despeja o material transportado;
- **Retorno/Descida de cava**: após o descarregamento, o caminhão retorna ao ponto de carregamento, descendo a cava e reiniciando o ciclo.

Diferentemente de veículos convencionais a combustão, caminhões de mineração de grande porte utilizam um sistema eletro-diesel, no qual o motor a combustão aciona um gerador responsável por alimentar motores elétricos acoplados às rodas. Durante o deslocamento/subida da cava, o conjunto diesel-elétrico fornece energia ao barramento e às excitatrizes dos motores.

Em momentos de descida de cava ou frenagem, devido à enorme inércia desses veículos — um Komatsu 730E, por exemplo, pode pesar cerca de 140 toneladas, transportando até 200 toneladas de carga útil (KOMATSU LTD., 2000) — freios convencionais não são suficientes. Por isso, esses caminhões utilizam três sistemas de frenagem:

- **Freio de estacionamento:** sistema hidráulico que trava as rodas e mantém o caminhão imóvel;
- **Freio de serviço:** mecanismo mecânico utilizado em situações emergenciais; sofre elevada degradação térmica e mecânica, não sendo adequado para uso contínuo;
- **Freio de retardo:** composto por um banco resistivo que pode ser conectado aos motores elétricos. É o principal responsável pela desaceleração, pois não sofre desgaste mecânico, oferecendo maior confiabilidade.

Sendo assim, na descida da cava o freio retardo é o preferencialmente utilizado. O conjunto diesel-elétrico é desacoplado do barramento (mantendo apenas a excitação das excitatrizes), e os motores passam a operar como geradores. A frenagem é controlada pela corrente de excitação ou pela inserção de cargas resistivas equivalentes, re combinadas por contadores para ajustar o nível de frenagem. Nesse processo, o caminhão “enxerga” os resistores como carga, convertendo energia potencial em calor.

Embora confiável, esse sistema apresenta uma limitação importante: toda a energia potencial regenerada na descida é dissipada como calor nos bancos resistivos, desperdiçando um recurso energético valioso que poderia auxiliar na tração durante a subida da cava. Assim, surge a oportunidade de implementar um sistema de armazenamento de energia capaz de recuperar essa energia regenerada e utilizá-la posteriormente, reduzindo o consumo de diesel e aumentando a eficiência operacional. Além do benefício econômico, há também um ganho ambiental, pois a energia recuperada substitui parte da energia que seria fornecida pela queima de diesel, reduzindo proporcionalmente as emissões de carbono.

Projetos semelhantes já foram propostos na literatura, como em (MORAES, 2020), que apresenta um sistema híbrido de armazenamento para locomotivas diesel-elétricas — tecnologia muito semelhante à utilizada em caminhões de mineração. Há também propostas de sistemas híbridos aplicados a plantas fotovoltaicas (BARELLI *et al.*, 2018), reforçando a versatilidade e o potencial desses sistemas.

1.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta seção apresenta uma síntese das principais referências utilizadas ao longo do desenvolvimento desta dissertação. Os trabalhos revisados abrangem temas como

tecnologias e químicas de baterias, supercapacitores, sistemas híbridos de armazenamento de energia, eletrônica de potência aplicada à gestão energética em sistemas híbridos (incluindo conversores de três portas), aplicações em veículos pesados, sistemas energéticos e manuais técnicos sobre o funcionamento de caminhões fora de estrada. O objetivo desta seção é oferecer uma visão consolidada da literatura que fundamenta o desenvolvimento metodológico e experimental deste trabalho.

Diversas fontes técnicas foram consultadas para caracterizar o veículo estudado, o caminhão Komatsu 730E. Em (KOMATSU LTD., 2000), (KOMATSU, 2001), (HARTENSTINE, 2003) e (Komatsu Cummins Chile Ltda, 2006) são apresentados o manual de operação, o catálogo técnico e materiais institucionais que descrevem detalhadamente a arquitetura do caminhão. Esses documentos fornecem informações essenciais sobre o funcionamento dos sistemas de tração, excitação de campo, gerador, motor a diesel e demais componentes estruturais e elétricos. As descrições, diagramas e especificações presentes nessas referências constituem a base para a compreensão do sistema eletro-diesel analisado nos capítulos seguintes e servem como ponto de partida para o desenvolvimento da metodologia proposta nesta dissertação.

Trabalhos recentes apresentam detalhes abrangentes sobre o estado da arte das tecnologias de baterias aplicadas a veículos elétricos. Em (HOUACHE *et al.*, 2022) é realizada uma análise concisa do panorama atual e das perspectivas futuras das principais químicas de baterias utilizadas no setor automotivo, discutindo sua evolução tecnológica e a viabilidade. Houche detalha de forma bem analítica cada tipo de química, descrevendo suas características, vantagens e desvantagens. De forma complementar, (PESARAN, 2023) examina os avanços mais recentes nas baterias de íons de lítio, descrevendo melhorias em densidade de energia, segurança, custos e cadeia de suprimentos. O trabalho também introduz conceitos fundamentais de eletroquímica, como densidade de potência, ciclo de vida, vida em calendário, mecanismos de falha térmica e aspectos de segurança. Em (LIU; PLACKE; CHAU, 2022), os autores ampliam essa discussão ao incluir sistemas de gerenciamento de baterias aplicados a veículos elétricos, abordando diferentes químicas, suas evoluções e tendências futuras para aplicações de alta demanda energética.

Além disso, estudos específicos aprofundam temas relacionados ao custo e à segurança das baterias. Em (ORANGI *et al.*, 2024), são apresentadas projeções de longo prazo para os custos de aquisição de baterias de íons de lítio, considerando fatores tecnológicos e de mercado. Já (CHO, 2004) discute de forma detalhada os mecanismos de segurança associados às diferentes químicas, com foco nas reações exotérmicas e nos fenômenos que podem levar à instabilidade térmica.

Quanto ao tema de supercapacitores, existem diversos estudos que fazem revisões sobre o assunto, abordando desde fundamentos teóricos até avanços mais recentes em materiais e aplicações. De forma geral, os supercapacitores são apresentados como uma

tecnologia promissora para aplicações que demandam alta densidade de potência, destacando-se por sua elevada capacidade de ciclagem e rápida resposta dinâmica. A literatura também aponta que sua utilização em conjunto com bancos de baterias é especialmente vantajosa, formando sistemas híbridos capazes de combinar alta potência instantânea com maior densidade de energia, o que os torna adequados para aplicações veiculares e industriais de alta exigência. Em (ŞAHIN; BLAABJERG; SANGWONGWANICH, 2022), é apresentada uma revisão extensa que discute a evolução dos supercapacitores, seus princípios de funcionamento, classificações, materiais empregados e desenvolvimentos tecnológicos, além de destacar os principais fabricantes e modelos comerciais disponíveis. De forma complementar, (IRO; SUBRAMANI; DASH, 2016) revisa os materiais utilizados em eletrodos de supercapacitores, enfatizando suas propriedades eletroquímicas e o impacto dessas características no desempenho dos dispositivos. Em (KARTHIKEYAN *et al.*, 2021), os autores realizam uma análise detalhada das diferentes categorias de supercapacitores, explicando seus aspectos construtivos e comparando suas características — como densidade de energia e densidade de potência — com outros sistemas de armazenamento, incluindo baterias e células a combustível. Já (SIRMANNE; KULARATNA; ARAWWAWALA, 2023) apresenta uma comparação entre diferentes famílias de supercapacitores comerciais, destacando avanços recentes em materiais e técnicas de engenharia que têm impulsionado melhorias de desempenho.

No contexto de aplicações energéticas, (ZHANG; GU; CHEN, 2023) oferece uma revisão abrangente sobre o uso de supercapacitores em sistemas de energia renovável, incluindo uma análise financeira detalhada dos custos de aquisição desses componentes. Por fim, (KUPAROWITZ *et al.*, 2017) discute os principais mecanismos de degradação e confiabilidade dos supercapacitores, abordando processos de envelhecimento eletroquímico e seus impactos na vida útil e no desempenho operacional.

Perpassados os temas de baterias e supercapacitores, a associação entre os dois elementos é vista de forma bastante promissora, sendo amplamente debatida na literatura em diferentes cenários. Em (LIMA, 2025), é analisada a possibilidade de integrar um sistema híbrido de armazenamento em um caminhão fora-de-estrada, buscando melhorar o desempenho operacional e oferecer uma solução menos degradante ao meio ambiente no contexto da mineração. Em (TRAVASSOS; SOARES; CUPERTINO, 2024), é proposta a implementação de um sistema de armazenamento de energia baseado no uso de baterias também para caminhões fora-de-estrada, abordando o mesmo problema de reaproveitamento da energia regenerada em declives para auxiliar na tração, com foco na redução do consumo de combustível e na mitigação de emissões. De forma semelhante, (MORAES, 2020) apresenta uma proposta aplicada a locomotivas, explorando a implementação de sistemas híbridos com o objetivo de melhorar desempenho e eficiência energética. No contexto de aplicações estacionárias,

(BARELLI *et al.*, 2018) discute a implementação de sistemas híbridos em plantas fotovoltaicas, apresentando soluções de hardware — como conversores de três portas — para o direcionamento de potência entre os componentes. Ainda sobre conversores de três portas, (WANG *et al.*, 2020) revisa diferentes topologias de conversores DC-DC, destacando sua importância para integrar múltiplas fontes e cargas em sistemas de fornecimento de energia. Por fim, (BURKART; KOLAR, 2013) e (DOMINGUES-OLAVARRÍA *et al.*, 2017) apresentam referências de custos para aquisição e montagem de conversores DC-DC, abrangendo desde semicondutores até o produto final, fornecendo subsídios relevantes para análises econômicas de implementação.

Em (TICONA; DELBÉM, 2008) são apresentado fundamentos e aplicações de diversos algoritmos evolutivos para otimização multi-objetivo, sendo destacados os métodos NSGA-II e SPEA.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo Geral

Desenvolver e consolidar uma metodologia sistemática para o dimensionamento ótimo de sistemas híbridos de armazenamento de energia (HESS) aplicados a caminhões fora de estrada utilizados em mineração, integrando modelagem energética, arquitetura hierárquica de controle, simulação dinâmica e otimização econômica, com base no perfil real de potência da operação.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Modelar o perfil de potência de caminhões de mineração a partir de dados operacionais reais, caracterizando as demandas energéticas associadas aos ciclos de tração e frenagem regenerativa;
- Propor uma arquitetura hierárquica de controle em múltiplos níveis para o HESS;
- Desenvolver modelos paramétricos para o dimensionamento dos bancos de baterias e supercapacitores, considerando limites de tensão, corrente, estado de carga e critérios simplificados de degradação;
- Formular uma função objetivo de natureza tecnoeconômica, incorporando custos de investimento, reposição ao longo da vida útil, taxa mínima de atratividade e benefício econômico associado à recuperação de energia regenerativa;
- Implementar um algoritmo de otimização capaz de determinar a configuração ótima do HESS para diferentes perfis operacionais e cenários econômicos;

- Avaliar, por meio de simulação dinâmica integrada à estratégia de controle proposta, o desempenho energético dos sistemas ótimos obtidos, verificando sua capacidade de absorção de energia regenerativa e seu comportamento ao longo do ciclo operacional;
- Realizar análises de sensibilidade paramétrica para investigar o impacto da variação de custos, preço do diesel, taxa de desconto e demais parâmetros críticos sobre o dimensionamento ótimo e a viabilidade econômica;
- Consolidar uma metodologia genérica e replicável, aplicável a diferentes minas e cenários energéticos, capaz de apoiar decisões técnicas relacionadas à hibridização de caminhões de mineração.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está organizado da seguinte forma. No Capítulo 1 é apresentada a introdução do problema, incluindo sua contextualização, os objetivos gerais e específicos, bem como uma revisão da literatura sobre trabalhos correlatos e a produção bibliográfica associada ao tema.

No Capítulo 2 são apresentados os fundamentos teóricos e as metodologias de análise adotadas para entender e abordar o problema em estudo, no qual são desenvolvidos e analisados modelos para representar o comportamento energético do caminhão, dos subsistemas de conversão e armazenamento, além da introdução dos principais conceitos necessários à compreensão do sistema proposto.

No Capítulo 3 é realizada a Modelagem e Projeto do Sistema Híbrido de Armazenamento de Energia, propondo um modelo computacional para representar o comportamento energético dos subsistemas integrados no powertrain híbrido-elétrico com armazenamento híbrido, a base de SC (supercapacitores) e BESS (baterias).

No Capítulo 4 são apresentados os resultados da simulação computacional do modelo proposto, submetido a alguns perfis de tração, e os resultados de um processo de otimização do dimensionamento de subsistemas de armazenamento, dependendo dos perfis energéticos demandados por diferentes minas. Além disso, nesse capítulo é feita uma análise de sensibilidade, comparando o resultado inicial obtidos com diversos cenário a fim de comprovar a viabilidade técnica e financeira de um projeto desse porte a variações do mercado.

Por fim, no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões do trabalho, bem como as perspectivas para trabalhos futuros.

2 Fundamentos Teóricos e Metodologias Adotadas

2.1 SISTEMA EM ESTUDO

Para o presente trabalho, o veículo de referência para a análise de um protótipo de caminhão híbrido-elétrico com sistema híbrido de armazenamento de energia (*Hybrid Energy Storage System – HESS*) é o caminhão fora-de-estrada Komatsu 730E, com capacidade nominal de carga de 300 toneladas.

O caminhão adotado como base para o estudo é do tipo diesel-elétrico, sendo equipado com um motor de 2000 hp (aproximadamente 1,5 MW), responsável por acionar mecanicamente um gerador síncrono trifásico.

O gerador possui dois enrolamentos auxiliares (terciários monofásicos) no estator: um destinado à autoexcitação do rotor da própria máquina síncrona (enrolamento de campo do gerador) e outro responsável pela excitação de campo nos estatores dos motores de corrente contínua (c.c.) de tração. Isso permite que a excitação das máquinas seja realizada sem a necessidade de transformadores adicionais dedicados aos retificadores das excitatrizes estáticas.

A tensão trifásica gerada é conectada a um retificador de seis pulsos a diodos, que realiza a conversão CA-CC, alimentando diretamente o barramento c.c. principal do sistema de tração. Nesse barramento, encontram-se conectados os dois motores elétricos de tração, um por roda motriz, interligados eletricamente em série.

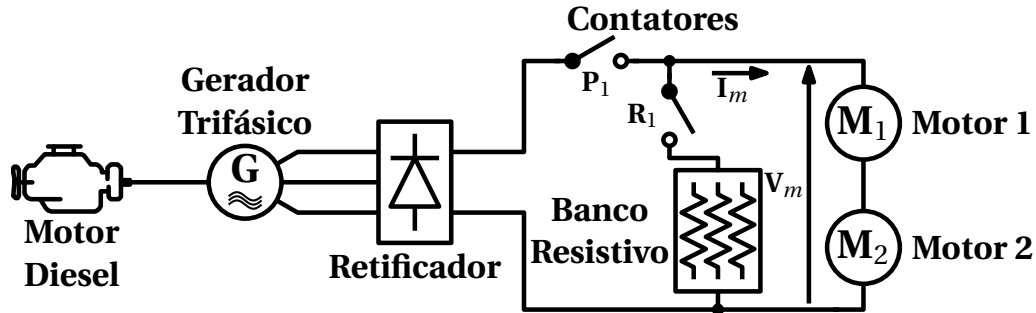
Além dos motores, está conectado no barramento c.c. um banco resistivo destinado à frenagem dinâmica (dissipativa). Durante a desaceleração do veículo, a energia cinética convertida em energia elétrica pelos motores c.c. operando como geradores é dissipada nessas grades resistivas (ou grades de retardo, conforme referido no manual (KOMATSU LTD., 2000)). No sistema original, essa energia gerada durante a frenagem dinâmica é integralmente dissipada na forma de calor, caracterizando uma operação não regenerativa.

A Figura 2.1 apresenta o diagrama elétrico e simplificado da arquitetura original do sistema de tração híbrido-elétrico (*powertrain*) do Komatsu 730E.

O caminhão opera essencialmente em dois modos principais: tração e frenagem dinâmica (ou retardo, como referido no manual (KOMATSU LTD., 2000)). A transição entre esses modos ocorre conforme a atuação do operador nos comandos de aceleração e frenagem, e, conseqüentemente, pelo acionamento, coordenado pelo sistema de controle, dos contadores $\mathbf{P}_1$ e $\mathbf{R}_1$ localizados na cabine elétrica.

Durante o modo de tração, a energia mecânica convertida pelo conjunto motogerador é retificada e fornecida ao barramento c.c., alimentando diretamente a armadura dos motores de tração. A tensão retificada é controlada pela excitação do

Figura 2.1 – Arquitetura simplificada do sistema de tração diesel-elétrico original do caminhão fora-de-estrada Komatsu 730E.



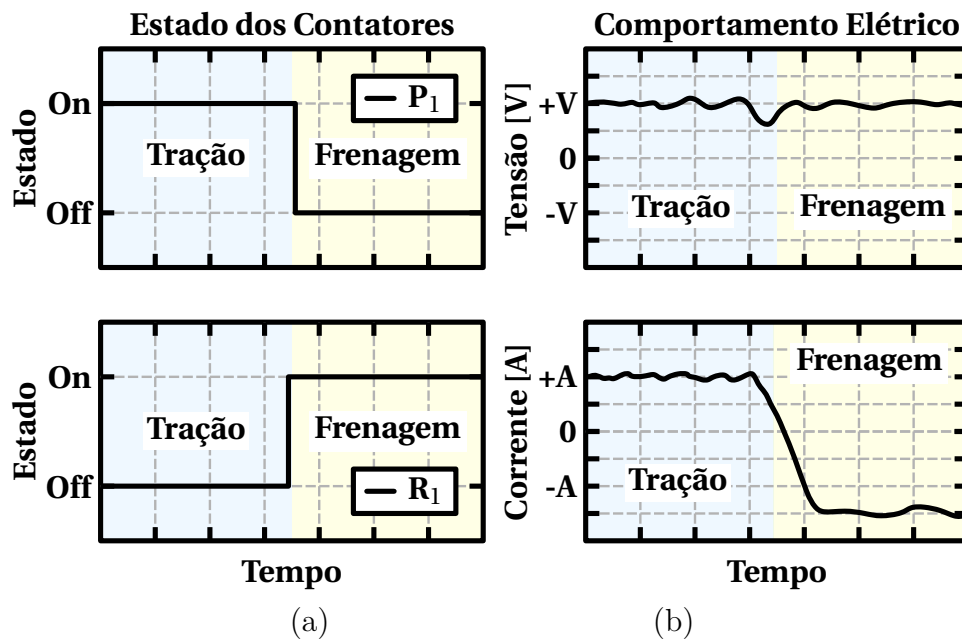
Fonte: Elaborado pelo autor.

gerador; ou seja, o controle de potência e torque nos motores de tração é realizado diretamente por meio do ajuste das correntes de excitação nos campos das máquinas (motores e alternador).

No modo de frenagem dinâmica, parte da energia cinética do veículo é convertida em energia elétrica pelos motores, operando como geradores de corrente contínua. No sistema original, essa energia é direcionada ao banco resistivo, onde é dissipada, produzindo o torque de frenagem nas rodas motorizadas.

A Figura 2.2 ilustra o comportamento típico da tensão e da corrente do sistema ao longo desses modos de operação, correlacionando-os com o acionamento dos contatores que realizam o manejo da potência elétrica.

Figura 2.2 – Comportamento típico do sistema diesel-elétrico nos modos de tração e frenagem - (a) estado dos contatores; (b) tensão e corrente no barramento de tração.



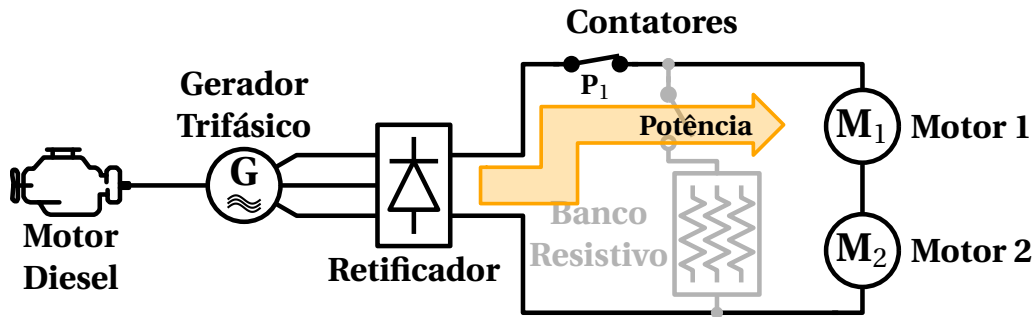
(a) (b)
Fonte: Elaborado pelo autor.

No modo de tração, ilustrado na Figura 2.3, o contator P_1 é fechado, conectando o barramento c.c. aos motores. Nessa condição, a tensão aplicada aos motores (V_m)

e a corrente de armadura (I_m) assumem valores positivos, fornecendo potência motriz (P_m) e, conseqüentemente, propelindo o veículo ($P_m = V_m I_m > 0$). Nesse regime, o torque eletromagnético desenvolvido é proporcional à corrente de armadura ($T_e \propto I_m$), resultando em conjugado motor nos eixos das rodas.

A operação em marcha à ré é obtida por meio da inversão da polaridade da tensão e corrente aplicadas às armaduras ($V_m \rightarrow -V_m$), realizada por um contator reversor de dois polos instalado na caixa de ligação dos motores de roda (não mostrado nas figuras), mantendo-se o mesmo sentido da tensão no barramento c.c. e uma potência motriz positiva.

Figura 2.3 – Arquitetura original no modo de operação de tração.

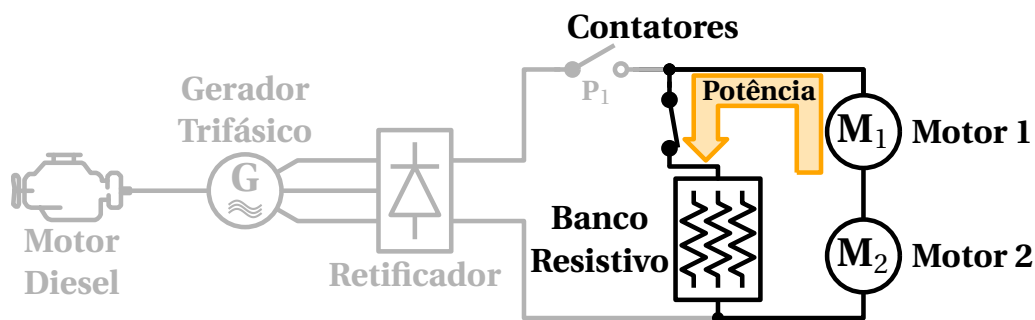


Fonte: Elaborado pelo autor.

Já no modo de frenagem, ilustrado na Figura 2.4, o contator R_1 é fechado e o contator P_1 é aberto, redirecionando a conexão dos motores c.c. para o banco resistivo de frenagem dinâmica (R_{grid}). Nessa configuração, a tensão V_m permanece positiva, enquanto a corrente I_m assume valores negativos, caracterizando a operação dos motores das rodas como geradores. Nesse regime, a tensão nos terminais dos motores (V_m) mantém polaridade positiva, enquanto a corrente das armaduras inverte seu sentido ($I_m < 0$), implicando potência motriz negativa no barramento ($P_m = V_m I_m < 0$). Como o torque eletromagnético é proporcional à corrente ($T_e \propto I_m$), a inversão de I_m resulta em conjugado contrário ao sentido de rotação, caracterizando a operação dos motores de roda como geradores. A energia cinética do veículo é, então, convertida em energia elétrica e dissipada no banco resistivo (grades de retardo) sob a forma de calor ($P_R = R_{grid} I_m^2$), promovendo uma desaceleração gradual e controlada do caminhão.

Para a imobilização completa do veículo, especialmente em baixas velocidades, dada a menor capacidade de geração das rodas ($V_m \propto \omega_m$), o sistema é complementado por freios hidráulico-mecânicos a disco instalados nas rodas.

Figura 2.4 – Arquitetura original no modo de operação de frenagem dinâmica.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A descrição apresentada nesta seção apenas resume o funcionamento do sistema de potência do caminhão em sua configuração original. Ressalta-se que o sistema completo inclui ainda os circuitos de excitação das máquinas elétricas, responsáveis pelo controle de tensão e torque nos motores de tração, os quais serão detalhados nas seções subsequentes. Outros subsistemas mecânicos, hidráulicos e auxiliares do veículo não são abordados neste trabalho, por não estarem diretamente relacionados ao escopo da proposta de introdução de um sistema de armazenamento de energia híbrido.

2.2 ELEMENTOS DO CAMINHÃO KOMATSU 730E

Conforme apresentado na seção anterior, o caminhão Komatsu 730E é equipado com um sistema de tração diesel-elétrico composto por motor diesel, gerador síncrono trifásico, retificador, motores de corrente contínua, banco resistivo de frenagem dinâmica e respectivos sistemas de excitação e controle. Nesta seção, esses componentes são descritos individualmente, enfatizando seus princípios de funcionamento, características construtivas e papel no fluxo de potência do sistema. As Figuras 2.5 e 2.6 ilustram a disposição geral de parte desses elementos no chassi do caminhão.

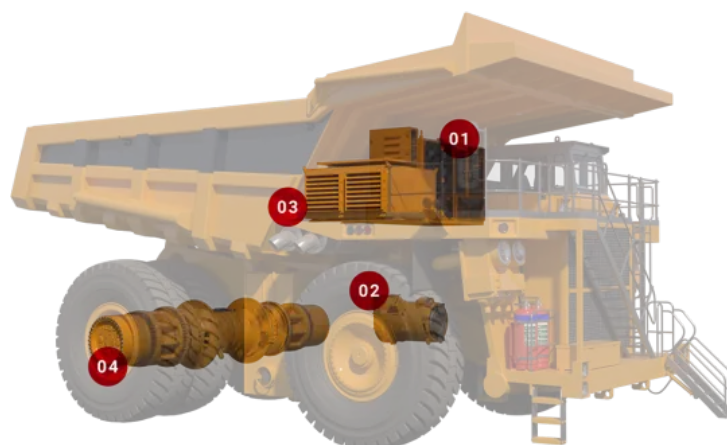
Os principais componentes destacados na Figura 2.5 são:

1. **Gabinete elétrico:** Estrutura compartimentada que abriga os contatores de tração e frenagem, responsáveis pela comutação entre os modos operacionais do sistema. Inclui ainda os contatores dedicados à interconexão entre circuitos de excitação e enrolamentos de campos, e à reconfiguração do banco resistivo, permitindo o ajuste dos níveis de frenagem dinâmica. Em compartimento adjacente encontram-se os módulos eletrônicos de controle, placas de instrumentação, sistemas de aquisição de sinais e conversores associados à excitação de campo.
2. **Gerador elétrico:** Máquina síncrona trifásica (alternador) acoplada mecanicamente ao motor diesel (não visível na Figura 2.5, mas visível na Figura 2.6). Sua rotação é diretamente determinada pela velocidade do motor

primário, enquanto o controle da tensão fornecida ao sistema de tração é realizado por meio do ajuste da corrente de excitação no seu enrolamento de campo.

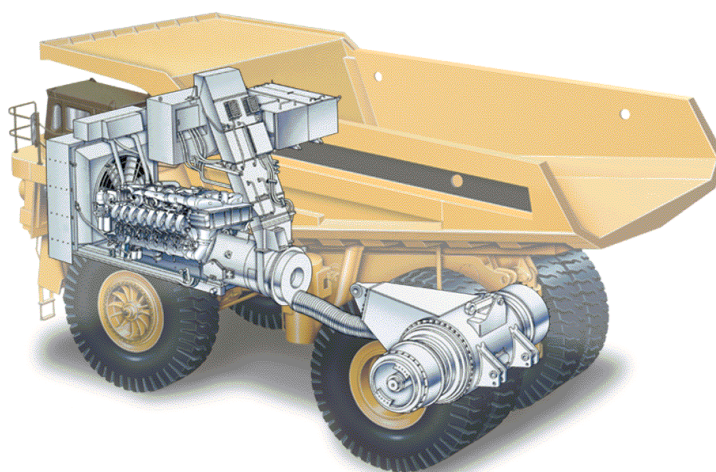
3. **Banco resistivo:** Conjunto modular de resistências de potência na forma de grades, projetado para dissipar a energia elétrica proveniente da operação durante a frenagem dinâmica. A configuração elétrica do banco pode ser alterada por meio da comutação de contadores, variando o valor equivalente de resistência e, conseqüentemente, o nível de torque de frenagem.
4. **Motores de corrente contínua:** Instalados no eixo traseiro, com um motor dedicado a cada roda. Esses motores são responsáveis pela conversão eletromecânica de energia durante a tração e operam como geradores no regime de frenagem dinâmica. O conjunto é acoplado à suspensão e chassi por a um

Figura 2.5 – Principais componentes elétricos de um caminhão fora-de-estrada com tração diesel-elétrica.



Fonte: Wabtec Corporation (2024)

Figura 2.6 – Componentes do *powertrain* do Komatsu 730E.



Fonte: Hartenstine (2003), Komatsu Cummins Chile Ltda (2006)

compartimento submetido a pressão positiva (visível na 2.6), garantindo ventilação forçada e controle térmico adequado dos motores.

Nas subseções seguintes, são detalhados os principais componentes do sistema de tração, incluindo aspectos construtivos, especificações técnicas e princípios de funcionamento e operação. Também são apresentados os circuitos de excitação responsáveis pela regulação de campo das máquinas elétricas, uma vez que todo o gerenciamento do fluxo de potência entre geração, tração e frenagem dinâmica é realizado por essas excitatrizes estáticas.

2.2.1 Motor Diesel

O caminhão fora-de-estrada para mineração Komatsu 730E é equipado com o motor diesel Cummins K2000E, que atua como unidade motriz (fonte primária) do sistema de tração. Trata-se de um motor diesel de alta potência, projetado especificamente para aplicações de caminhões de mineração. A Figura 2.7 ilustra o modelo do motor.

O motor Cummins K2000E é um motor diesel de 16 cilindros em configuração V16, com aproximadamente 3 L por cilindro, totalizando cerca de 50 L de deslocamento volumétrico. É capaz de fornecer 2000 HP (1492 kW de potência efetiva no eixo – *brake power*), com torque máximo de 7864 N m (5800 lb ft) a 1500 rpm.

A Figura 2.8 apresenta três curvas fundamentais para a análise do desempenho do motor: torque versus rotação, potência versus rotação e consumo específico versus rotação. Essas curvas são essenciais para a compreensão da dinâmica de operação do grupo motogerador e para a definição de estratégias de controle que permitam a operação em regiões de maior eficiência energética.

2.2.2 Gerador Síncrono

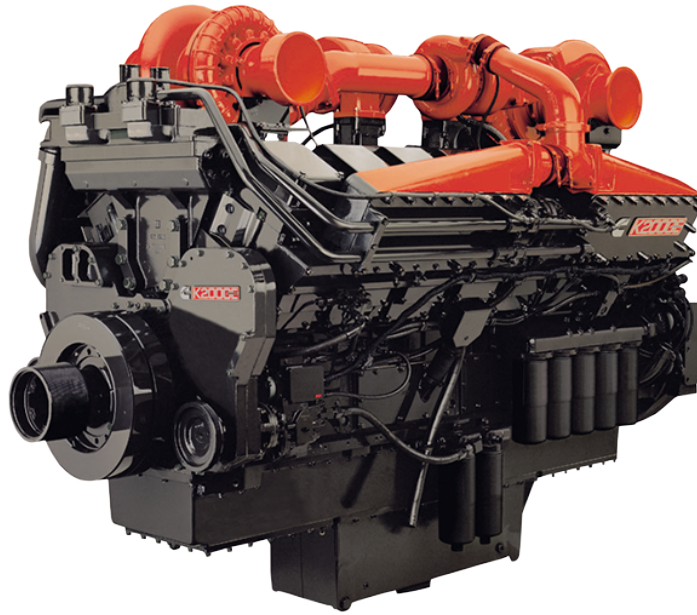
O gerador síncrono principal (alternador) do sistema de tração é acoplado mecanicamente ao eixo do motor diesel. Trata-se de uma máquina trifásica, autoexcitada, que possui dois enrolamentos auxiliares independentes no estator: um destinado à autoexcitação do próprio alternador e outro destinado à excitação dos motores de tração em corrente contínua.

A Figura 2.9 ilustra a construção esquemática do gerador.

O gerador opera produzindo tensão alternada trifásica que, após retificação, alimenta o barramento c.c. de tração com tensão de até 1700 V, sendo o valor nominal aproximadamente 1000 V a 1875 rpm.

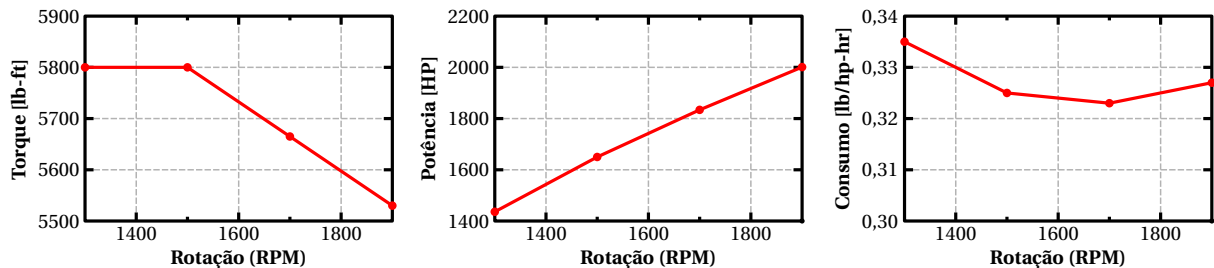
A máquina possui 8 polos (4 pares) e enrolamentos estatóricos conectados em configuração Y. Nessa condição, a frequência elétrica nominal é dada por $f_e = \frac{p \cdot n}{120}$, na

Figura 2.7 – Motor diesel V16 Cummins K2000E, de potência nominal 2000 hp.



Fonte: Cummins Inc. (2026), Cummins Inc (2003)

Figura 2.8 – Curvas características do motor Cummins K2000E: (a) torque versus rotação, (b) potência versus rotação e (c) consumo específico versus rotação.



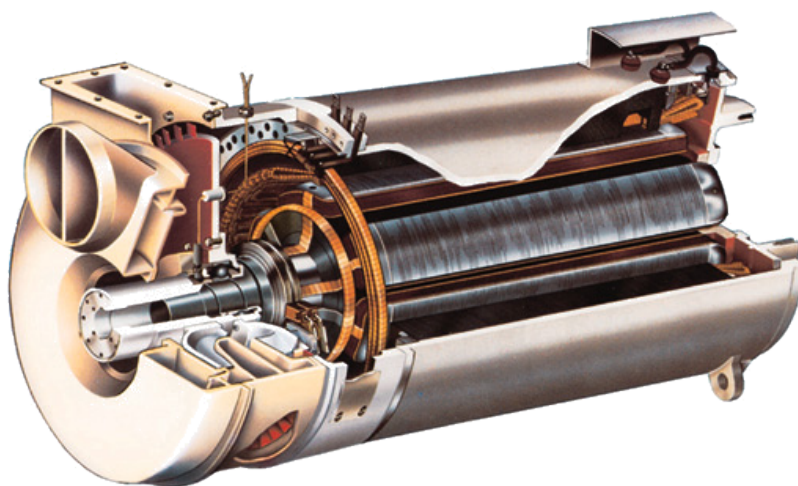
Fonte: Adaptado de Cummins Inc (2003)

qual p é o número de polos e n a rotação em rpm, resultando em aproximadamente 125 Hz para a rotação nominal de 1875 rpm. A tensão terminal no estator é regulada por meio do controle da corrente de excitação de campo do alternador (rotor).

A integração mecânica entre o motor diesel e o gerador síncrono constitui o conjunto motogerador primário do sistema de tração. O alternador é rigidamente acoplado ao eixo do motor, permitindo a conversão direta da potência mecânica fornecida pelo motor diesel em potência elétrica trifásica.

A Figura 2.10 apresenta o conjunto integrado motor-alternador montado fora do caminhão.

Figura 2.9 – Corte esquemático do gerador síncrono G.E. GTA-22, evidenciando estator, rotor e respectivos enrolamentos. Há um soprador (*blower*) diretamente acoplado ao eixo, destinado ao arrefecimento dos componentes elétricos do sistema de tração (retificador principal e gabinete elétrico).



Fonte: Hartenstine (2003), Komatsu Cummins Chile Ltda (2006), Mott Equipment (2026)

Figura 2.10 – Conjunto motogerador do caminhão Komatsu 730E, constituído pelo motor diesel Cummins K2000E, pelo sistema de arrefecimento por radiador (ao fundo) e pelo gerador síncrono principal G.E. GTA-22 acoplado mecanicamente ao eixo do motor, localizado na região frontal da imagem.



Fonte: Mott Equipment (2026)

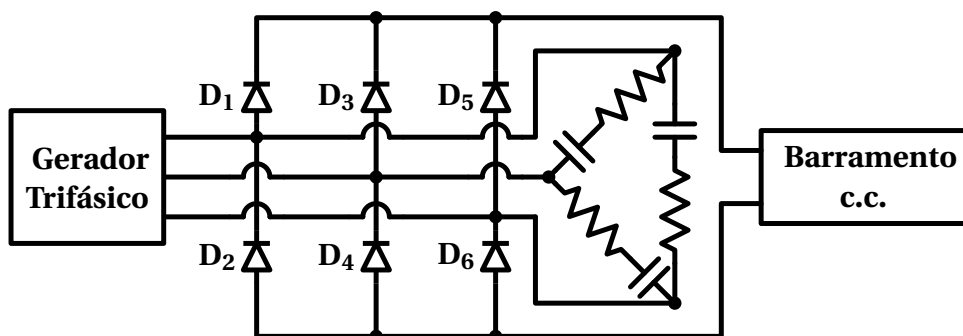
2.2.3 Retificador Principal e Filtro

O retificador principal é do tipo trifásico de seis pulsos, composto por diodos semicondutores. Sua função é converter a tensão alternada fornecida pelo alternador GTA-22 em tensão contínua, alimentando diretamente o barramento c.c. do sistema de tração.

Por se tratar de um retificador não controlado, a tensão no barramento depende diretamente da tensão eficaz de linha do gerador síncrono e da carga conectada. Um filtro de entrada é associado ao retificador com o objetivo de reduzir a ondulação de tensão e mitigar componentes harmônicas.

A Figura 2.11 apresenta o esquemático do retificador, enquanto a Figura 2.12 mostra o conjunto instalado no caminhão. O painel retificador está localizado em um duto de ventilação conectado ao soprador acoplado mecanicamente ao eixo do alternador, conforme ilustrado na Figura 2.13. Essa configuração garante refrigeração por convecção forçada, essencial para a dissipação térmica dos dispositivos semicondutores de potência.

Figura 2.11 – Retificador trifásico de seis pulsos com filtro associado, utilizado para alimentação do barramento c.c. de tração.



Fonte: Elaborado pelo autor.

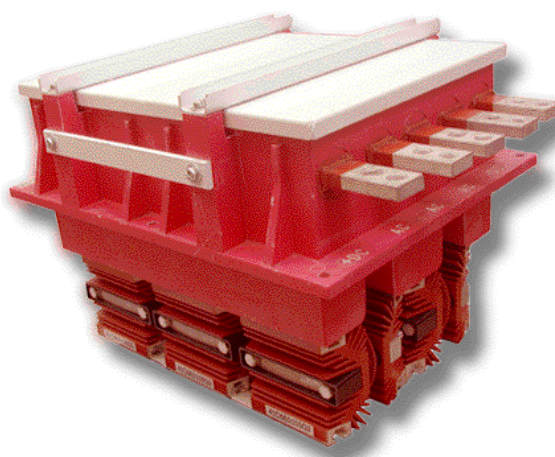
2.2.4 Grades de Frenagem Dinâmica

As grades de frenagem dinâmica, também denominadas banco resistivo de retardo, são responsáveis pela frenagem dissipativa do caminhão. Durante a operação em frenagem elétrica, os motores de tração operam como geradores c.c., convertendo energia mecânica em energia elétrica, que é dissipada sob a forma de calor nos resistores de potência. Esse conjunto é capaz de absorver uma potência máxima de frenagem de aproximadamente 2759 kW (KOMATSU, 2001).

O sistema permite diferentes níveis discretos de frenagem por meio da combinação de contatores que associam resistores em distintas configurações elétricas. A Figura 2.14 apresenta o esquemático do banco resistivo.

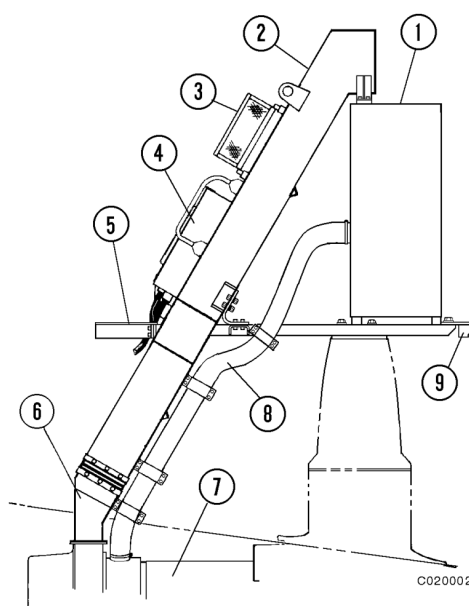
O fechamento seletivo dos contatores **RP1**, **RP2**, **RP3**, **RP4** e **RP5** define o nível de corrente de frenagem e, consequentemente, o torque resistivo aplicado às rodas.

Figura 2.12 – Painel 17FM528 do retificador trifásico principal de tração, com a entradas c.a. (três barramentos internos) e a saída c.c. (dois barramentos dos extremos). Os dispositivos semicondutores encontram-se na parte inferior do painel, posicionados no fluxo de ar do soprador do alternador, sendo refrigerados por convecção forçada.



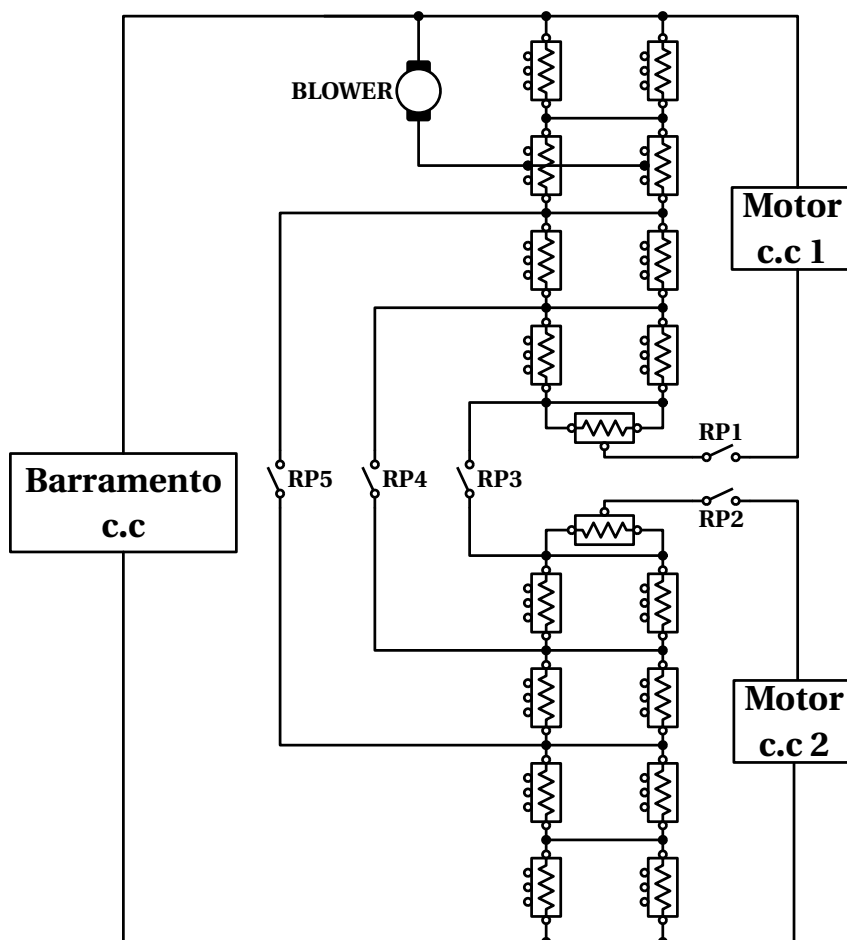
Fonte: Komatsu Cummins Chile Ltda (2006).

Figura 2.13 – Instalação do painel retificador 17FM528 no espaço traseiro do deck do caminhão, acima do alternador: (1) gabinete elétrico; (2) duto de entrada de ar do *blower*; (3) painel do filtro RC; (4) painel do retificador; (5) deck traseiro; (6) duto de transição; (7) alternador e *blower*; (8) duto de ar para gabinete elétrico; (9) deck dianteiro.



Fonte: Komatsu Ltd. (2000).

Figura 2.14 – Esquemático do banco de frenagem dinâmica (grades resistivas), com associação controlada por contadores.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o resfriamento térmico das grades resistivas, um motor c.c. série aciona um soprador (*blower*), promovendo convecção forçada. A Figura 2.15 ilustra o conjunto instalado no caminhão.

Além da frenagem elétrica, o veículo dispõe de freios hidráulico-mecânicos a disco, responsáveis pela parada completa do caminhão e pela retenção em baixas velocidades.

2.2.5 Motores CC de Tração

Os motores de tração são máquinas de corrente contínua com excitação independente (*separately excited – sepeex*). Cada motor possui dois enrolamentos de campo independentes, que podem ser conectados em série ou em paralelo por meio de contadores, permitindo a adaptação da característica torque-velocidade conforme a faixa de operação.

A Figura 2.16 apresenta o diagrama de ligação dos motores e de seus circuitos de campo. A Figura 2.17 ilustra a construção do motor GE788FS e seu acoplamento mecânico ao conjunto roda-pneu.

Figura 2.15 – Vistas frontal e superior do banco de frenagem dinâmica, evidenciando os sopradores centrais responsáveis pela refrigeração por convecção forçada nas grades resistivas.



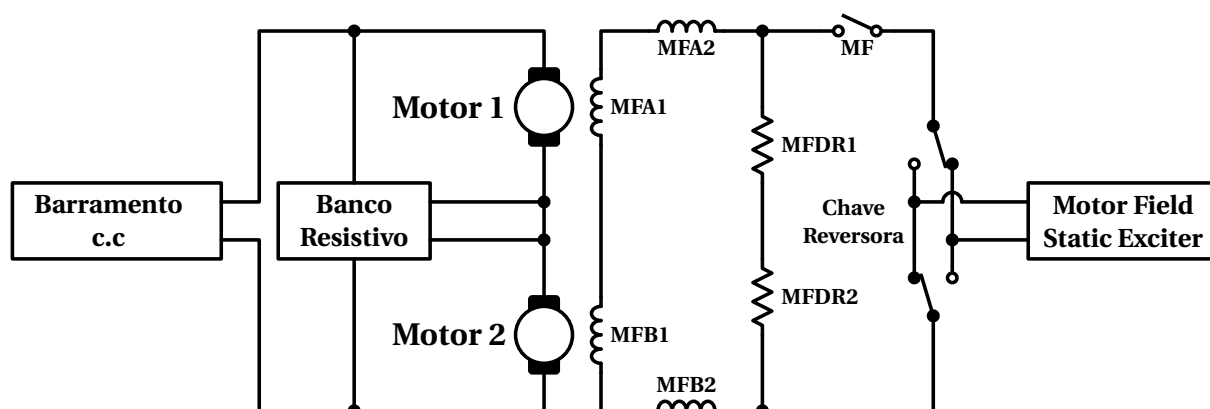
Fonte: DuBois Mining (2026)

Os motores são alimentados diretamente pelo barramento c.c. principal proveniente do conjunto gerador-retificador. Os enrolamentos de campo encontram-se conectados em série entre si e são alimentados pelo sistema de excitação denominado *Motor Field Static Exciter (MFSE)*.

O controle do sentido de rotação é realizado por meio de um contator reversor bipolar, que inverte a polaridade aplicada ao circuito de armadura, alterando o sentido do torque eletromagnético.

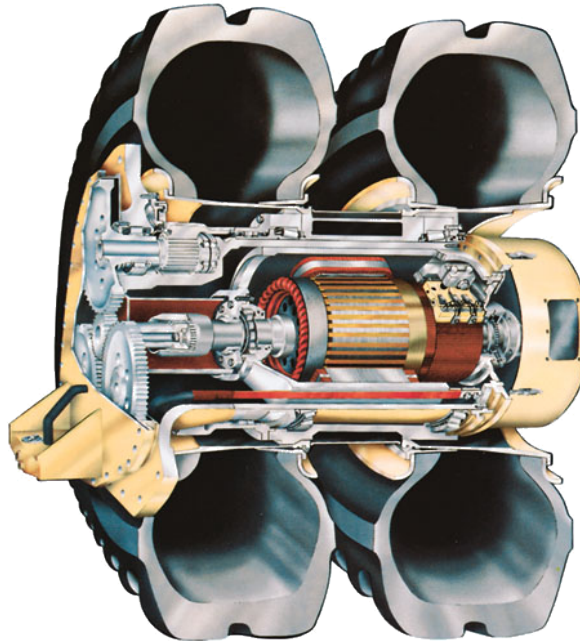
Um contator identificado como **MF** conecta o circuito de excitação às bobinas de campo. Para permitir a desmagnetização controlada quando ocorre a abertura do contator **MF**, são utilizados os resistores **MFDR1** e **MFDR2**, que promovem a dissipação da energia armazenada no campo magnético.

Figura 2.16 – Diagrama elétrico dos motores de tração em corrente contínua e respectivos circuitos de excitação de campo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 2.17 – Corte esquemático de uma das rodas com o motor de tração c.c. GE788FS instalado, destacando armadura (rotor), comutador (à direita) e enrolamentos de campo (estator), além da transmissão planetária que acopla o eixo do motor às rodas (à esquerda).

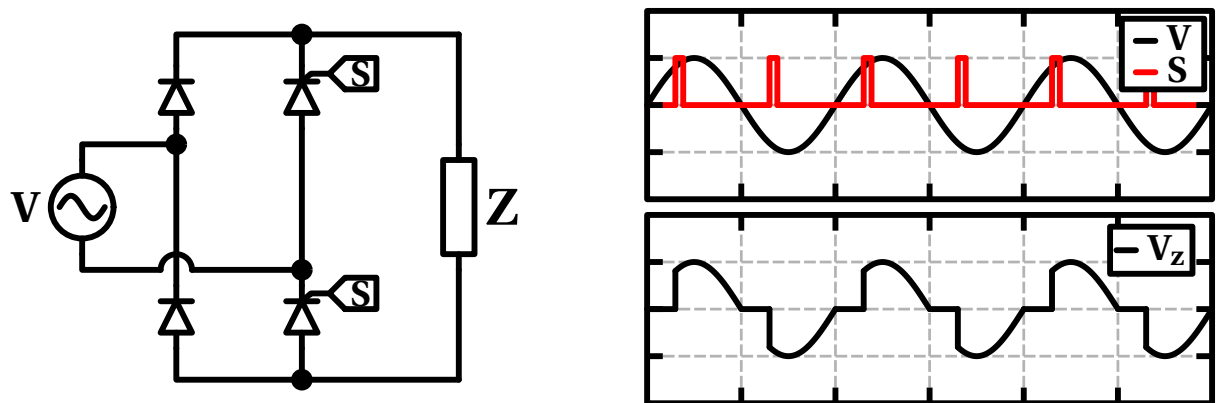


Fonte: Hartenstine (2003), Komatsu Cummins Chile Ltda (2006), Gambrenk Mining Engineering (2010)

2.2.6 Sistemas de Excitação

Os sistemas de excitação do caminhão Komatsu 730E são responsáveis pela alimentação dos circuitos de campo das máquinas elétricas que compõem o sistema de tração — motores c.c. e gerador principal. A energia destinada à excitação é proveniente de enrolamentos auxiliares monofásicos independentes, instalados no estator do gerador principal e denominados terciários, cujas tensões são posteriormente retificadas por conversores estáticos, como o ilustrado na Figura 2.18.

Figura 2.18 – Retificador monofásico semicontrolado a tiristores tipo SCR - esquema do circuito de potência e formas de onda típicas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O circuito apresentado na Figura 2.18 representa um retificador monofásico

semicontrolado alimentando uma carga genérica Z . A ponte é composta por diodos em um dos braços e tiristores (SCR) no outro, caracterizando a estrutura como semicontrolada. O sistema de controle do caminhão (STATEX) gera pulsos de disparo sincronizados com a passagem por zero da tensão de alimentação, garantindo a referência temporal para o acionamento do retificador.

O ângulo de disparo α , definido como o atraso em relação à passagem por zero da tensão, determina o instante de entrada em condução do tiristor correspondente e, conseqüentemente, o valor médio da tensão aplicada à carga. No circuito em questão, por opção construtiva do fabricante – visando à simplificação do acionamento, um único pulso de disparo é enviado simultaneamente a ambos os SCRs, sendo a condução determinada pela polaridade instantânea da tensão de alimentação (i.e., um tiristor permanecerá reversamente polarizado e bloqueado, enquanto o outro, diretamente polarizado, entrará em condução).

Para cargas predominantemente indutivas ($Z \approx j\omega L$) e operação da corrente de carga em condução contínua, o valor médio da tensão de saída é uma função decrescente do ângulo de disparo, permitindo o controle da tensão e potência transferida à carga por meio da modulação de α , segundo a relação $V_Z = \frac{\hat{V}}{2\pi}(1 + \cos \alpha)$.

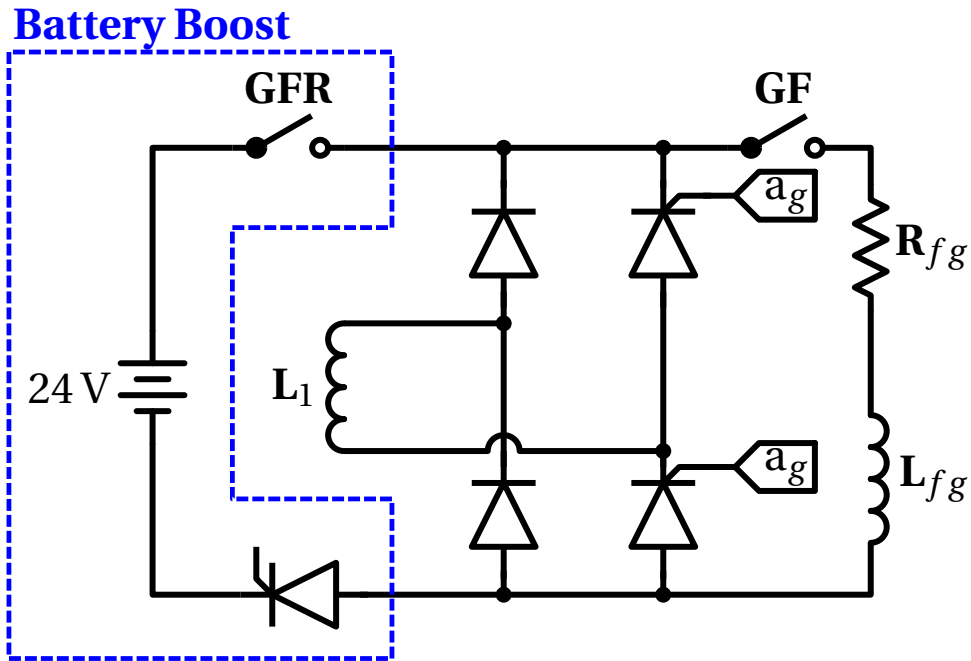
2.2.6.1 Excitatriz estática do alternador - *Alternator Field Static Exciter* - AFSE

A Figura 2.19 apresenta o circuito de potência empregado na excitação do campo do gerador principal (alternador), denominado *Alternator Field Static Exciter* (AFSE). O sistema utiliza um retificador semicontrolado, conforme descrito no início desta seção. A bobina $\mathbf{L}_1$ representa o enrolamento terciário do estator dedicado à excitação do próprio gerador, caracterizando uma configuração de autoexcitação e constituindo a fonte de alimentação da AFSE. Por sua vez, R_{fg} e L_{fg} representam, respectivamente, a resistência e a indutância do enrolamento de campo localizado no rotor do gerador (i.e., carga da AFSE).

Inicialmente, o gerador encontra-se completamente desexcitado e, portanto, mesmo com a máquina síncrona acoplada ao motor diesel em rotação, não há tensão induzida nos enrolamentos do estator. Nessas condições, não se estabelece campo magnético girante no interior da máquina e, conseqüentemente, não há também tensão induzida no enrolamento terciário responsável pela autoexcitação ($\mathbf{L}_1$), o qual se encontra conectado à AFSE.

Para viabilizar a excitação inicial da máquina — isto é, o estabelecimento de uma tensão mínima nos enrolamentos do estator, suficiente para que a AFSE passe a assumir a alimentação do campo do gerador — o enrolamento de campo é temporariamente alimentado por uma bateria com tensão na faixa de 24 V a 28 V. Essa bateria auxiliar é uma fonte independente, sendo também utilizada na partida do motor diesel, bem como pela alimentação dos sistemas auxiliares e de controle do caminhão.

Figura 2.19 – Diagrama simplificado do circuito de potência da excitatriz estática de campo do alternador (AFSE - *Alternator Field Static Exciter*).



Fonte: Elaborado pelo autor.

A conexão entre a bateria auxiliar e o enrolamento de campo do gerador é estabelecida por meio dos contatores **GF** e **GFR**, sendo o circuito complementado por um tiristor (SCR) conectado em série com a bateria, responsável pelo comando da energização durante esse procedimento. Esse arranjo auxiliar de partida é denominado pelo fabricante como **Battery Boost**. Estratégias análogas são amplamente empregadas em geradores síncronos de maior porte, como em usinas de geração, onde o procedimento é usualmente referido como *field flashing*.

Após essa excitação inicial, o enrolamento terciário L_1 passa a apresentar tensão induzida, permitindo que os pulsos de disparo a_g assumam progressivamente o controle da excitação. Uma vez estabelecida tensão suficiente na saída do retificador ($> 24 \text{ V}$ a 28 V), o SCR associado à malha do *Battery Boost* torna-se reversamente polarizado, deixando de conduzir e isolando eletricamente a bateria auxiliar do restante do circuito de excitação. Em seguida, o contator **GFR** é aberto, promovendo a desconexão definitiva da bateria auxiliar do enrolamento de campo.

A partir desse ponto, o gerador torna-se apto a operar no regime de autoexcitação através do retificador da AFSE. Contudo, nessa condição, o sistema torna-se potencialmente suscetível a instabilidades, incluindo colapso de tensão, tornando indispensável a atuação de uma malha de controle para estabilizar a corrente fornecida ao campo do alternador e, quando necessário — por exemplo, em situações de completa desexcitação da máquina, como durante a frenagem dinâmica —, promover a atuação do circuito de *Battery Boost*.

2.2.6.2 Excitatriz estática dos motores - *Motor Field Static Exciter* - MFSE

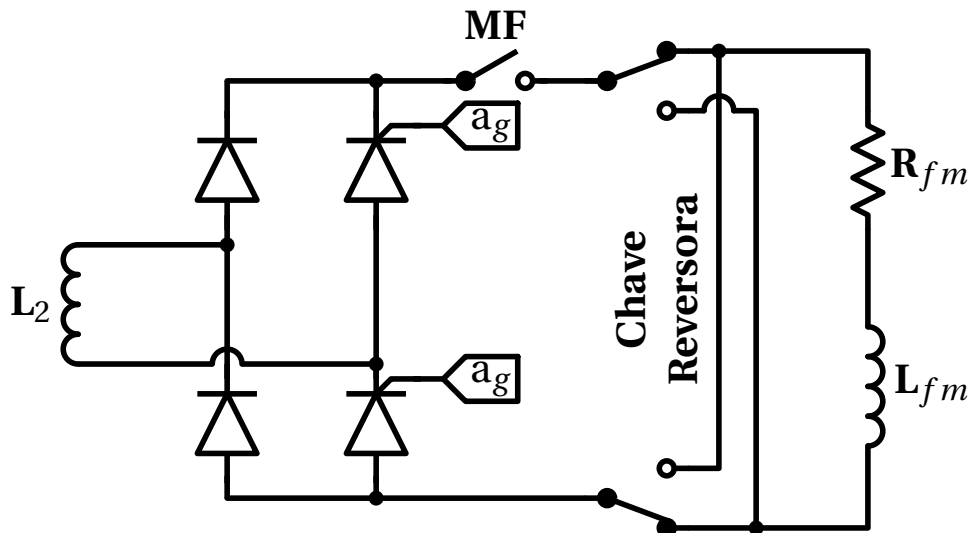
A Figura 2.20 apresenta o diagrama simplificado do circuito de excitação de campo dos motores c.c., denominado *Motor Field Static Exciter* (MFSE). Nesse diagrama, L_2 representa o enrolamento terciário do estator do gerador dedicado à alimentação das bobinas de campo dos motores de tração. Essas bobinas são modeladas por R_{fm} e L_{fm} , que representam, respectivamente, a resistência e a indutância do enrolamento de campo, localizado no estator dos motores.

No sistema de tração do Komatsu 730E, ambos os motores são associados em série — tanto na armadura quanto no circuito de campo. Assim, R_{fm} e L_{fm} representam a resistência e a indutância equivalentes aos enrolamentos de campo dos dois motores.

O sistema é composto por um retificador semicontrolado a SCR's e diodos, além de um contator **MF**, responsável pela conexão da saída da excitatriz aos enrolamentos de campo. O sentido de rotação é determinado por meio de uma contatora reversora de dois polos e duas posições, que promove a inversão do sentido da corrente nas bobinas de campo, possibilitando a reversão do sentido de rotação dos motores c.c.

O controle da corrente de campo é realizado em malha fechada, de forma análoga à descrita para a AFSE, por meio do ajuste do ângulo de atraso de disparo dos SCR's em relação à tensão no terciário L_2 . Embora o princípio de controle seja o mesmo, o comando de cada excitatriz é independente, sendo o ângulo de disparo de cada subsistema determinado pelo sistema supervisor do caminhão — ocupando um nível hierárquico superior de controle. O sistema supervisor estabelece as referências de corrente requeridas nos campos (gerador, motores) para a execução das manobras desejadas (movimentação à frente ou à ré, frenagem dinâmica, partida do campo do

Figura 2.20 – Diagrama simplificado do circuito de potência da excitatriz estática de campo dos motores (MFSE - *Motor Field Static Exciter*).



Fonte: Elaborado pelo autor.

alternador, entre outras), coordenando a atuação dos subsistemas de excitação.

2.3 SISTEMA DE ARMAZENAMENTO EM BATERIAS

O sistema de armazenamento em baterias é concebido a partir de associações série-paralelo. Para a construção de um banco modular, utilizam-se $N_{s,b}$ baterias em série e $N_{p,b}$ baterias em paralelo. Cada conjunto assim formado constitui um *pack*, que é tratado como um módulo básico. Os módulos, por sua vez, são conectados em série, totalizando $N_{m,b}$ módulos no banco. A Figura 2.21 ilustra a forma como será configurado o banco de baterias, destacando as associações em série, em paralelo e a organização modular de um *pack*.

Considerando V_b como a tensão nominal de cada célula, a tensão total do banco de baterias $V_{b,b}$ é dada por Equação 2.1.

$$V_{b,b} = V_b N_{s,b} N_{m,b} \quad (2.1)$$

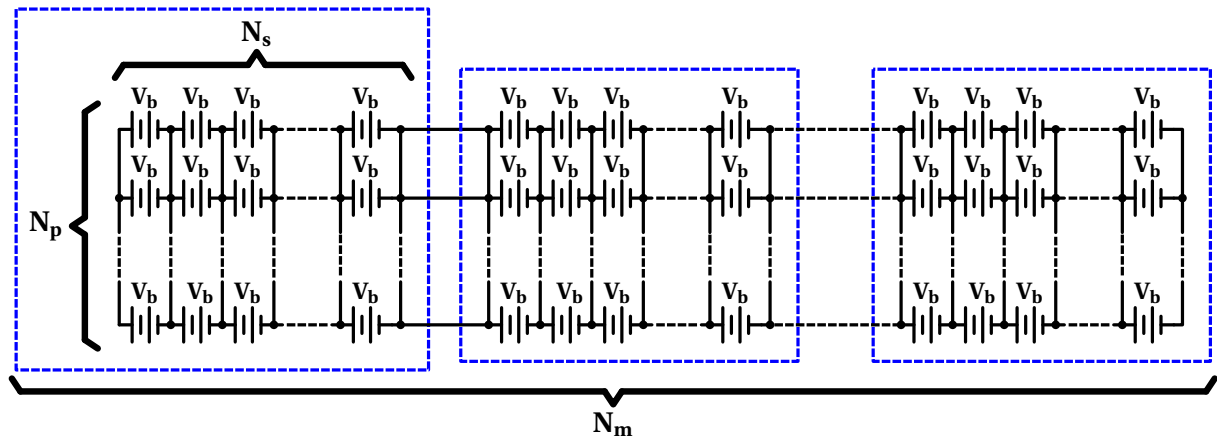
A energia total máxima armazenável no banco de baterias, $E_{m,b}$, é dada por Equação 2.2 em Wh, se C_b representa a capacidade nominal de cada bateria, em ampere-hora (Ah).

$$E_{m,b} = V_{b,b} N_{p,b} C_b \quad (2.2)$$

2.3.1 Características Eletroquímicas

A definição da química das baterias para veículos elétricos é amplamente discutida na literatura. Diferentes químicas apresentam características distintas, que devem ser avaliadas conforme a aplicação. De forma geral, além da composição química — que

Figura 2.21 – Configuração elétrica do banco de baterias em associações série-paralelo e organização modular.



Fonte: Elaborado pelo autor.

influencia aspectos como segurança, custo e estabilidade — são consideradas métricas como densidade de energia (gravimétrica ou volumétrica), vida útil (em ciclos ou anos), custo, densidade de potência, capacidade de carregamento rápido, gerenciamento de fim de vida e cadeia de fornecimento (PESARAN, 2023). Esses parâmetros são detalhados a seguir.

2.3.1.1 Densidade de Energia, Densidade de Potência e Energia Específica

A densidade (volumétrica) de energia corresponde à quantidade máxima de energia que pode ser armazenada em uma célula por unidade de volume (Wh L^{-1}). A energia específica (ou densidade gravimétrica), por sua vez, refere-se à energia armazenável por unidade de massa (Wh kg^{-1}). Embora distintos, esses termos são frequentemente utilizados de forma intercambiável na literatura e constituem parâmetros fundamentais na seleção de baterias.

Para veículos de passeio, os bancos de baterias são projetados com elevada densidade de energia, devido às restrições volumétricas e à necessidade de grande autonomia. Em veículos pesados, como ônibus e caminhões, as limitações volumétricas são menos restritivas, permitindo a utilização de bancos com maior energia específica, ainda que com densidade volumétrica inferior (PESARAN, 2023).

Outro parâmetro relevante é a densidade de potência, que expressa a capacidade da bateria de atender a demandas transitórias elevadas de potência, sendo usualmente indicada em W kg^{-1} . Embora seja um requisito importante, neste projeto essa função é parcialmente suprida pelo uso de supercapacitores.

2.3.1.2 Ciclo de Vida e Calendário de Vida

A vida útil de uma bateria é influenciada por diversos fatores, como temperatura de operação, profundidade de descarga (DoD – *Depth of Discharge*) e taxas de carga e descarga. Para sua caracterização, utilizam-se os conceitos de ciclo de vida e calendário de vida (PESARAN, 2023).

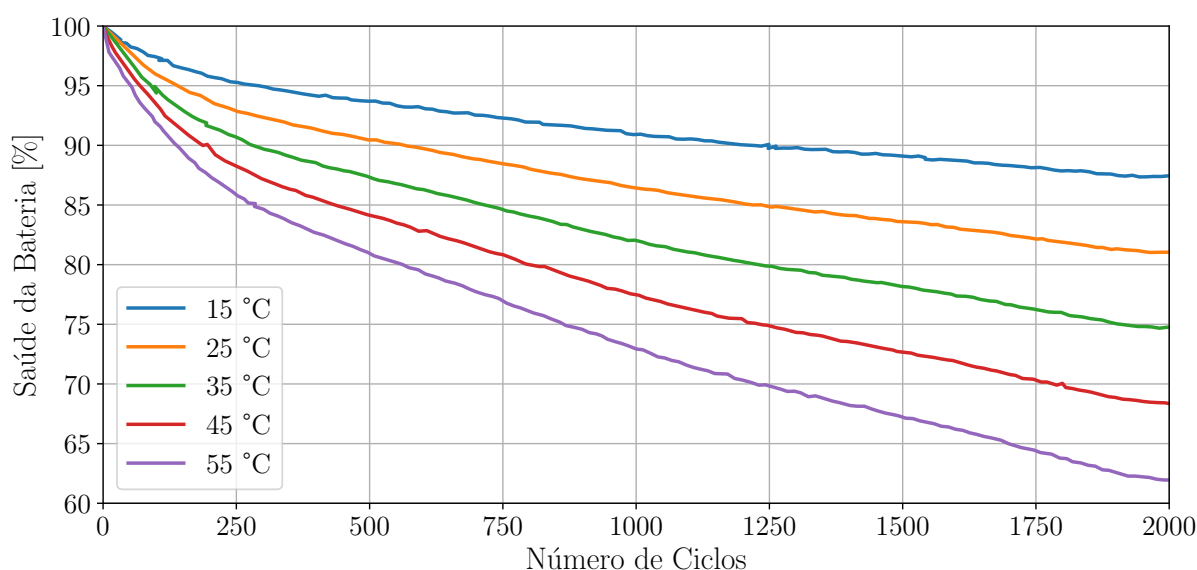
O ciclo de vida corresponde ao número de ciclos completos de carga e descarga que podem ser realizados até que a capacidade remanescente atinja um limite especificado — normalmente 70% ou 80% da capacidade nominal original — a partir do qual a bateria deixa de atender aos requisitos da aplicação. Esse parâmetro é geralmente apresentado pelo fabricante na forma de curvas que consideram diferentes temperaturas e taxas de descarga.

O calendário de vida, por sua vez, indica o tempo total de operação (em meses ou anos) até que a capacidade se reduza ao mesmo limite, independentemente do número de ciclos realizados (PESARAN, 2023). Baterias modernas de íons de lítio (Li-ion)

apresentam tipicamente vida útil entre 2000 e 4000 ciclos, podendo alcançar 5000 ciclos dependendo da química adotada, temperatura de operação e da profundidade de descarga dos ciclos, além de um calendário de vida próximo a 10–12 anos.

A Figura 2.22 exemplifica como evolui o estado de saúde de uma bateria (capacidade remanescente) em função do número de ciclos de operação, com a temperatura como um parâmetro, demonstrando como altas temperaturas afetam a degradação do ciclo de vida, reduzindo a capacidade remanescente na medida em que a temperatura de operação aumenta.

Figura 2.22 – Influência da temperatura no ciclo de vida da bateria.



Fonte: Adaptado de Pesaran (2023).

2.3.1.3 Avalanche Térmica e Segurança de Baterias

A segurança constitui um dos principais aspectos críticos em baterias embarcadas em veículos elétricos, devido ao risco de avalanche térmica, explosão e inflamabilidade. A avalanche térmica (*thermal runaway*) ocorre quando se estabelecem, no interior da bateria, reações altamente exotérmicas e autoaceleradas (i.e., o aumento da temperatura eleva a taxa dessas mesmas reações, liberando quantidades cada vez maiores de calor).

Grande parte das baterias de íons de lítio (Li-ion) de alto desempenho utiliza eletrólitos à base de carbonatos orgânicos, substâncias inflamáveis, além de cátodos compostos por óxidos metálicos capazes de liberar oxigênio em condições extremas de temperatura. A geração de calor inicial pode ser provocada por curtos-circuitos externos ou internos, sobrecarga, elevação da temperatura ambiente, operação em regime severo ou ainda pelo uso de uma bateria já significativamente degradada (e.g., com sinais de inchaço, indicando um acúmulo de gases provenientes dessas reações internas). Nessas condições, estabelece-se um processo de realimentação térmica positiva, no qual o

aumento da temperatura intensifica ainda mais as reações químicas exotérmicas, resultando em geração adicional de calor (PESARAN, 2023).

Considerando o ambiente hostil e as altas temperaturas tipicamente encontradas em operações de mineração, a segurança das baterias torna-se um requisito crítico de projeto. Assim, devem ser contempladas estratégias como a seleção de químicas com maior segurança intrínseca, a utilização de dispositivos de proteção térmica (por exemplo, fusíveis térmicos) e a implementação de sistemas de arrefecimento e gerenciamento térmico, como materiais absorvedores de calor ou sistemas de refrigeração ativa adequados (e.g., líquida, convecção forçada, etc.).

2.3.1.4 Cadeia de Fornecimento

A cadeia de fornecimento de baterias é complexa e envolve múltiplas etapas, desde a extração da matéria-prima até o processamento, fabricação, distribuição e gerenciamento de fim de vida. Diversos materiais estratégicos são empregados, como lítio (Li), cobalto (Co), níquel (Ni), manganês (Mn), cobre (Cu) e alumínio (Al). A garantia de uma cadeia de fornecimento estável é essencial para a expansão da mobilidade elétrica durante o processo de transição energética.

Existem preocupações associadas à origem e às condições de extração desses materiais. A produção de Li, por exemplo, pode demandar grandes volumes de água. Além disso, há forte concentração geográfica de recursos: a República Democrática do Congo responde por cerca de 60% da produção mundial de Co, enquanto a China domina aproximadamente 70% da produção de cátodos e 90% dos ânodos de grafite (C).

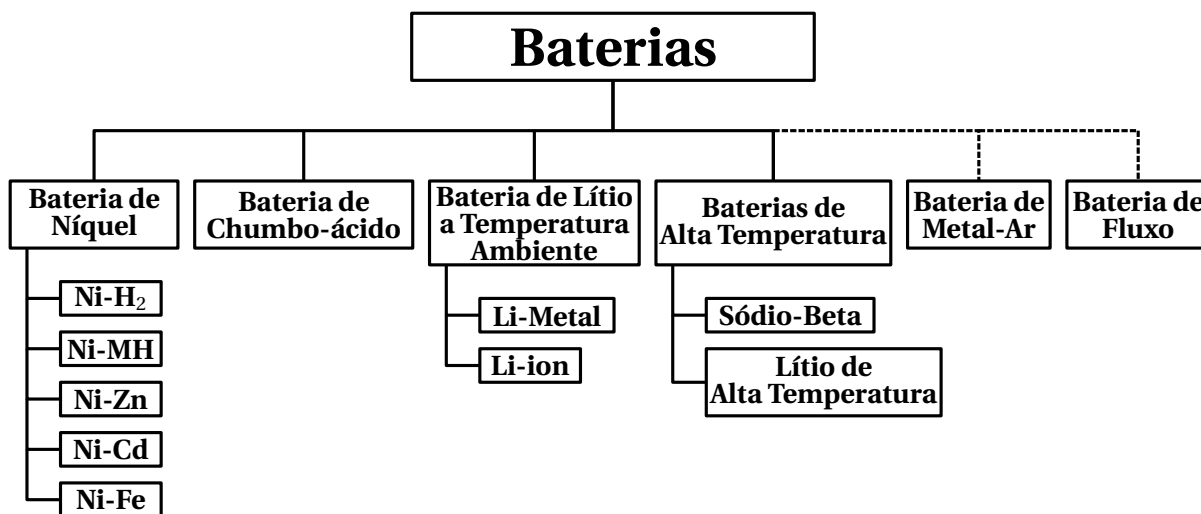
De forma geral, diversas químicas de baterias vêm sendo empregadas em veículos elétricos, e a Figura 2.23 apresenta uma classificação simplificada dessas tecnologias. O uso em veículos elétricos ocorre predominantemente por meio de baterias de chumbo-ácido, baterias à base de níquel e, principalmente, baterias de íons de lítio (Li-ion).

Atualmente, as baterias de Li-ion são as mais utilizadas em veículos elétricos e concentram amplo esforço de pesquisa e desenvolvimento. Entre suas principais características, destacam-se a elevada densidade de energia e de potência, longa vida útil e desempenho adequado sob diferentes condições operacionais.

Além dessas, baterias capazes de operar em altas temperaturas — tipicamente na faixa de 270 °C a 400 °C — apresentam potencial por oferecerem maiores energia e potência específicas (LIU; PLACKE; CHAU, 2022). Entre as químicas mais promissoras nessa categoria, destacam-se sódio-enxofre (NaS) e sódio-níquel-cloro (NaNiCl₂).

Em Houache *et al.* (2022) é apresentada uma análise comparativa de diferentes químicas de baterias de Li-ion. Essas baterias utilizam, tipicamente, eletrólito líquido à base de sais de Li, ânodo de grafite e diferentes óxidos metálicos como material catódico,

Figura 2.23 – Classificação de baterias por química adotada.



Fonte: Adaptado de Liu, Placke e Chau (2022).

sendo que cada composição apresenta distinções em termos de custo, segurança, densidade de energia e densidade de potência. No referido trabalho, são comparadas cinco químicas de Li-ion: NMC ou Li-NMC (óxido de lítio-níquel-manganês-cobalto, $\text{LiNi}_{1-x-y}\text{Mn}_x\text{Co}_y\text{O}_2$), NCA ou Li-NCA (óxido de lítio-níquel-cobalto-alumínio, $\text{LiNi}_{1-x-y}\text{Co}_x\text{Al}_y\text{O}_2$), LCO (óxido de lítio-cobalto, LiCoO_2), LMO (óxido de lítio-manganês, LiMn_2O_4) e LFP (lítio-ferro-fosfato, LiFePO_4).

As células de óxido de lítio e cobalto (LiCoO_2 – LCO) constituem uma tecnologia madura e amplamente empregada em dispositivos eletrônicos (HOUACHE *et al.*, 2022). Entretanto, em condições de sobrecarga (superlithiação), que podem ocorrer devido a falhas na eletrônica de controle (BMS - *Battery Management System*), há risco de instabilidade térmica, uma vez que o eletrólito orgânico apresenta caráter inflamável (CHO, 2004). Por essa razão, essa química não é amplamente utilizada em aplicações de tração veicular.

As células de lítio-ferro-fosfato (LiFePO_4 – LFP) apresentam excelente vida útil, elevada segurança e alta estabilidade térmica e estrutural, além de boa capacidade de carregamento rápido. Essas características, aliadas ao baixo custo relativo e à ampla disponibilidade de matéria-prima, tornam essa química bastante atrativa. Como limitações, apresentam menor densidade de energia quando comparadas a NMC e NCA e menor condutividade eletrônica intrínseca do material catódico, o que pode demandar estratégias adicionais de projeto. De modo geral, são amplamente empregadas em veículos elétricos, especialmente em transporte público e veículos pesados (HOUACHE *et al.*, 2022).

As baterias de óxido de lítio e manganês (LiMn_2O_4 – LMO) apresentam baixo custo de matéria-prima, elevada densidade de potência e densidade de energia moderada. Contudo, possuem vida útil limitada, principalmente em temperaturas elevadas. Em aplicações práticas, é comum a utilização de composições mistas

envolvendo NMC e LMO, com o objetivo de combinar maior densidade de energia com melhor capacidade de entrega de potência. Apesar disso, determinadas composições podem apresentar degradação acelerada, atingindo cerca de 200 ciclos até 80% da capacidade inicial (HOUACHE *et al.*, 2022).

As baterias com cátodo $\text{LiNi}_{1-x-y}\text{Co}_x\text{Al}_y\text{O}_2$ (NCA) utilizam diferentes proporções desses elementos. Composições como $\text{LiNi}_{0,8}\text{Co}_{0,15}\text{Al}_{0,05}\text{O}_2$ apresentam alta densidade de energia (tipicamente superior a 200 Wh kg^{-1}) e longa vida útil, além de boa densidade de potência. Em comparação com as LFP, operam em tensão média mais elevada e oferecem maior capacidade específica, porém a custo mais elevado e com menor estabilidade térmica. Em temperaturas elevadas, as células NCA tendem a apresentar degradação acelerada (HOUACHE *et al.*, 2022).

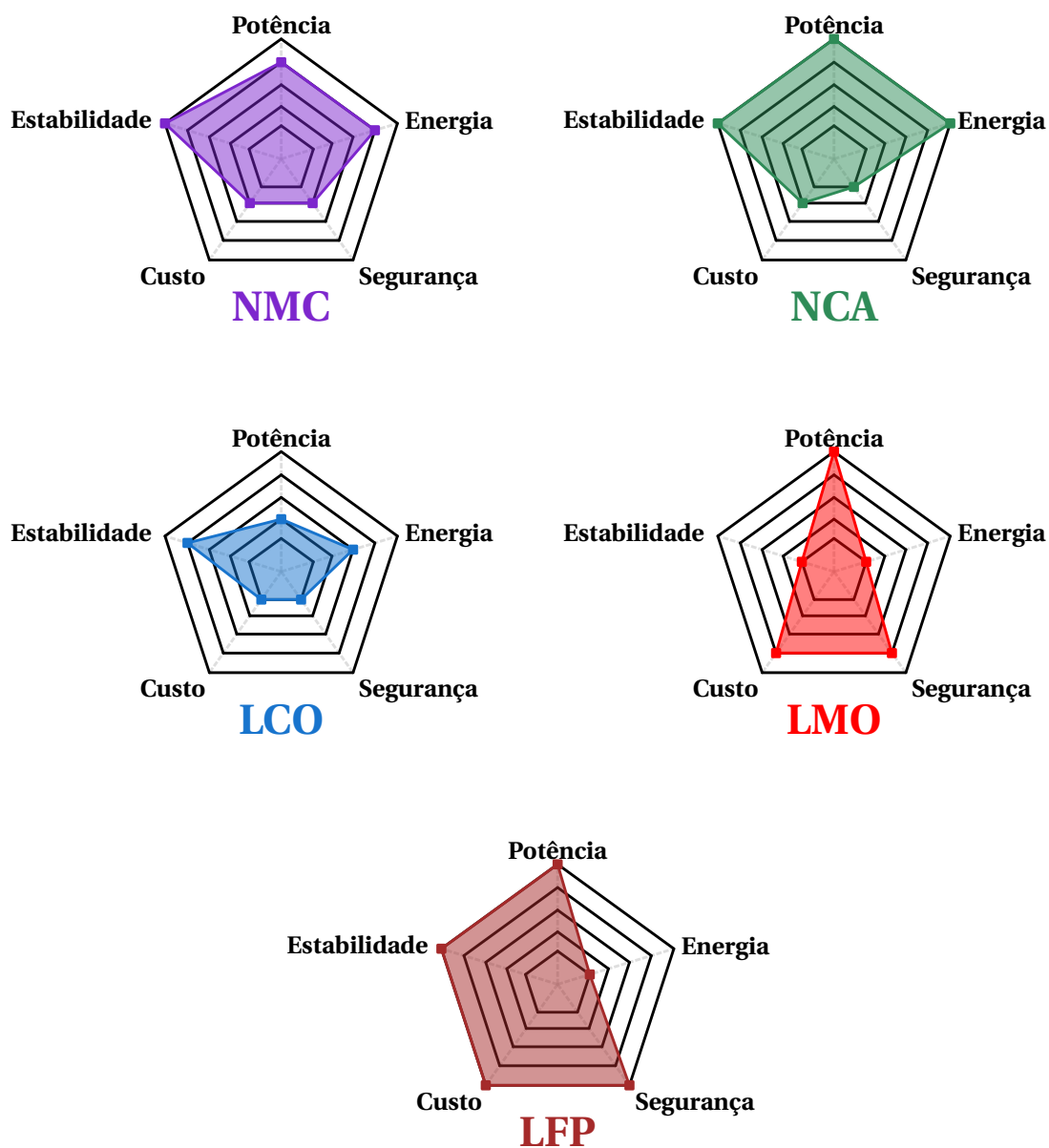
As baterias $\text{LiNi}_{1-x-y}\text{Mn}_x\text{Co}_y\text{O}_2$ (NMC) combinam propriedades associadas ao níquel (maior densidade de energia), ao manganês (estabilidade estrutural) e ao cobalto (melhor condutividade e estabilidade). Apresentam baixa resistência interna, boa densidade de energia e custo relativamente competitivo. O aumento do teor de níquel permite elevar a densidade de energia, porém tende a reduzir a estabilidade térmica e a vida útil de calendário (HOUACHE *et al.*, 2022).

A Figura 2.24 apresenta, de forma gráfica, uma comparação entre as principais químicas de baterias utilizadas em veículos elétricos e citadas anteriormente, considerando seis parâmetros de desempenho: potência, energia, segurança, custo, estabilidade e densidade de potência.

As células NMC e NCA destacam-se pela elevada densidade de energia e de potência, embora apresentem desafios relacionados à segurança térmica quando comparadas às LFP. As células LCO oferecem alta densidade de energia, porém possuem limitações em termos de segurança e densidade de potência. As LMO apresentam elevada densidade de potência e bom desempenho térmico, mas menor vida útil. Por fim, as LFP sobressaem em estabilidade térmica, segurança e vida útil, embora possuam densidade de energia inferior à das químicas baseadas em níquel.

Considerando o cenário da mineração como um ambiente hostil, com altas temperaturas e grande presença de particulado sólido, características como segurança e estabilidade tornam-se altamente desejáveis. Além disso, devido às dimensões e ao peso do caminhão, há elevada inércia tanto nos momentos de aceleração quanto de frenagem, o que também exige uma densidade de potência considerável. Diferentemente dos veículos elétricos de passeio, a limitação volumétrica representa um desafio menor nesse tipo de aplicação, uma vez que se trata de veículos de grande porte, nos quais um banco de baterias volumoso não compromete significativamente o espaço disponível para carga. Assim, a densidade de energia torna-se um fator menos relevante.

Figura 2.24 – Comparação entre as principais químicas de baterias empregadas em aplicações embarcadas.



Fonte: Adaptado de (HOUACHE *et al.*, 2022)

Com base nas características analisadas, optou-se pela utilização de células do tipo LFP, devido à sua elevada segurança intrínseca, boa disponibilidade na cadeia de fornecimento, longo ciclo de vida e adequada densidade de potência para a aplicação proposta.

Para este projeto, foi selecionada a célula modelo C7-LFP40W/N-6C do fabricante Eco Power Group, ilustrada na Figura 2.25. Suas características são indicadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Características da célula C7-LFP40W/N-6C.

Características da Célula			
Capacidade Nominal	40 A h	Dimensões	27,5 x 148 x 146,6 mm
Tensão Nominal	3,2 V	Corrente máxima de Descarga (continua)	6C (240 A)
AC IR	$\leq 0,7$ mA	Pulso máximo de Descarga (30s)	10C (400 A)
DC IR (50% SoC)	$\leq 1,5$ mA	Corrente máxima de carga	6C (240 A)
Peso	(1060 $\pm$ 20) g	Pulso máximo de carga (30s)	10C (400 A)
Densidade de Energia	120 W kg ⁻¹	Ciclo de Vida	≥ 5000 @ 80% (100% DoD)

Fonte: Adaptado de (Eco Power Group, 2025).

2.3.2 Modelos Matemáticos Adotados

2.3.2.1 Estimação de Tensão e SoC

A estimação do estado de carga do banco de baterias é feita através do conhecimento da carga inicial do banco, sendo atualizada por um contador de coulomb (SOUZA, 2014). O Contador de Coulomb é um dispositivo que mensura a carga elétrica que sai ou entra de um componente armazenador - no caso, o banco de baterias ($i_{b,b}$) - através da integração da corrente no tempo. Dessa forma, a variação de carga é encontrada pela Equação 2.3.

$$dE_{b,b} = \int i_{b,b}(t) dt \quad (2.3)$$

Logo, o estado de carga para o banco de baterias dado tempo t é dado através da Equação 2.4, em que $E_{m,b}$ é a capacidade máxima do banco de baterias.

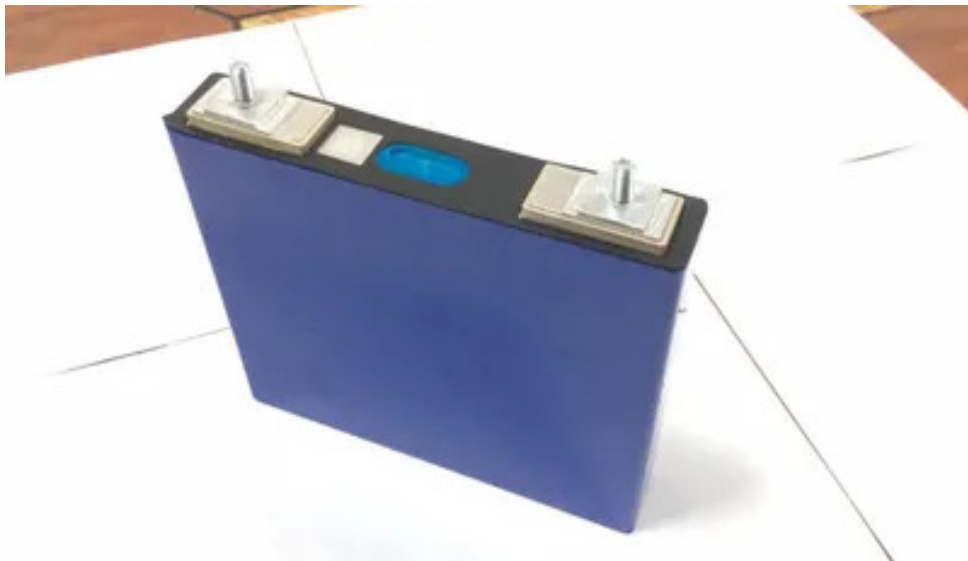


Figura 2.25 – Célula de bateria de lítio-ferro-fosfato (C7-LFP40W/N-6C).

$$SoC_{b,b} = SoC_{b,b}(0) + \frac{1}{E_{m,b}} \int i_{b,b}(t) = SoC_{b,b}(0) + \frac{1}{E_{m,b}} dE_{b,b} \quad (2.4)$$

A estimação da tensão total do banco é dada através da curva característica de tensão por SoC, fornecida pelo fabricante da célula. A Figura 2.26 demonstra o comportamento esperado para uma célula.

Logo, a tensão para a célula de bateria (V_b) é encontrada através de uma *look-up table*(LUT), contendo valores de tensão referentes a diferentes estados de carga, conforme a Equação 2.5.

$$V_b = LUT(SoC_b) \quad (2.5)$$

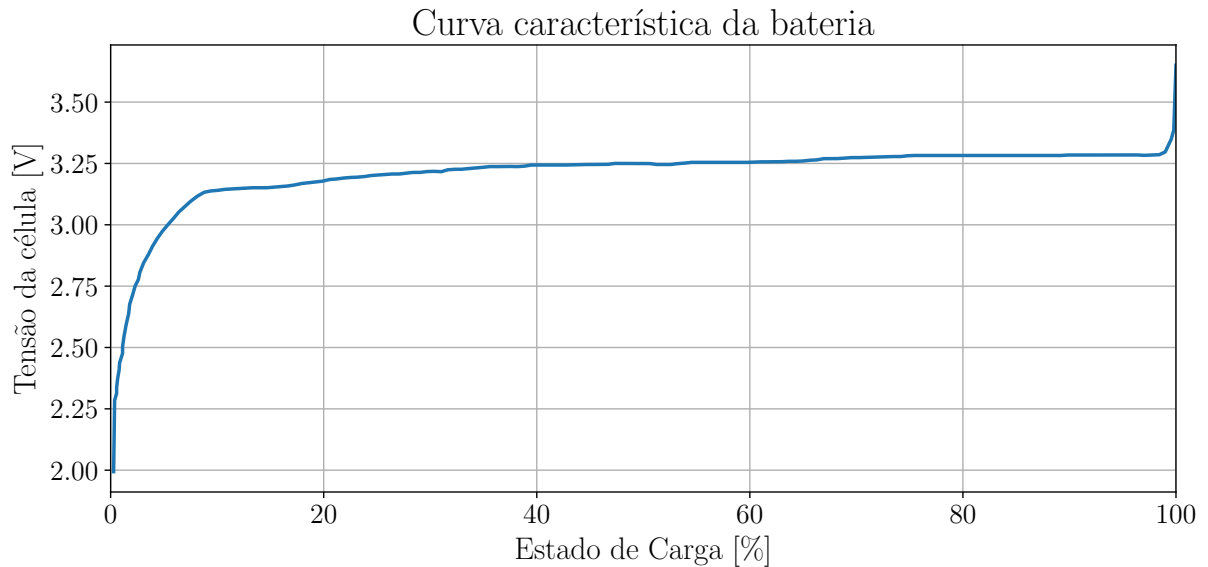
Considerando o banco de baterias com todas as células equilibradas, a tensão total do banco é encontrada de acordo com Equação 2.6.

$$V_{b,b} = N_{s,b} N_{m,b} V_b \quad (2.6)$$

2.3.2.2 Modelo de Degradação

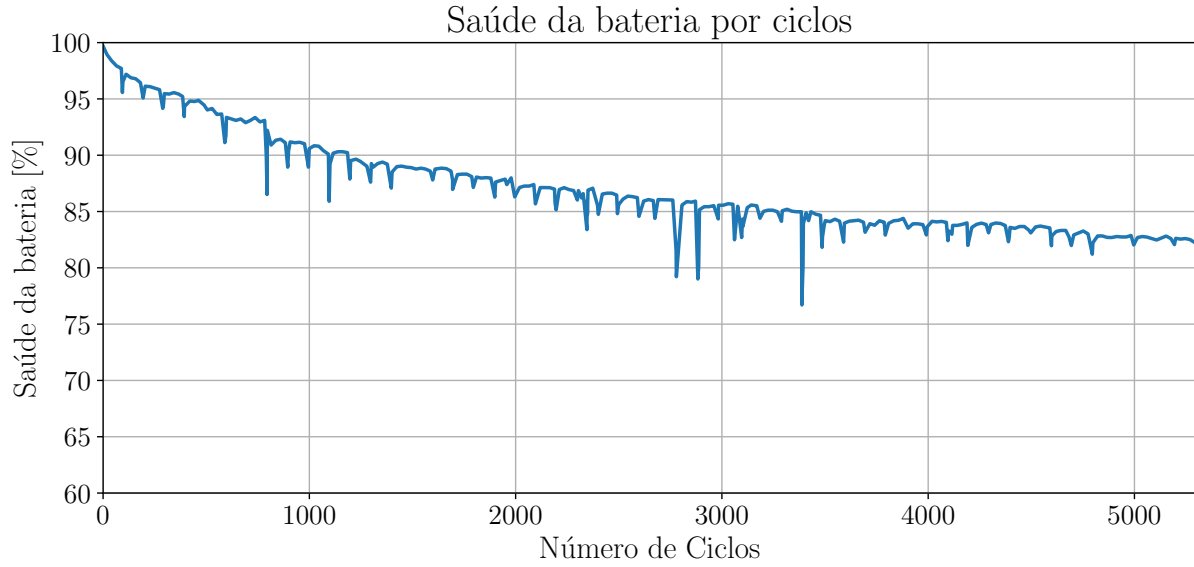
Para simular a degradação da bateria, foi utilizada a curva ciclos versus degradação percentual fornecida pelo fabricante (Eco Power Group, 2025), apresentada na Figura 2.27. A curva expressa a redução da capacidade em função do número de ciclos completos a 1C, considerando a faixa de operação entre 2 V e 3,65 V. Na prática, a operação nessa faixa completa de tensão estressa significativamente a célula e reduz sua vida útil, sendo, portanto, evitada.

Figura 2.26 – Curva de Tensão por Estado de carga da bateria.



Fonte: Adaptado de (Eco Power Group, 2025)

Figura 2.27 – Curva de degradação da bateria com base em ciclos completos.



Fonte: Adaptado de (Eco Power Group, 2025)

A curva demonstrada na Figura 2.27 expressa a degradação da bateria; ou seja, o total que ela consegue armazenar em comparação com o valor inicial, por número de ciclos completos a 1C, indo de 2 V a 3,65 V. De acordo com a Figura 2.26, é possível perceber que a variação de 2 V a 3,65 V representa uma excursão de SoC de 0% à 100%. Essa curva pode ser utilizada para estimar um modelo de degradação simplificado, conforme demonstrado em (AKATSU *et al.*, 2025).

Durante um ciclo de operação do caminhão, é esperado que a célula saia logo em sequência de um ponto mínimo para um ponto máximo, representando a subida da cava, em que o banco de baterias alimenta os motores elétricos, seguido pela descida, em que a energia de frenagem é utilizada para recarregar as células. Não necessariamente essa variação representará 100% da energia máxima da bateria, porém pode ser utilizada para estimar a saúde da bateria por ciclo. Para estimar a degradação associada a ciclos parciais, será utilizado o conceito de Full Equivalent Cycles (FEC), que converte excursões parciais de SoC em ciclos equivalentes completos. (WEI *et al.*, 2022).

Para estimar o número de ciclos da bateria durante um ciclo de operação do caminhão ($N_{c,op,b}$) será utilizada a Equação 2.7, em que a excursão do estado de carga total durante um ciclo de operação do caminhão é dado pela diferença entre os SoCs máximos e mínimos, sendo dividido por 100 para encontrar o *Full Equivalent Cycles*.

$$N_{c,op,b} = \frac{\max(SoC_{b,b}) - \min(SoC_{b,b})}{100} \quad (2.7)$$

A partir do número de ciclos da bateria referente a um ciclo de operação, será encontrado o número de ciclos mensais da bateria. Para isso, será utilizada a Taxa de Disponibilidade Diária (T_d), que diz a porcentagem de tempo que o caminhão opera por

dia, o número de horas por dia (H_d), o número total de dias do mês N_d e o tempo necessário para o caminhão executar um ciclo de operação ($t_{c,op}$). A Equação 2.8 expressa o número de ciclos mensais da bateria ($N_{c,m,b}$).

$$N_{c,m,b} = \frac{T_d H_d N_d}{t_{c,op}} N_{c,op,b} \quad (2.8)$$

A saúde da bateria será estimada por meio de uma *look-up table* (LUT) construída a partir da curva de degradação fornecida pelo fabricante, apresentada na Figura 2.27. Essa estimativa é realizada em função do número acumulado de ciclos executados até o mês considerado (M) após o início da operação. Assim, a saúde da bateria no mês M , representada por S_b , é determinada conforme a Equação 2.9.

$$S_b = \text{LUT}(M \cdot N_{c,m,b}) \quad (2.9)$$

2.4 SISTEMA DE ARMAZENAMENTO EM SUPERCAPACITORES

Supercapacitores, também chamados de ultracapacitores, são dispositivos armazenadores de energia com alta capacidade e baixa resistência interna, capazes de armazenar e fornecer energia em taxas menores do que baterias. O supercapacitor é construído por meio de dois eletrodos, um eletrólito e um separador que isola eletricamente esses eletrodos. A principal diferenciação entre os supercapacitores está no material utilizado no eletrodo (IRO; SUBRAMANI; DASH, 2016). Os supercapacitores apresentam as seguintes vantagens, segundo Şahin, Blaabjerg e Sangwongwanich (2022):

1. Alta densidade de potência;
2. Carregamento e descarregamento rápido;
3. Seguros em casos de curto-circuito;
4. Para o fluxo de potência quando totalmente carregado;
5. ESR extremamente baixo ($\approx 0,01 \Omega$);
6. Longa vida de prateleira e grande tempo de vida;
7. Sem emissão de gases.

Quanto as desvantagens dos supercapacitores, apresentam:

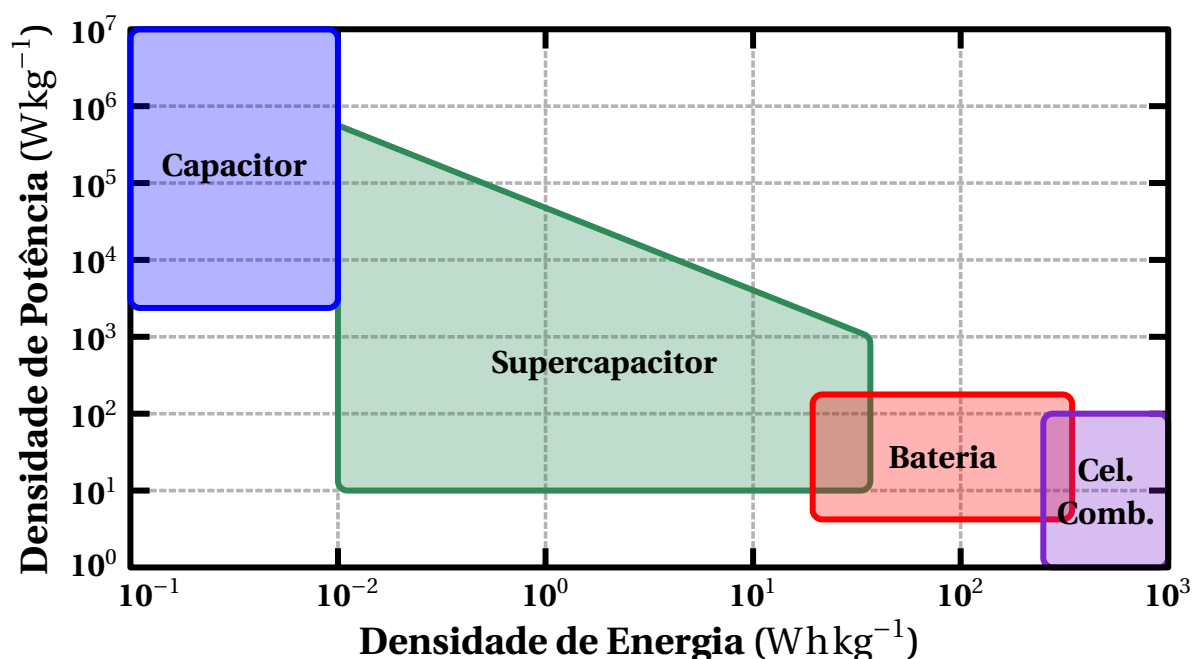
1. Necessita de circuito de balanceamento para ligações em serie;
2. Tensão terminal e SoC diretamente proporcional;

3. Preço e oferta de mercado;
4. Oferecerem potência por curtos períodos de tempo;
5. Absorção dielétrica mais alta.

Em comparação com outros elementos armazenadores de energia — como as baterias —, os supercapacitores possuem longa vida útil, alta potência, grande flexibilidade de encapsulamento, ampla faixa térmica de operação (-40°C a 70°C), baixa manutenção e baixo peso. De forma geral, supercapacitores são aplicados em sistemas que exigem ciclos de carga curtos e alta confiabilidade, como recuperação de energia em empilhadeiras, guindastes e veículos elétricos, além de aplicações de melhoria da qualidade de energia (IRO; SUBRAMANI; DASH, 2016). A Figura 2.28 apresenta um comparativo entre diferentes elementos armazenadores de energia, como capacitores, supercapacitores, baterias e células a combustível.

As células a combustível apresentam densidades de energia em ordens de grandeza superiores a 200 Wh kg^{-1} , porém possuem baixa capacidade de fornecimento instantâneo de potência. Os capacitores apresentam densidade de energia muito baixa, mas conseguem fornecer altíssima densidade de potência. As baterias são amplamente utilizadas para fornecimento de energia, pois apresentam alta densidade de energia — garantindo grande autonomia —, porém com densidade de potência relativamente baixa, exigindo a associação em paralelo de diversas unidades para alcançar valores elevados. Além disso, baterias apresentam limitações, como rápida queda de desempenho devido a

Figura 2.28 – Comparação entre dois tipos de elementos armazenadores de energia elétrica em corrente contínua - supercapacitores e baterias.



Fonte: Adaptado de Şahin, Blaabjerg e Sangwongwanich (2022).

ciclos acelerados de carga e descarga ou operação em temperaturas elevadas (IRO; SUBRAMANI; DASH, 2016), conforme discutido na Subsubseção 2.3.1.2. Os supercapacitores, por sua vez, apresentam um meio-termo interessante entre baterias e capacitores, sendo capazes de armazenar quantidades significativas de energia (média densidade de energia) e fornecer potência de forma rápida.

Na Tabela 2.2 é apresentado um comparativo entre diferentes tipos de baterias e supercapacitores. Observa-se que as baterias possuem maior densidade energética, porém menor densidade de potência quando comparadas aos supercapacitores, que podem atingir valores mais de dez vezes superiores aos das demais tecnologias. O ciclo de vida dos supercapacitores também é significativamente elevado; entretanto, a eficiência de carga e descarga é superior nas baterias de íon-lítio.

Tabela 2.2 – Comparação entre baterias e supercapacitor.

Parâmetro Analisado	Bateria de Chumbo-Ácido	Bateria de Íon-Lítio	Bateria de Fluxo	Supercapacitor
Densidade de Energia (W h kg^{-1})	10-100	150-200	10-50	1-10
Densidade de Potência (W kg^{-1})	<1.000	<2.000	<200	<10.000
Ciclo de Vida	1.000	5.000	10.000	>50.000
Eficiência de carga/descarga	70-85%	99%	70-85%	85-98%
Tempo de carregamento rápido	1-5 h	0,5-3 h	1-10 h	0,3-30 s
Tempo de descarregamento rápido	0,3-3 h	0,3-3 h	1-10 h	0,3-30 s
Tempo de Prateleira (Anos)	5-15	10-20	5-15	20
Custo	Baixo	Alto	Médio	Médio
Temperatura de Operação ($^{\circ}\text{C}$)	-5 à 40	-30 à 60	0 à 40	-40 à 75

Fonte: Adaptado de (ŞAHİN; BLAABJERG; SANGWONGWANICH, 2022).

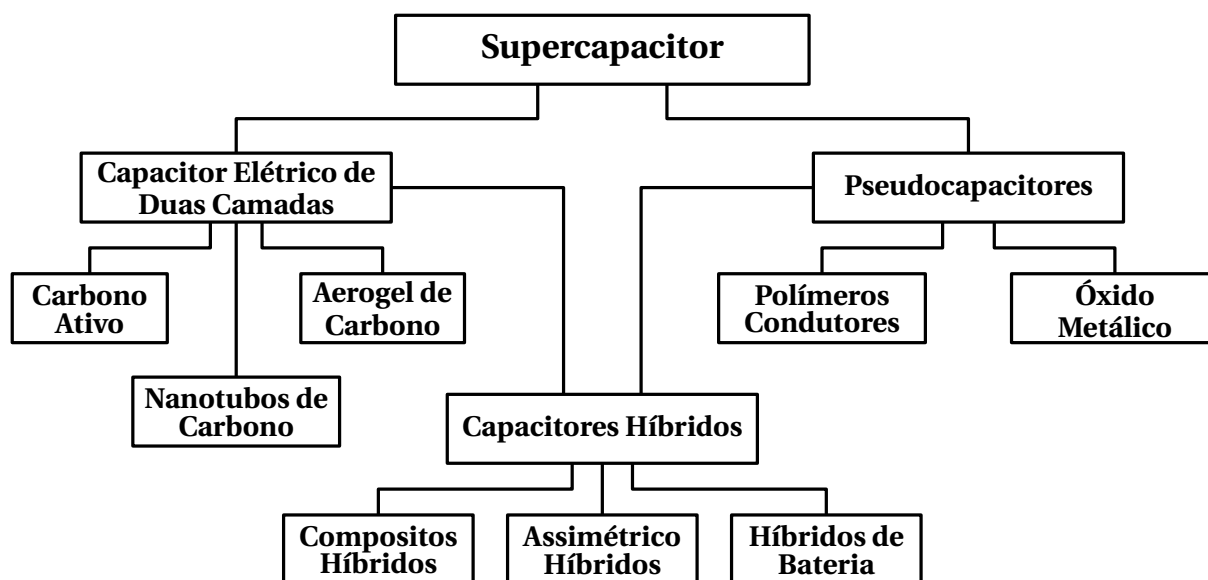
Atualmente, as baterias sozinhas não conseguem fornecer uma solução completa de armazenamento de energia duradoura, segura, com alta densidade de energia e alta densidade de potência (KARTHIKEYAN *et al.*, 2021). Dessa forma, a associação de um sistema de armazenamento em supercapacitores a um sistema de armazenamento em baterias pode se revelar uma alternativa interessante, especialmente em veículos elétricos.

2.4.1 Características Elétricas e Construtivas

A Figura 2.29 apresenta as formas como os supercapacitores podem ser classificados.

De forma geral, supercapacitores podem ser classificados em três diferentes tipos:

Figura 2.29 – Classificação de supercapacitores.



Fonte: Adaptado de (KARTHIKEYAN *et al.*, 2021)

- Pseudocapacitores, ou falso capacitores;
- Capacitor Eletroquímico de Duas Camadas (EDLC);
- Capacitor híbrido.

Essas três categorias representam o tipo de método de armazenamento de energia, sendo caracterizadas como processos faradaicos, não-faradaicos ou combinações de ambos. Processos faradaicos, como reações de oxirredução, envolvem transferência de carga entre o eletrólito e o eletrodo. Já o método não-faradaico, não envolve reações químicas de oxirredução; as cargas na superfície são distribuídas fisicamente, sem participação de processos químicos (KARTHIKEYAN *et al.*, 2021).

2.4.1.1 Pseudocapacitores

Os pseudocapacitores, também chamados de capacitores falsos, armazenam energia por meio da transferência de elétrons, envolvendo a passagem de carga através da dupla camada elétrica. Esse processo ocorre por reações de oxirredução na superfície do eletrodo. Pseudocapacitores normalmente apresentam densidade de energia maior do que os EDLCs. Esses dispositivos utilizam materiais como polímeros condutores e óxidos, nitretos ou sulfetos metálicos (KARTHIKEYAN *et al.*, 2021).

2.4.1.2 Capacitor Eletroquímico de Duas Camadas

Nos capacitores eletroquímicos de dupla camada — do inglês Electric Double Layer Capacitance (EDLCs) — o armazenamento de energia ocorre pela separação de cargas na interface da dupla camada de Helmholtz entre o eletrólito e a superfície condutora do

eletrodo (KARTHIKEYAN *et al.*, 2021), sendo essa distância da ordem de nanômetros. Esses supercapacitores apresentam alta densidade de potência, longa vida útil e baixa densidade de energia. Esse tipo de supercapacitor possui características elétricas parecidas com a de um capacitor normal. Durante a descarga, a tensão ideal de um EDLC diminui linearmente, e a energia armazenada em um EDLC ideal varia de acordo com o quadrado da tensão (KARTHIKEYAN *et al.*, 2021).

Alguns dos maiores fabricantes de supercapacitores estão espalhados pelo mundo, como a Cellergy, dos Estados Unidos, a Maxwell Technologies, também norte-americana, e a Murata Manufacturing, do Japão. Supercapacitores desses fabricantes conseguem atingir capacitâncias entre 1200 F e 5000 F, com resistências equivalentes em série (ESR) extremamente baixas, inferiores a $1\text{ m}\Omega$, e correntes de curto-circuito que variam entre 600 A e 2400 A (ŞAHIN; BLAABJERG; SANGWONGWANICH, 2022). A Tabela 2.3 apresenta algumas opções de supercapacitores disponíveis no mercado e suas características.

Tabela 2.3 – Exemplos de *part numbers* de supercapacitores.

Fabricante	Modelo	Capacitância (F)	Tensão (V)	ESR ($\text{m}\Omega$)	Max. Corrente (A)	Energia (Wh)	Obsoleto
Maxwell Technologies	BCAP3000 P300 K04/05	3.000	3,00	0,13	2.600	3,90	Não
	BCAP3400 P285 K04/05	3.400	2,85	0,28	2.000	4,00	Não
	BCAP1500 P270 K04/05	1.500	2,7	0,47	1.426	1,52	Sim
LS Mtron	BCAP650 P270 K04/05	650	2,7	0,8	640	0,66	Sim
	LSUC 002R7C 3000F NH	3.000	2,7	0,16	2500	3,04	Não
	LSUC 002R7C 2000F NH	2.000	2,7	0,22	1.700	2,02	Não
	LSUC 002R7C 1200F NH	1.200	2,7	0,30	1.100	1,21	Não

Fonte: Adaptado de Şahin, Blaabjerg e Sangwongwanich (2022).

Considerando as opções apresentadas na Tabela 2.3, foi escolhido o supercapacitor modelo BCAP3000 P300 K04/05, pois, por pertencer à família K2 da Maxwell Technologies, apresenta tensão nominal mais elevada, alta capacitância, baixo ESR e perspectiva de continuidade no mercado. A Figura 2.30 ilustra o supercapacitor utilizado.

Figura 2.30 – Modelo de supercapacitor adotado (BCAP3000 P300 K04/05).



Fonte: Maxwell Technologies (2025)

2.4.2 Modelos Matemáticos Adotados

2.4.2.1 Estimação de SoC e Tensão

A estimação do estado de carga do banco de supercapacitores é feita de maneira análoga à do banco de baterias. Inicialmente, sabendo a carga inicial do banco, é utilizado o contador de coulomb (SOUZA, 2014). Dessa forma, a variação de carga ($dE_{b,uc}$) é encontrada pela Equação 2.10.

$$dE_{b,uc} = \int i_{b,uc}(t) dt \quad (2.10)$$

Logo, o estado de carga do banco de supercapacitores ($SoC_{b,uc}$) é dado através da Equação 2.11, em que $E_{m,uc}$ é a energia máxima que o banco de supercapacitores é capaz de armazenar.

$$SoC_{b,uc}(t) = SoC_{b,uc}(0) + \frac{1}{E_{m,uc}} \int i_{b,uc}(t) dt = SoC_{b,b}(0) + \frac{1}{E_{m,uc}} dE_{b,uc} \quad (2.11)$$

Diferentemente de uma bateria, a relação entre o estado de carga (nesse caso, iremos considerar a energia armazenada) e a tensão para um supercapacitor é dada por uma relação quadrática. A equação que dita a energia em um supercapacitor é dada em Equação 2.12.

$$E_{uc} = \frac{C V_{uc}^2}{2} \quad (2.12)$$

Dessa forma, a tensão no banco de supercapacitores pode ser dada através da Equação 2.13.

$$V_{b,uc} = \sqrt{\frac{2 E_{b,uc}}{C_{eq}}} \quad (2.13)$$

Em que C_{eq} é a capacitância total do banco de supercapacitores, que pode ser encontrada na Equação 2.14.

$$C_{eq} = \frac{N_p}{N_s N_m} C_{uc} \quad (2.14)$$

2.4.2.2 Modelo de Degradação

Em teoria, os supercapacitores deveriam apresentar vida útil praticamente infinita devido às suas características construtivas, isto é, à inércia eletroquímica de seus principais componentes — o eletrodo e o eletrólito. Na prática, porém, observa-se uma modificação significativa de seus parâmetros ao longo dos ciclos de operação, manifestando-se pela

redução da capacitância total, pelo aumento da resistência série equivalente (ESR) e pelo aumento da corrente de fuga (KUPAROWITZ *et al.*, 2017).

Em Kuperowitz *et al.* (2017) foram propostos três testes de ciclagem de supercapacitores, variando-se a carga em 75% de forma contínua, 100% de forma contínua e 75% de forma descontínua. Nesses cenários, observou-se um aumento linear da resistência série equivalente (ESR) do supercapacitor e uma diminuição exponencial da capacitância total. Como a capacitância está diretamente relacionada à energia armazenada pelo supercapacitor, é possível afirmar que a energia também decai de forma exponencial.

Dessa forma, será utilizada como base a Equação 2.15 para definir a saúde do supercapacitor, em que **b** representa a constante de degradação e **n** representa o número de ciclos.

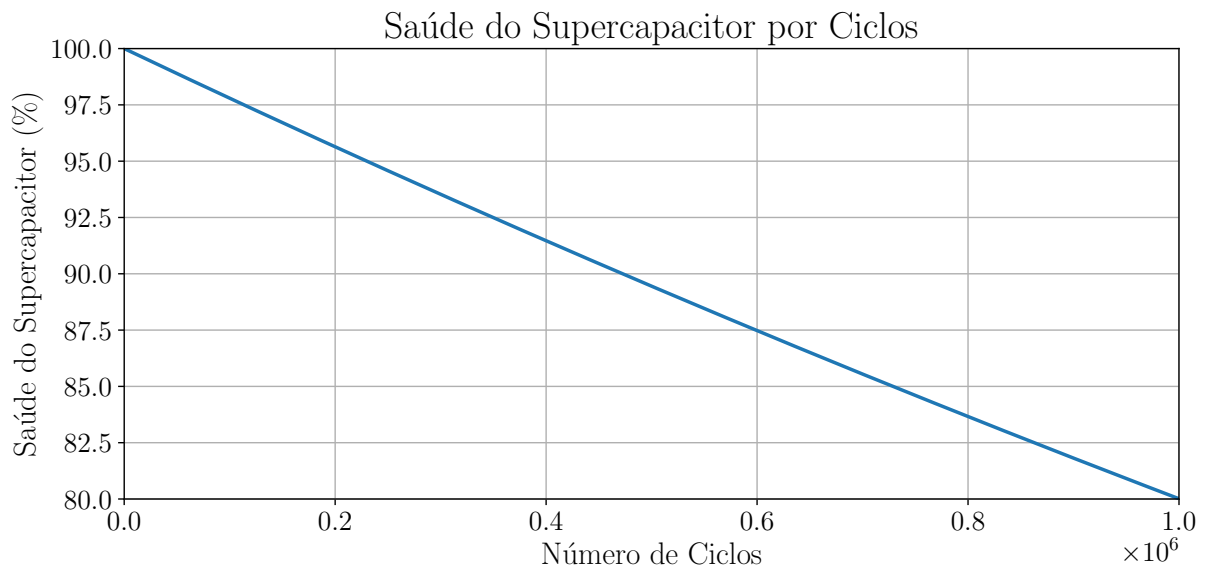
$$S_{uc}(x) = 100 e^{bx} \quad (2.15)$$

Segundo (Maxwell Technologies, 2025), o modelo BCAP3000 P300 K04/05 possui um ciclo de vida de aproximadamente 1.000.000 de ciclos até atingir 80% da capacidade inicial e o dobro do ESR inicial. Dessa forma, é possível determinar o valor da constante de degradação utilizando a Equação 2.16.

$$80 = 100 e^{b \cdot 10^6} \quad \Rightarrow \quad b = -2,23 \cdot 10^{-7} \quad (2.16)$$

Assim, podemos caracterizar a degradação do supercapacitor em função do número de ciclos por meio da Figura 2.31.

Figura 2.31 – Curva de degradação do supercapacitor com base em ciclos completos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para estimar o número de ciclos do supercapacitor durante um ciclo de operação do caminhão ($N_{c,op,b}$) será utilizada a Equação 2.17, em que a excursão do estado de carga total durante um ciclo de operação do caminhão é dado pela diferença entre os SoCs máximos e mínimos, sendo dividido por 100 para encontrar o *Full Equivalent Cycles*.

$$N_{c,op,uc} = \frac{\max(SoC_{b,uc}) - \min(SoC_{b,uc})}{100} \quad (2.17)$$

A partir do número de ciclos do supercapacitor referente a um ciclo de operação, será encontrado o número de ciclos mensais do supercapacitor. Para isso, será utilizada a Taxa de Disponibilidade Diária (T_d), que diz a porcentagem de tempo que o caminhão opera por dia, o número de horas por dia (H_d), o número total de dias do mês N_d e o tempo necessário para o caminhão executar um ciclo de operação ($t_{c,op}$). A Equação 2.18 expressa o número de ciclos mensais do supercapacitor ($N_{c,m,uc}$).

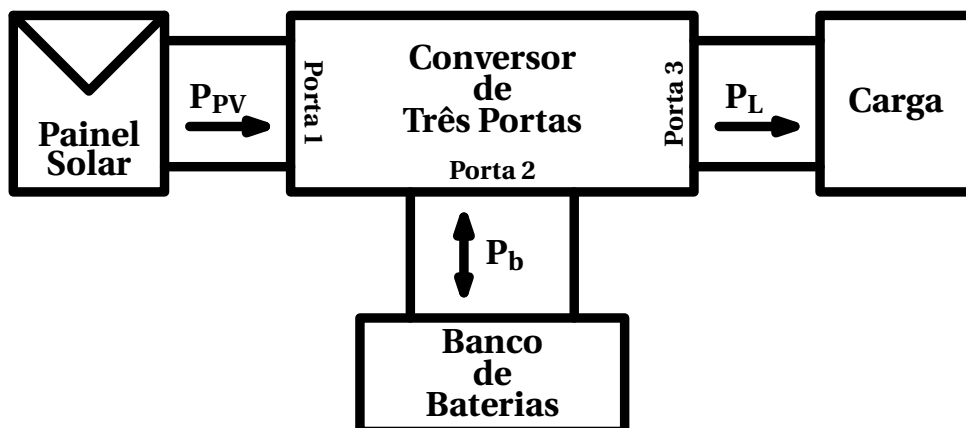
$$N_{c,m,uc} = \frac{T_d H_d N_d}{t_{c,op}} N_{c,op,uc} \quad (2.18)$$

2.5 SISTEMA HÍBRIDO DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

2.5.1 Conversor de Três Portas

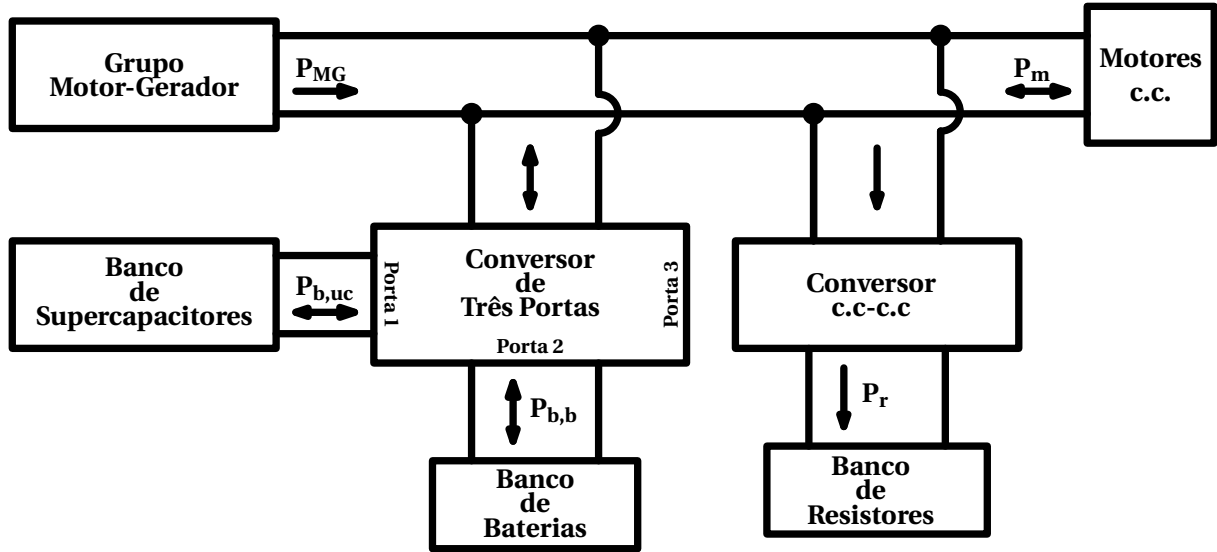
O conversor de três portas é utilizado para o gerenciamento do fluxo de potência entre três fontes ou destinos distintos, permitindo a troca bidirecional de energia. Um exemplo típico de aplicação é a integração de painéis fotovoltaicos e bancos de baterias para o fornecimento de energia a uma carga (WANG *et al.*, 2020). Nesse caso, o conversor garante que a carga seja alimentada pela energia gerada pelos painéis solares ou, quando necessário, pela energia armazenada nas baterias. A Figura 2.32 ilustra essa configuração, onde o painel solar está conectado à Porta 1, o banco de baterias à Porta 2 e a carga à Porta 3. O conversor de três portas gerencia dinamicamente os fluxos de potência —

Figura 2.32 – Exemplificação de um conversor de três portas.



Fonte: Adaptado de (WANG *et al.*, 2020).

Figura 2.33 – Diagrama de ligação e fluxo de potência.



Fonte: Elaborado pelo autor.

P_{PV} (do painel solar), P_b (do banco de baterias) e P_L (para a carga) — assegurando o fornecimento contínuo

Para o projeto do caminhão, será utilizado um conversor de três portas com o objetivo de integrar os sistemas de armazenamento de energia (bateria e supercapacitor) ao barramento c.c. do veículo, conforme ilustrado na Figura 2.33. O conversor será responsável por gerenciar o fluxo de potência possível para cada componente, sendo o grupo motor-gerador o fornecedor da potência P_{MG} , enquanto o supercapacitor e a bateria compõem os bancos de potência $P_{b,uc}$ e $P_{b,b}$, respectivamente. Já o banco de resistores é responsável por dissipar a potência P_R (também chamada de potência rejeitada), e os motores c.c. consomem a potência P_m .

De forma geral, é possível observar que a soma de todas as potências deve ser igual a zero:

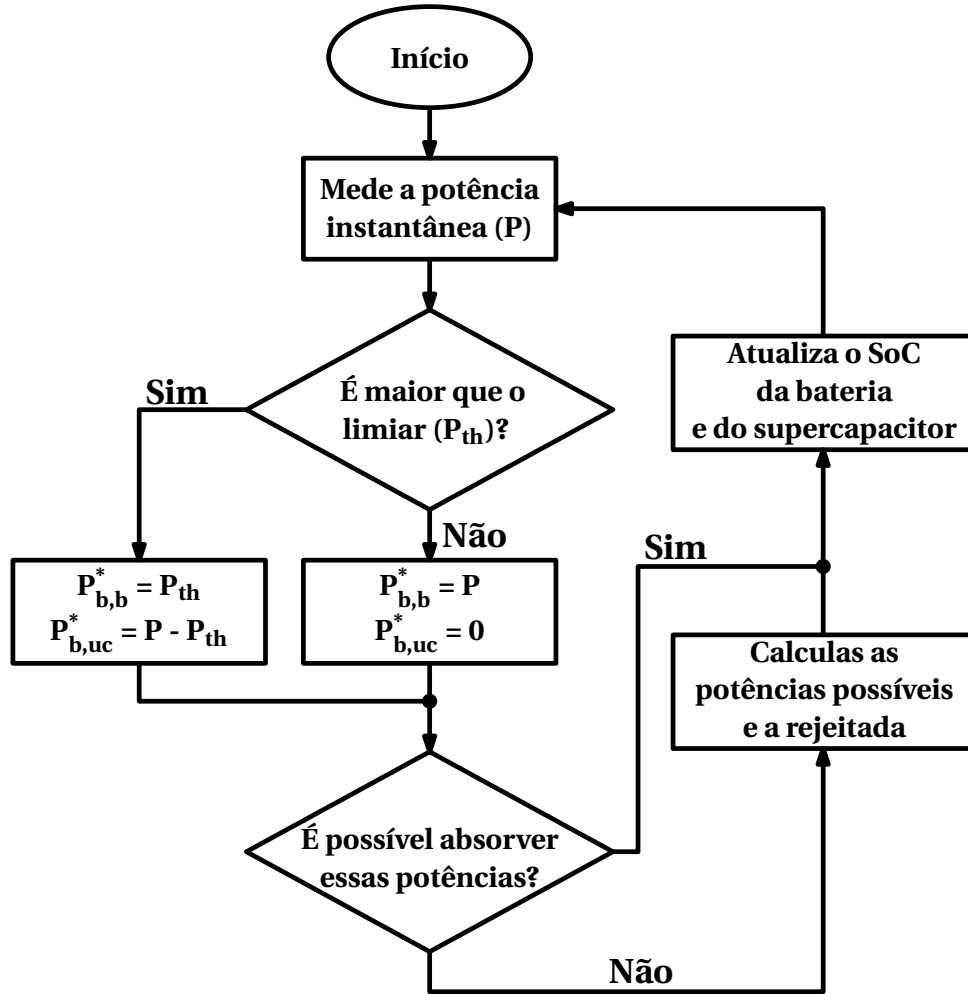
$$P_{MG} + P_{b,uc} + P_{b,b} + P_r + P_m = 0 \quad (2.19)$$

2.5.2 Controle hierárquico

O controle hierárquico é a parte responsável por definir os *setpoints* de potência para cada banco. O controle hierárquico pode ser esquematizado pelo fluxograma mostrado na Figura 2.34.

O processo inicia-se com o conhecimento dos níveis de carga (*State of Charge - SoC*) dos bancos de baterias (BESS) e de supercapacitores (SC). A princípio, é fornecida a potência instantânea P solicitada ou fornecida pelo sistema. Caso essa potência ultrapasse o limiar estabelecido, o sistema limita a potência destinada ao banco

Figura 2.34 – Fluxograma esquematizando o controle hierárquico proposto.



Fonte: Elaborado pelo autor.

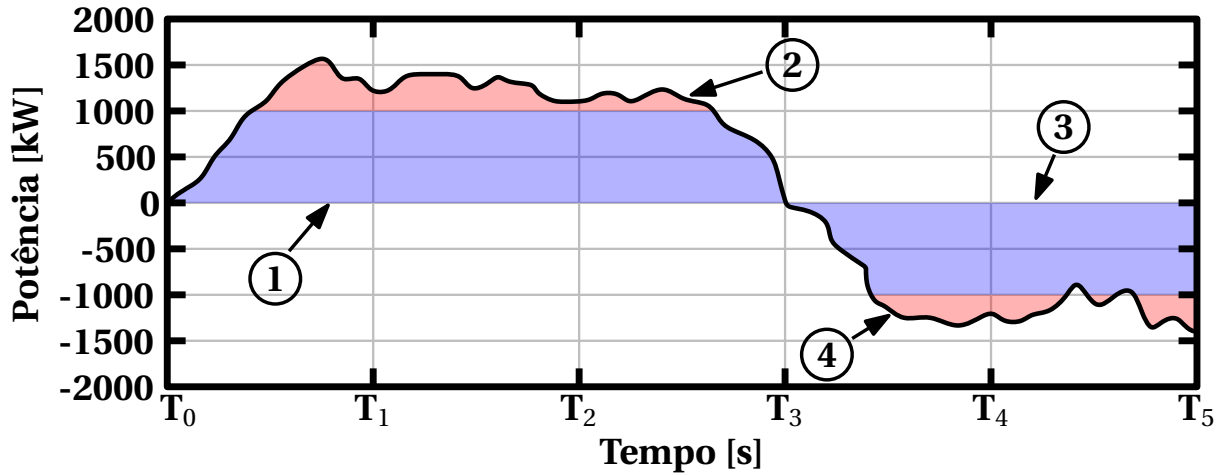
de baterias ($P_{b,b}$) e direciona o excedente para o banco de supercapacitores ($P_{b,uc}$), que possui maior capacidade de resposta para transientes e picos de demanda. Caso contrário, toda a potência é fornecida às baterias. A equação Equação 2.20 explicita esse comportamento.

$$P_{b,b}^* = \begin{cases} P_{th}, & \text{se } P > P_{th} \\ P, & \text{se } P \leq P_{th} \end{cases}, \quad P_{b,uc}^* = \begin{cases} P - P_{th}, & \text{se } P > P_{th} \\ 0, & \text{se } P \leq P_{th} \end{cases} \quad (2.20)$$

Na sequência, verifica-se a capacidade dos bancos de baterias e supercapacitores de absorver ou fornecer a potência calculada, levando em conta a corrente máxima permitida (conforme os *datasheets* dos componentes) e seus estados de carga. Se os bancos não puderem atender completamente à demanda energética, a potência de referencia é recalculada com base nas limitações e a potência excedente é dissipada na grade resistiva.

Por fim, os estados de carga da bateria e do banco de supercapacitores são

Figura 2.35 – Figura de potência hipotética para análise do controle hierárquico.



Fonte: Elaborado pelo autor.

atualizados, refletindo o novo equilíbrio energético do sistema e garantindo a operação segura e eficiente do HESS.

De forma a exemplificar o comportamento, foi gerado um perfil de potência hipotético, demonstrado na Figura 2.35. Para esse perfil, foi definido como potência limiar o valor $P_{th} = 1000 \text{ kW}$.

Na Figura 2.35 são destacados diferentes momentos e características. Até T_3 a potência do caminhão é positiva, ou seja, está em tração. Neste momento, **1** destaca a potência fornecida pelo banco de baterias e **2** a potência fornecida pelo banco de supercapacitores. Após T_3 a potência fica negativa, demonstrando um momento de frenagem do caminhão, em que a energia flui no sentido de recarregar os elementos de armazenamento. Nesse momento, **3** apresenta a energia que efetivamente vai para o banco de baterias e **4** apresenta a energia que vai para o banco de supercapacitores.

Além disso, existe o cenário em que os bancos não conseguem suprir ou absorver a energia necessária. Nesse caso, o conjunto motor-gerador entra para suprir a diferença ou a energia é absorvida pelo banco de resistências, dissipando-a em energia térmica.

2.6 ALGORITMOS PARA A SOLUÇÃO DE PROBLEMAS DE OTIMIZAÇÃO

O projeto de sistemas híbridos de armazenamento de energia (HESS) aplicados a caminhões de mineração envolve múltiplas variáveis de decisão, como capacidade energética dos bancos, limites de tensão, níveis de potência, taxas de carregamento, estratégias de compartilhamento de potência e critérios econômicos. Além disso, tais variáveis estão sujeitas a restrições elétricas, operacionais e financeiras. Diante dessa complexidade e do elevado número de combinações possíveis, torna-se adequado modelar o problema de dimensionamento como um problema de otimização, permitindo a construção de uma metodologia sistemática baseada em métricas quantitativas para a

determinação da melhor solução de projeto em cada cenário analisado.

De forma geral, um problema de otimização pode ser formulado como:

$$\min_{\mathbf{x} \in \Omega} f(\mathbf{x}) \quad (2.21)$$

sujeito a

$$g_i(\mathbf{x}) \leq 0, \quad i = 1, \dots, m \quad (2.22)$$

$$h_j(\mathbf{x}) = 0, \quad j = 1, \dots, p \quad (2.23)$$

em que $\mathbf{x}$ representa o vetor de variáveis de decisão pertencente ao espaço viável Ω , $f(\mathbf{z})$ é a função objetivo e $g_i(\mathbf{z})$ e $h_j(\mathbf{z})$ representam, respectivamente, restrições de desigualdade e igualdade.

Quando o problema envolve apenas uma métrica de desempenho a ser minimizada ou maximizada, por exemplo, o custo total do sistema ou o valor presente líquido, trata-se de um problema mono-objetivo. Nesse caso, busca-se uma única solução ótima global (ou local), que represente o melhor compromisso segundo a métrica adotada.

Por outro lado, quando múltiplos critérios conflitantes são considerados simultaneamente, como custo, emissões de CO₂, vida útil dos componentes ou desempenho energético, o problema passa a ser formulado como multiobjetivo:

$$\min_{\mathbf{x} \in \Omega} \mathbf{F}(\mathbf{x}) = [f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \dots, f_k(\mathbf{x})] \quad (2.24)$$

Nessa situação, não existe, em geral, uma única solução ótima, mas sim um conjunto de soluções não dominadas que compõem a chamada fronteira de Pareto. Uma solução é dita não dominada quando não pode ser melhorada em um objetivo sem que haja piora em pelo menos outro critério (DEB, 2001).

Diversas classes de algoritmos podem ser empregadas para a resolução de problemas de otimização, incluindo métodos determinísticos baseados em gradiente, técnicas de programação linear (BAZARAA; JARVIS; SHERALI, 2011) e não linear (BAZARAA; SHERALI; SHETTY, 2006), e métodos heurísticos e meta-heurísticos (LEE; EL-SHARKAWI, 2008). Em problemas de elevada não linearidade, presença de múltiplos mínimos locais ou variáveis discretas, características típicas do dimensionamento de sistemas energéticos, métodos evolutivos mostram-se particularmente adequados (LEE; EL-SHARKAWI, 2008).

Entre esses métodos, destacam-se os Algoritmos Genéticos (AGs), que são técnicas inspiradas em mecanismos de seleção natural e evolução biológica (HOLLAND, 1984). Esses algoritmos operam sobre uma população de soluções candidatas, aplicando

operadores de seleção, cruzamento e mutação para explorar o espaço de busca de forma estocástica e robusta.

Para problemas multiobjetivo, uma das abordagens mais consolidadas é o algoritmo NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II), proposto por Deb et al. (DEB *et al.*, 2002). O NSGA-II combina ordenação por não dominância com um mecanismo de preservação de diversidade baseado em crowding distance, permitindo a obtenção eficiente de uma aproximação bem distribuída da fronteira de Pareto. Entre suas principais vantagens destacam-se a ausência de necessidade de ponderação prévia dos objetivos e sua boa escalabilidade computacional.

No presente trabalho, embora a formulação atual considere predominantemente um critério econômico, a escolha de um algoritmo evolutivo como o NSGA-II justifica-se pela flexibilidade de expansão futura da metodologia para cenários multiobjetivo. Em versões posteriores, poderão ser incorporadas métricas adicionais, como créditos de carbono, indicadores ambientais ou critérios de robustez operacional, sem necessidade de reformulação estrutural do método de otimização. Dessa forma, a abordagem adotada mantém coerência com o escopo atual e, ao mesmo tempo, preserva capacidade de generalização para análises multifacetadas.

3 Modelagem e Projeto do Sistema Híbrido de Armazenamento de Energia

Este capítulo apresenta a modelagem e o projeto do Sistema Híbrido de Armazenamento de Energia (HESS) integrado à arquitetura diesel-elétrica do caminhão fora de estrada apresentada nos capítulos anteriores. A proposta contempla a definição da estratégia de controle e os critérios de dimensionamento dos elementos armazenadores, considerando as particularidades operacionais do veículo e seu perfil de missão.

A Figura 3.1 ilustra a modificação topológica da arquitetura original do caminhão com a inclusão do HESS, bem como o diagrama de blocos da estratégia proposta de controle hierárquico. O barramento c.c. original é mantido como elo comum de potência entre o retificador principal e os motores de tração. Conectado a esse barramento, há um conversor c.c.–c.c. bidirecional de três portas hipotético, que é utilizado para integrar os sistemas de armazenamento de energia (BESS e SC).

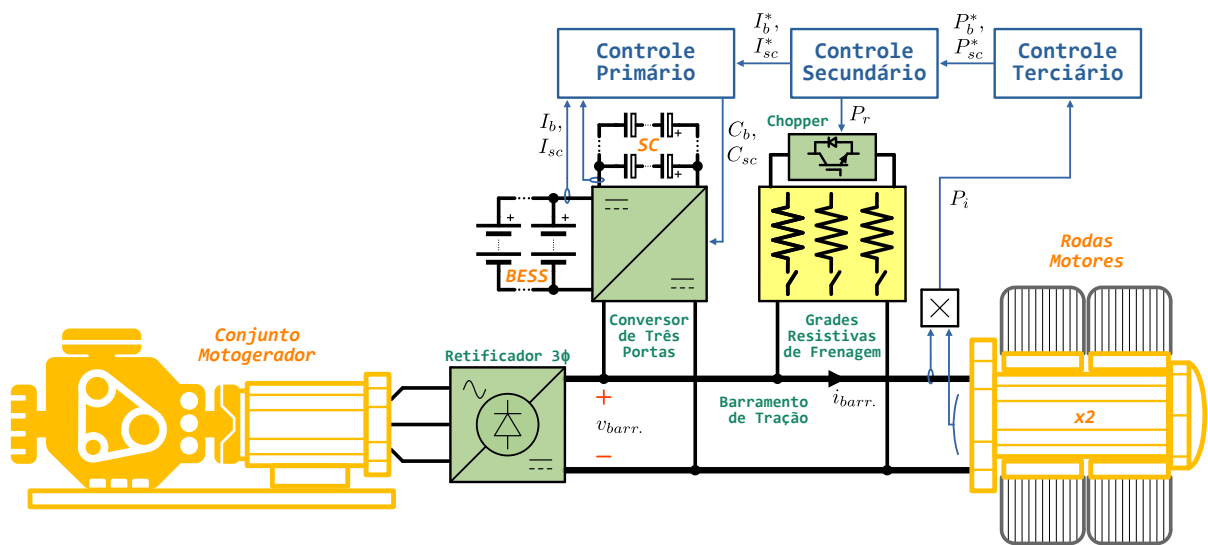


Figura 3.1 – Arquitetura de tração proposta com a inclusão de um Sistema Híbrido de Armazenamento de Energia (HESS) baseado em baterias e supercapacitores.

O controle do HESS é estruturado segundo uma arquitetura hierárquica composta por três níveis. No nível terciário, realiza-se o controle de despacho de potência entre os módulos de bateria e de supercapacitor, a partir do perfil de potência observado no barramento de tração, estabelecendo-se a participação de cada tecnologia de armazenamento em função das componentes média e transitória da demanda.

No nível secundário, o despacho de potência é convertido em correntes de referência para cada dispositivo, incorporando as restrições operacionais associadas ao estado de carga e aos limites de corrente de carga e descarga. Dessa forma, assegura-se que a operação respeite critérios de segurança, desempenho e vida útil dos elementos

armazenadores.

O nível primário é responsável pelo rastreamento das correntes de referência por meio do conversor bidirecional de três portas, garantindo o efetivo intercâmbio de potência ativa entre o barramento c.c., o banco de baterias e o banco de supercapacitores. O projeto detalhado desse nível hierárquico e do conversor de três portas, contudo, não integra o escopo deste trabalho, que se concentra nos níveis terciário e secundário, bem como na metodologia de dimensionamento do sistema híbrido em si.

Em uma das portas do conversor, está conectado o banco de baterias. Em outra, está conectado o banco de supercapacitores. A terceira porta realiza a interface dos armazenamentos com o barramento de tração do veículo. Essa configuração permite o gerenciamento coordenado do fluxo de potência entre as diferentes fontes e o sistema de tração, viabilizando tanto a absorção quanto o fornecimento de energia conforme as condições operacionais.

O banco resistivo original (grades de retardo) é mantido na arquitetura, permanecendo responsável pela dissipação da potência excedente – quando a capacidade instantânea de armazenamento é atingida ou quando os limites operacionais dos dispositivos armazenadores são alcançados. Para possibilitar sua integração adequada ao barramento e permitir controle mais preciso da potência dissipada, utiliza-se um conversor do tipo chopper dedicado ao acionamento das grades resistivas.

Por fim, destaca-se que o grupo motogerador (motor diesel + alternador) permanece como fonte primária de energia do sistema, sendo acionado sempre que a demanda energética não puder ser integralmente suprida pelo sistema de armazenamento ou quando as condições operacionais assim o exigirem.

Os aspectos e etapas de obtenção do modelo, assim como as equações que descrevem as relações entre os fluxos de potência e energia no sistema, são apresentados nas seções subsequentes, juntamente com a formulação da estratégia de controle e da metodologia de dimensionamento do HESS.

3.1 ANÁLISE DOS PERFIS OPERACIONAIS DO CAMINHÃO

Diferentemente de abordagens baseadas em ciclos de condução padronizados ou perfis sintéticos de carga, o presente trabalho fundamenta o processo de projeto e dimensionamento do sistema híbrido a partir de perfis reais de operação de minas em atividade.

Os perfis empregados representam condições reais de tráfego, topografia, carga transportada e regime operacional dos caminhões fora-de-estrada, refletindo com maior fidelidade as solicitações de potência impostas ao sistema de tração. Assim, o dimensionamento do banco de baterias, do banco de supercapacitores e a definição das

estratégias de controle não se baseiam em hipóteses genéricas, mas em dados capazes de capturar a variabilidade e as particularidades energéticas de diferentes minas.

A partir desses perfis, obtêm-se as grandezas elétricas no barramento c.c., especialmente tensão e corrente, das quais se determina a potência instantânea demandada ao longo do ciclo operacional. Essas informações constituem a base para a modelagem dinâmica do sistema híbrido e para a formulação do problema de otimização, assegurando que o dimensionamento do HESS esteja diretamente vinculado às condições reais de operação e às restrições energéticas observadas em campo.

Nesse contexto, a simulação dinâmica do sistema híbrido é construída a partir do perfil de potência real extraído de um caminhão em operação. O sistema original do caminhão (STATEX) dispõe de funcionalidade de registro (*datalog*) de variáveis elétricas e mecânicas, cujos dados podem ser exportados para um computador por meio de interface UART/USB. São registradas grandezas como tensão e corrente no barramento c.c., correntes de excitação do gerador e dos motores de tração, rotação do motor diesel e ângulos de disparo dos retificadores controlados das excitatrizes, entre outros sinais de interesse. O período de amostragem adotado para os registros é de 1 s. A Figura 3.2 apresenta as curvas de tensão e corrente no barramento c.c. que alimenta os motores de tração durante a operação do caminhão em uma das minas analisadas.

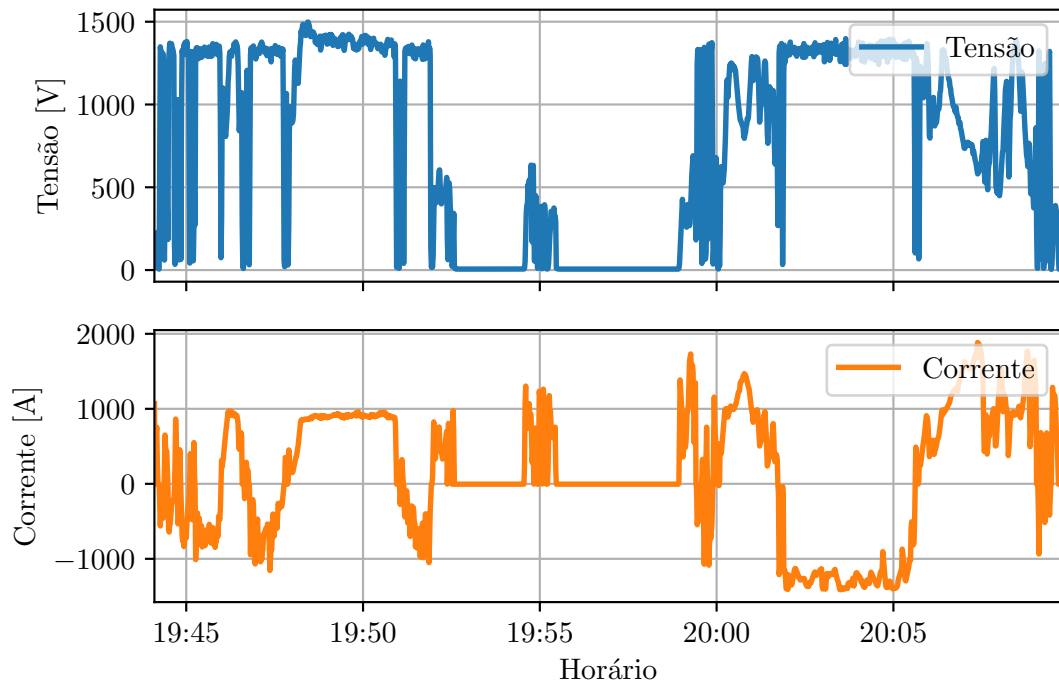
Observa-se que, em regime típico de operação, a tensão do barramento c.c. permanece próxima de 1300 V, com picos que podem atingir até 1500 V. A corrente apresenta comportamento bidirecional: valores positivos correspondem ao modo de tração, no qual a potência flui do conjunto gerador-retificador para os motores; valores negativos caracterizam a frenagem elétrica, situação em que a energia cinética convertida de volta pelos motores é direcionada ao banco resistivo e dissipada na forma de calor. Esse comportamento dissipativo evidencia o potencial de recuperação energética que motiva a inserção do sistema híbrido proposto.

A determinação da potência instantânea demandada pelo caminhão é realizada por meio da Equação 3.1, em que $v_{barr.}(t)$ representa a tensão instantânea no barramento de tração e $i_{barr.}(t)$ a corrente correspondente.

$$P_i(t) = v_{barr.}(t) i_{barr.}(t) \quad (3.1)$$

A partir dos dados de tensão e corrente do barramento c.c., obtém-se o perfil de potência apresentado na Figura 3.3. Nessa figura, as linhas tracejadas em vermelho indicam o limiar de potência adotado na estratégia de gerenciamento energético. Esse limiar constitui uma variável de projeto fundamental, pois define o nível máximo de potência a ser absorvido ou fornecido pelo banco de baterias, direcionando as componentes de maior magnitude e maior variação temporal para o banco de supercapacitores.

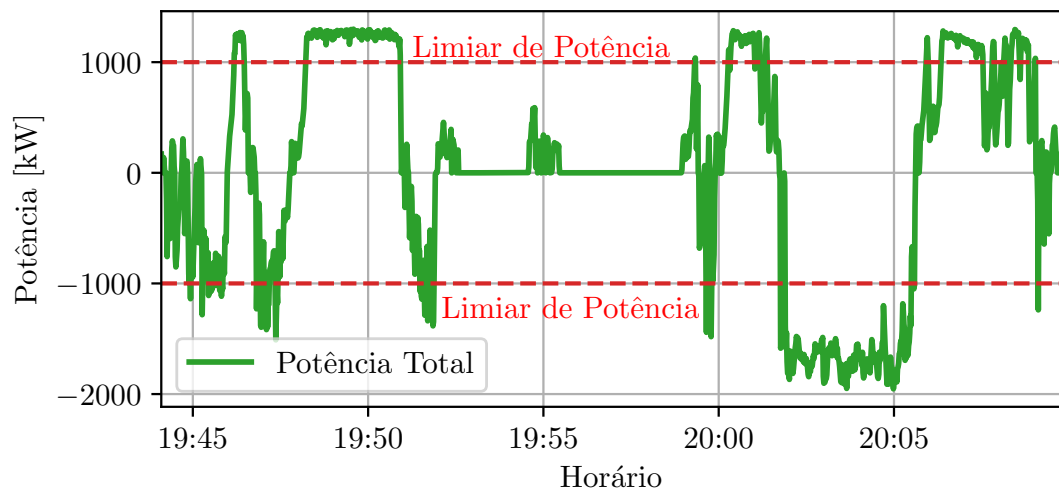
Figura 3.2 – Curvas de tensão e corrente no barramento c.c. de alimentação dos motores de tração durante uma operação típica.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em termos operacionais, adota-se a estratégia de que, sempre que a potência demandada ou regenerada ultrapassar um limiar pré-estabelecido (P_{th}), a parcela excedente é direcionada aos supercapacitores. Devido à sua elevada densidade de potência e maior capacidade de suportar variações abruptas de corrente, esses dispositivos são mais adequados para o atendimento de picos transitórios. Com isso, reduz-se a solicitação dinâmica imposta ao banco de baterias, mitigando esforços

Figura 3.3 – Perfil de potência de tração obtido a partir das medições de tensão e corrente no barramento c.c.



Fonte: Elaborado pelo autor.

eletroquímicos associados a altas correntes e contribuindo para a preservação de sua vida útil.

A escolha do valor deste limiar P_{th} impacta diretamente o dimensionamento dos dispositivos de armazenamento e, conseqüentemente, o volume, a massa e o custo do HESS. A adoção de limiares mais baixos transfere uma parcela maior da potência transitória para o banco de supercapacitores. Embora essa estratégia reduza significativamente os picos de corrente impostos às baterias, pode resultar em um aumento expressivo da capacidade requerida do banco de supercapacitores. Considerando que esses dispositivos apresentam elevada densidade de potência, porém baixa densidade de energia, a necessidade de armazenar maiores quantidades de energia implica em um acréscimo substancial no número de módulos, elevando o volume físico, a massa e o custo total do sistema híbrido.

Por outro lado, a definição de limiares mais elevados transfere uma maior responsabilidade de absorção de potência ativa para o banco de baterias, reduzindo a necessidade de supercapacitores e, portanto, melhorando o impacto volumétrico do HESS. No entanto, essa escolha pode impor picos de potência e correntes de elevada magnitude às baterias, intensificando esforços eletroquímicos, elevando perdas internas e acelerando mecanismos de degradação – todos processos altamente indesejáveis. Como consequência, pode ocorrer uma redução na vida útil do BESS e aumento dos custos associados à sua reposição ao longo do ciclo de vida do caminhão.

Assim, a escolha do limiar de potência P_{th} deve considerar o compromisso de projeto (*trade-off*) entre o volume e a massa totais do sistema híbrido, o desempenho dinâmico e a durabilidade dos dispositivos de armazenamento, devendo ser definida de forma criteriosa por meio de um processo de otimização com restrições.

3.2 ESTRATÉGIAS DE CONTROLE HIERÁRQUICO

Uma vez compreendidos os fatores que motivam e moldam os perfis operacionais adotados como base da metodologia, e estabelecido o conceito de orquestração do HESS por meio de um limiar de potência P_{th} , apresenta-se nesta seção a formulação do controle hierárquico. Essa formulação define, a cada instante de amostragem, as correntes que devem ser sintetizadas nos arranjos de baterias e de supercapacitores, de modo a atender à demanda do barramento respeitando as restrições operacionais do sistema.

3.2.1 Controle Terciário

O controle terciário estabelece a estratégia global de partilha de potência do HESS, definindo como a potência instantânea do barramento é distribuída entre os elementos armazenadores. A abordagem adotada baseia-se em dois mecanismos complementares.

A proposta adotada neste trabalho baseia-se em um mecanismo duplo. O primeiro corresponde ao gerenciamento primário por limiar, no qual a contribuição da bateria é limitada, em módulo, ao valor P_{th} , sendo o excedente direcionado ao supercapacitor. O segundo mecanismo consiste em um balanceamento por histerese da tensão do supercapacitor em torno da faixa $V_{ref} \pm BH$. Esse balanceamento é implementado por meio de uma transferência interna de pequena magnitude, parametrizada por uma corrente I_{XC} , com o objetivo de preservar uma margem energética para absorção de eventos regenerativos subsequentes.

As principais variáveis empregadas no algoritmo de controle terciário são:

- $P \in \mathbb{R}$: potência instantânea no barramento (W), sendo $P > 0$ associado à tração e $P < 0$ à frenagem (regenerativa ou dissipativa);
- $P_{th} \in \mathbb{R}_+$: limiar de potência (W) que define a parcela máxima, em módulo, atribuída à bateria;
- $V_{b,b}$ e $V_{b,sc}$: valores nominais das tensões nos bancos de baterias e de supercapacitores, respectivamente (V);
- V_{sc} : tensão no banco de supercapacitores (V);
- V_{ref} : referência de tensão do supercapacitor (V);
- $BH \in \mathbb{R}_+$: meia largura da banda de histerese (V), centrada em V_{ref} ;
- $I_{XC} \in \mathbb{R}_+$: corrente de transferência interna entre supercapacitor e bateria (A), utilizada exclusivamente para o balanceamento energético entre elementos armazenadores;
- $P_b^*, P_{sc}^* \in \mathbb{R}$: referências de potência para bateria e supercapacitor (W), em que valores positivos indicam entrega de potência ao barramento (tração).

3.2.1.1 Gerenciamento primário por limiar de potência

O gerenciamento primário define a partilha da potência instantânea no barramento $P(t)$ entre bateria e supercapacitor por meio de um limiar escalar $P_{th} > 0$, aplicado ao valor absoluto da potência, de modo a garantir simetria entre os modos de tração e regeneração. Assim, as referências são definidas por

$$\begin{aligned} P_b^* &= \text{sat}(P(t), -P_{th}, P_{th}), \\ P_{sc}^* &= P(t) - P_b^*, \end{aligned} \tag{3.2}$$

em que $\text{sat}(x, a, b)$ representa a saturação de x no intervalo $[a, b]$. Assim, a contribuição da bateria permanece limitada em módulo a P_{th} , tanto em tração quanto em regeneração, sendo o excedente, positivo ou negativo, absorvido ou fornecido pelo supercapacitor.

3.2.1.2 Balanceamento por histerese do supercapacitor

O balanceamento por histerese é ativado apenas quando $|P(t)| \leq P_{\text{th}}$, condição na qual, em princípio, a bateria assumiria integralmente a potência do barramento. Nesse regime, introduz-se um ajuste interno de pequena magnitude, redistribuindo potência entre os ramos sem alterar o valor total de $P(t)$.

Define-se:

$$P_{\text{diff}} \triangleq V_{b,b} I_{\text{XC}}, \quad (3.3)$$

na qual $I_{\text{XC}} > 0$ é escolhido de forma a respeitar os limites de corrente admissíveis pela bateria e pelo conversor durante o balanceamento.

As referências finais de potência são, então, expressas por:

$$(P_b^*, P_{sc}^*) = \begin{cases} (P_{\text{th}} \text{sgn}(P(t)), P(t) - P_{\text{th}} \text{sgn}(P(t))), & \text{se } |P(t)| > P_{\text{th}}, \\ (P(t) + P_{\text{diff}}, P(t) - P_{\text{diff}}), & \text{se } |P(t)| \leq P_{\text{th}} \text{ e } V_{sc} > V_{\text{ref}} + \text{BH}, \\ (P(t) - P_{\text{diff}}, P(t) + P_{\text{diff}}), & \text{se } |P(t)| \leq P_{\text{th}} \text{ e } V_{sc} < V_{\text{ref}} - \text{BH}, \\ (P(t), 0), & \text{se } |P(t)| \leq P_{\text{th}} \text{ e } V_{\text{ref}} - \text{BH} \leq V_{sc} \leq V_{\text{ref}} + \text{BH}, \end{cases} \quad (3.4)$$

em que $\text{sgn}(x)$ representa a função sinal de x .

A seleção de I_{XC} deve ser realizada de modo a não impor sobrecarga térmica à bateria durante operação prolongada. Na prática, adota-se um valor coerente com a taxa C contínua admissível pela química empregada, assegurando conformidade com os limites térmicos do arranjo e com as restrições de variação de corrente impostas pelo conversor.

3.2.2 Controle Secundário

Este nível do sistema de controle realiza a conversão das referências de potência em correntes, respeitando simultaneamente restrições elétricas (limite de corrente) e energéticas (janela admissível de estado de carga), conforme ilustrado na Figura 3.4.

Adota-se a notação unificada $x \in \{b, sc\}$ para representar bateria ou supercapacitor, uma vez que a lógica de funcionamento é idêntica para ambos os elementos de armazenamento. As grandezas associadas são: P_x^* , potência de referência proveniente do nível terciário; V_x , tensão medida no ramo; E_x , energia instantaneamente armazenada; $E_{m,x}$, energia máxima do banco; $I_{x,max}$, limite admissível de módulo de corrente; e Δt , passo da simulação computacional. Correntes positivas indicam entrega de potência ao barramento de tração, enquanto correntes negativas indicam absorção.

O primeiro estágio converte as referências de potência em correntes de pré-saturação utilizando as tensões instantâneas medidas em cada ramo:

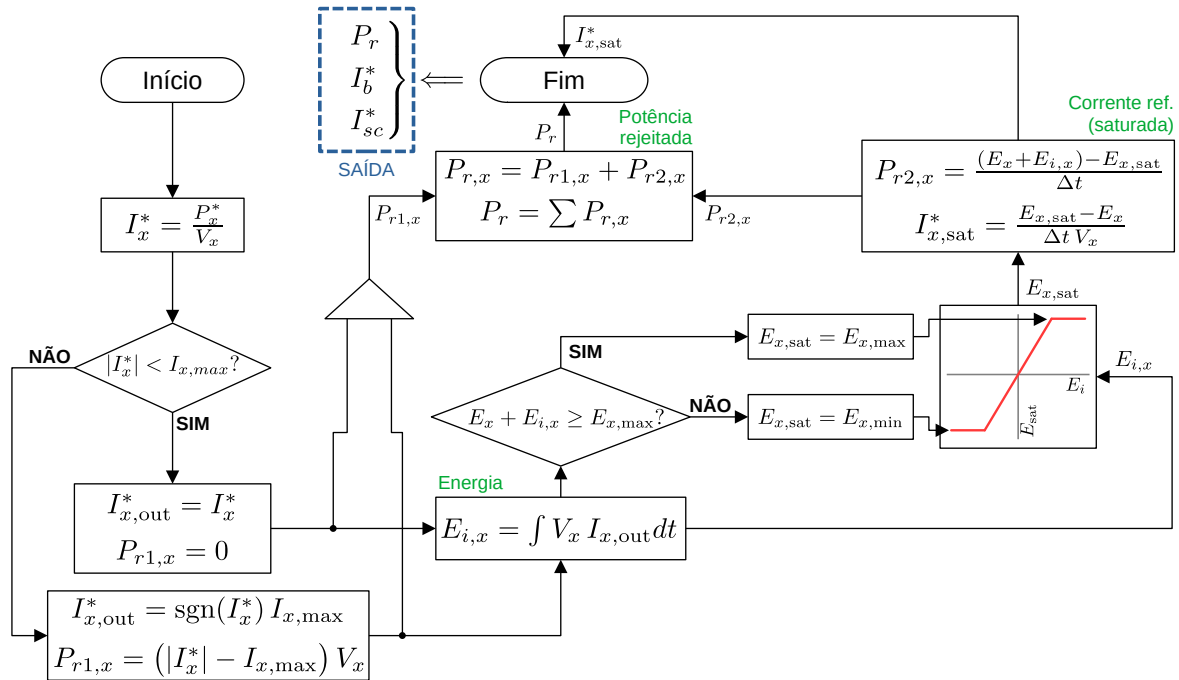
$$I_x^*[k] = \frac{P_x^*[k]}{V_x[k]}. \quad (3.5)$$

Em seguida, aplica-se a limitação por corrente admissível. Quando $|I_x^*| < I_{x,max}$, a referência permanece inalterada. Caso contrário, ocorre saturação em módulo:

$$I_{x,out} = \begin{cases} I_x^*, & \text{se } |I_x^*| < I_{x,max} \\ \text{sgn}(I_x^*) I_{x,max}, & \text{se } |I_x^*| \geq I_{x,max}. \end{cases} \quad (3.6)$$

A potência associada ao excedente de corrente não processável é então dada por:

Figura 3.4 – Fluxograma do funcionamento do controle secundário.



Fonte: Elaborado pelo autor.

$$P_{r1,x} = \begin{cases} 0, & \text{se } |I_x^*| < I_{x,\max} \\ (|I_x^*| - I_{x,\max}) V_x, & \text{se } |I_x^*| \geq I_{x,\max}. \end{cases} \quad (3.7)$$

O termo $P_{r1,x} \geq 0$ representa a parcela de potência que não pode ser conduzida pelo ramo devido à limitação de corrente. Em tração, essa potência é suprida pelo grupo motor-gerador; em regeneração, é direcionada às grades resistivas e dissipada.

Na sequência, verifica-se a viabilidade energética frente à janela admissível de estado de carga. A energia solicitada no passo é aproximada por integração explícita:

$$E_{i,x} \approx V_x I_{x,\text{out}} \Delta t. \quad (3.8)$$

Os limites energéticos são definidos por:

$$E_{x,\min} = SoC_{\min} E_{m,x}, \quad E_{x,\max} = SoC_{\max} E_{m,x}. \quad (3.9)$$

A energia factível ao final do passo é, então, dada por:

$$E_{x,\text{sat}} = \begin{cases} E_{x,\max}, & \text{se } E_x + E_{i,x} \geq E_{x,\max} \\ E_x + E_{i,x}, & \text{se } E_{x,\min} \leq E_x + E_{i,x} < E_{x,\max} \\ E_{x,\min}, & \text{se } E_x + E_{i,x} < E_{x,\min}. \end{cases} \quad (3.10)$$

A diferença entre a energia pretendida e a energia factível define a segunda parcela de potência rejeitada:

$$P_{r2,x} = \frac{(E_x + E_{i,x}) - E_{x,\text{sat}}}{\Delta t}, \quad (3.11)$$

com $P_{r2,x} \geq 0$. Em tração, essa potência é novamente suprida pelo grupo motor-gerador; em regeneração, é dissipada nas grades resistivas.

A referência de corrente efetivamente rastreada pelo nível primário de controle deve ser compatível com a energia factível ao final do passo. Define-se, portanto:

$$I_{x,\text{sat}}^* = \frac{E_{x,\text{sat}} - E_x}{\Delta t V_x}. \quad (3.12)$$

A potência rejeitada total em cada ramo resulta da soma das duas parcelas:

$$P_{r,x} = P_{r1,x} + P_{r2,x}, \quad (3.13)$$

e a potência rejeitada global do sistema é dada por:

$$P_r = P_{r,b} + P_{r,sc}. \quad (3.14)$$

Uma vez estabelecida a lógica de conversão de potência em corrente e os mecanismos de saturação associados às restrições elétricas e energéticas, torna-se possível formular de maneira consistente a dinâmica das variáveis de estado do sistema de armazenamento. A próxima seção apresenta a modelagem detalhada desses estados e as equações que regem sua evolução temporal, fornecendo a base matemática necessária para a análise de desempenho e para a etapa subsequente de dimensionamento do HESS.

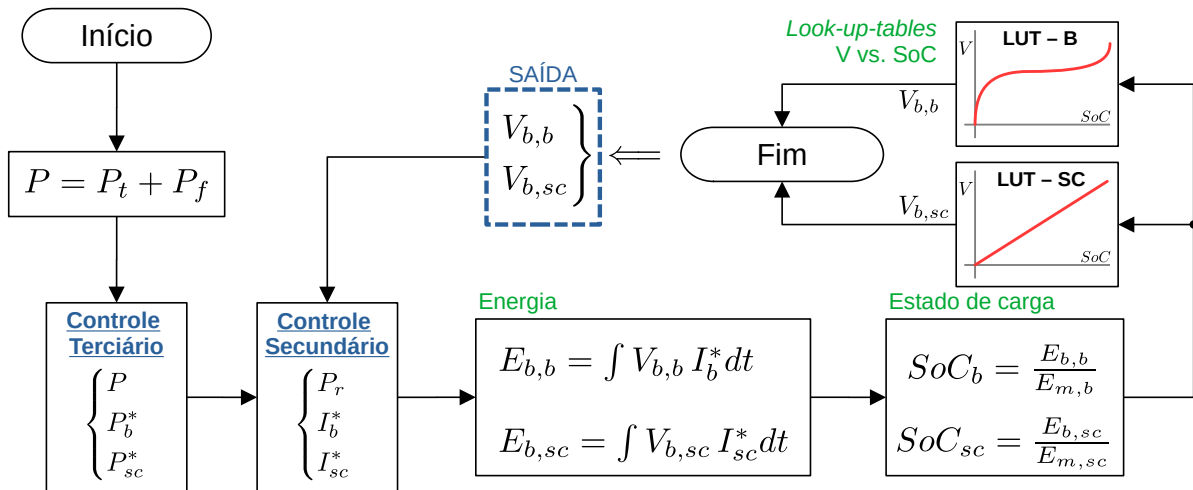
3.3 SIMULAÇÃO DINÂMICA DO SISTEMA COM HESS

3.3.1 Modelo de Simulação Computacional

A Figura 3.5 apresenta a organização dos blocos empregados na simulação dinâmica, evidenciando o encadeamento entre a medição das grandezas no barramento, a atuação do controle hierárquico e a atualização dos estados energéticos dos elementos armazenadores. O modelo foi estruturado para reproduzir, em tempo discreto, a interação entre despacho de potência, aplicação de restrições físicas e evolução da energia interna de cada ramo do HESS.

Ressalta-se que o objetivo da simulação computacional em questão não é a representação detalhada dos transitórios eletromagnéticos do conversor ou do sistema como um todo, mas a análise do comportamento das variáveis que impactam os níveis secundário e terciário do controle hierárquico proposto. Dessa forma, o modelo fornece subsídios consistentes para a avaliação de desempenho energético e para o processo de dimensionamento do HESS.

Figura 3.5 – Diagrama de blocos esquematizando a simulação computacional do sistema.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em cada passo discreto k são conhecidas a potência instantânea no barramento $P[k]$ e as variáveis de estado do HESS. Para fins de análise, a potência pode ser decomposta em componentes associadas à tração e à frenagem regenerativa, sem alterar o processamento do controle, segundo

$$P_t[k] = \max(P[k], 0), \quad P_f[k] = \min(P[k], 0), \quad (3.15)$$

de modo que $P[k] = P_t[k] + P_f[k]$. A convenção adotada é tal que $P_t[k] \geq 0$ representa potência entregue aos motores de tração, enquanto $P_f[k] \leq 0$ representa potência regenerativa.

Conforme descrito na Seção 3.2, o controlador terciário recebe a potência no barramento $P[k]$ e, com base na lógica de particionamento por limiar e no mecanismo de histerese associado à tensão do supercapacitor, fornece as referências $P_b^*[k]$ e $P_{sc}^*[k]$.

O nível secundário, a partir dessas referências e das tensões medidas $V_{b,b}[k]$ e $V_{b,sc}[k]$, calcula as correntes de pré-saturação, aplica as restrições por limite de corrente e por janela energética e retorna as correntes efetivamente aplicáveis $I_{b,sat}^*[k]$ e $I_{sc,sat}^*[k]$, bem como a potência rejeitada total $P_r[k]$.

Conhecidas as correntes saturadas, as energias armazenadas são atualizadas por integração explícita com passo Δt . Para o banco de baterias:

$$E_{b,b}[k+1] = E_{b,b}[k] + V_{b,b}[k] I_{b,sat}^*[k] \Delta t, \quad (3.16)$$

e para o banco de supercapacitores:

$$E_{b,sc}[k+1] = E_{b,sc}[k] + V_{b,sc}[k] I_{sc,sat}^*[k] \Delta t. \quad (3.17)$$

Nessas expressões, $E_{b,b}$ e $E_{b,sc}$ representam as energias armazenadas nos bancos de bateria e de supercapacitores, respectivamente.

Com as energias atualizadas, recalculam-se os estados de carga. Para a bateria utiliza-se a normalização pela energia máxima do banco:

$$SoC_b[k+1] = \frac{E_{b,b}[k+1]}{E_{m,b}}, \quad (3.18)$$

em que $E_{m,b}$ é a energia máxima do banco de baterias. Para o supercapacitor adota-se a definição baseada na energia máxima armazenável:

$$SoC_{sc}[k+1] = \frac{E_{b,sc}[k+1]}{E_{m,sc}}, \quad (3.19)$$

sendo $E_{m,sc}$ a energia máxima do banco de supercapacitores.

As tensões dos bancos são, então, atualizadas. Para a bateria, emprega-se uma tabela característica de tensão vs. estado de carga (SoC), previamente calibrada:

$$V_{b,b}[k+1] = \text{LUT}\left(\text{SoC}_b[k+1]\right), \quad (3.20)$$

em que $\text{LUT}(\cdot)$ representa uma tabela de consulta obtida a partir de dados experimentais ou especificações do fabricante.

Para o supercapacitor aplica-se diretamente a relação energia–tensão:

$$V_{b,sc}[k+1] = \sqrt{\frac{2 E_{b,sc}[k+1]}{C_{eq}}}, \quad (3.21)$$

onde C_{eq} é a capacitância equivalente do banco.

Considerando N_s células em série por módulo, N_m módulos em série e N_p ramos em paralelo, com capacitância unitária C_{sc} por célula, tem-se:

$$C_{eq} = \frac{N_p}{N_s N_m} C_{sc}. \quad (3.22)$$

A energia máxima do banco de supercapacitores é dada por:

$$E_{m,sc} = \frac{C_{eq} V_{m,sc}^2}{2}, \quad (3.23)$$

em que a tensão máxima admissível do conjunto resulta da composição do número total de elementos em série:

$$V_{m,sc} = N_s N_m v_{sc}, \quad (3.24)$$

sendo v_{sc} a tensão máxima admissível de cada célula individual.

Esse encadeamento estabelece, a cada passo discreto da simulação computacional, a sequência lógica entre a potência solicitada, correntes aplicadas e atualização dos estados internos dos elementos armazenadores. O modelo preserva, assim, a consistência entre as grandezas elétricas e energéticas ao longo da simulação, refletindo de maneira direta os efeitos das decisões de controle sobre a evolução dinâmica do sistema.

3.3.2 Validação do Modelo de Simulação

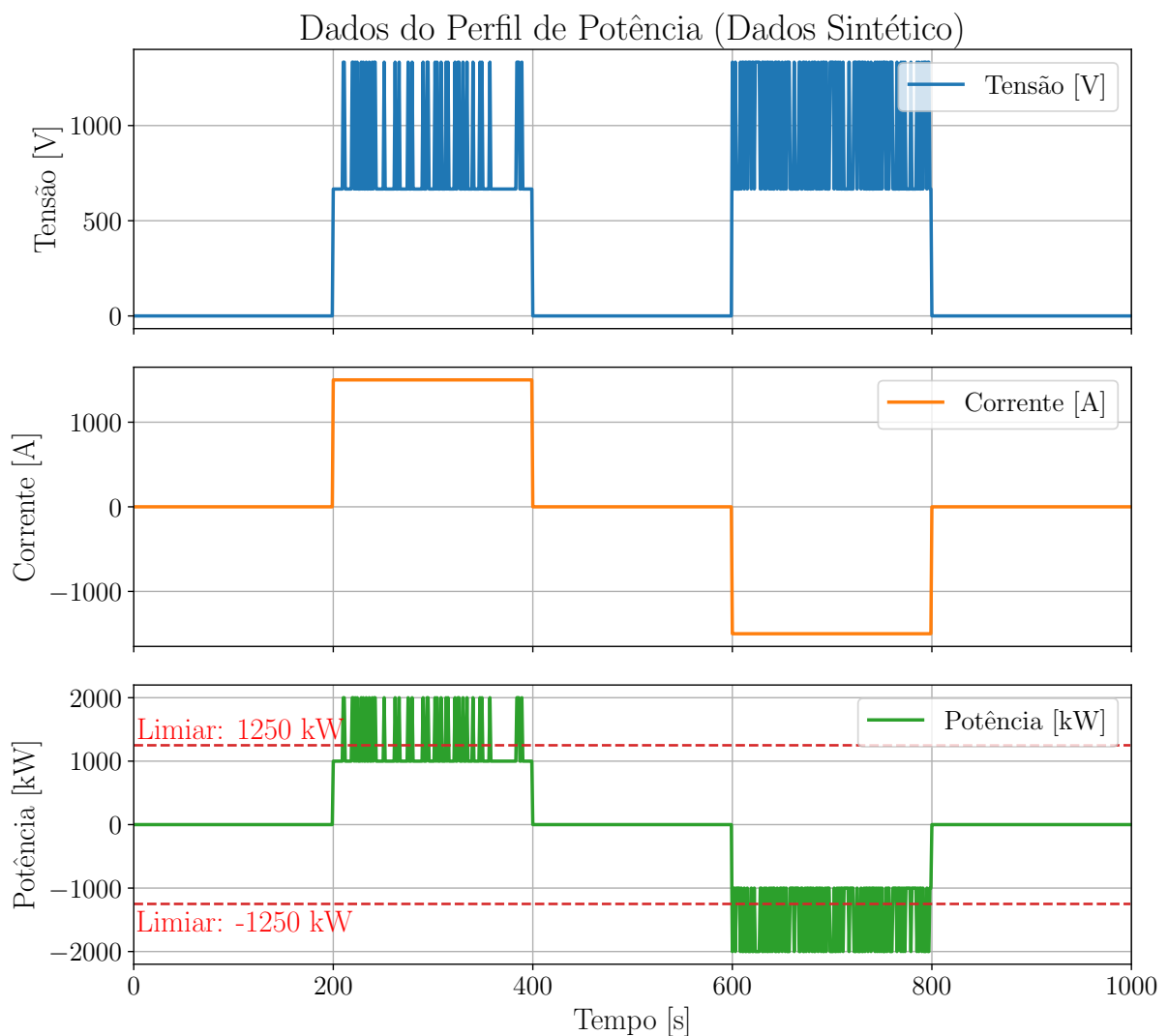
Com a metodologia apresentada nesta seção, realizou-se a simulação considerando o perfil de potência sintético ilustrado na Figura 3.6. Esse perfil representa, de forma didática, um ciclo operacional completo do caminhão, contemplando as etapas de carregamento, subida da cava, descarregamento, descida regenerativa e retorno ao ponto inicial.

No intervalo inicial, a potência é nula, correspondendo ao período em que o caminhão permanece no fundo da cava durante o carregamento do minério. Em $t = 200$ s, o veículo inicia o deslocamento, passando a demandar potência de tração da ordem de $P = 1000$ kW, com picos que atingem aproximadamente 2000 kW durante a subida até o topo da cava.

Em $t = 400$ s, o caminhão alcança o ponto mais alto e permanece em repouso para realizar o descarregamento do material, retornando temporariamente à condição de potência próxima de zero. A partir de $t = 600$ s inicia-se a descida da cava, fase em que ocorre frenagem regenerativa. Nessa etapa, os motores operam como geradores e disponibilizam energia ao barramento, resultando em potência regenerativa média de aproximadamente $P = -1000$ kW, com picos próximos de -2000 kW.

Ao final da descida, o caminhão retorna à posição de carregamento, reiniciando o ciclo e caracterizando o perfil periódico utilizado nas simulações.

Figura 3.6 – Perfil sintético de operação do caminhão.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os picos de potência apresentados nesse perfil são aleatórios, simulando momentos de maior demanda energética ao longo da operação. Esses instantes caracterizam transitórios, que são situações em que a utilização de supercapacitores é particularmente vantajosa, devido à sua elevada densidade de potência e à capacidade de responder rapidamente a variações abruptas de carga. Nos perfis reais obtidos do veículo em operação, observou-se que a maior ocorrência de picos está associada aos períodos de frenagem. Assim, o perfil sintético foi construído com uma probabilidade de 65% de gerar picos durante os períodos de potência positiva (tração) e 80% de gerar picos nos períodos de potência negativa (frenagem).

Como forma de validar a simulação, foi utilizado o perfil de potência acima, arbitrando valores para a composição dos bancos de baterias e supercapacitores, bem como para a potência de limiar, o estado de carga de referência do supercapacitor e sua banda de histerese, além da taxa C de referência da bateria para a transferência de energia entre os elementos, conforme demonstrado na Tabela 3.1. Esses valores foram definidos de modo a representar diferentes cenários de operação, forçando situações de potência rejeitada — seja por limitação de corrente ou por estado de carga — e evidenciando o comportamento de transferência de potência entre os sistemas de armazenamento.

Tabela 3.1 – Tabela com parâmetros para o modelo de validação da simulação.

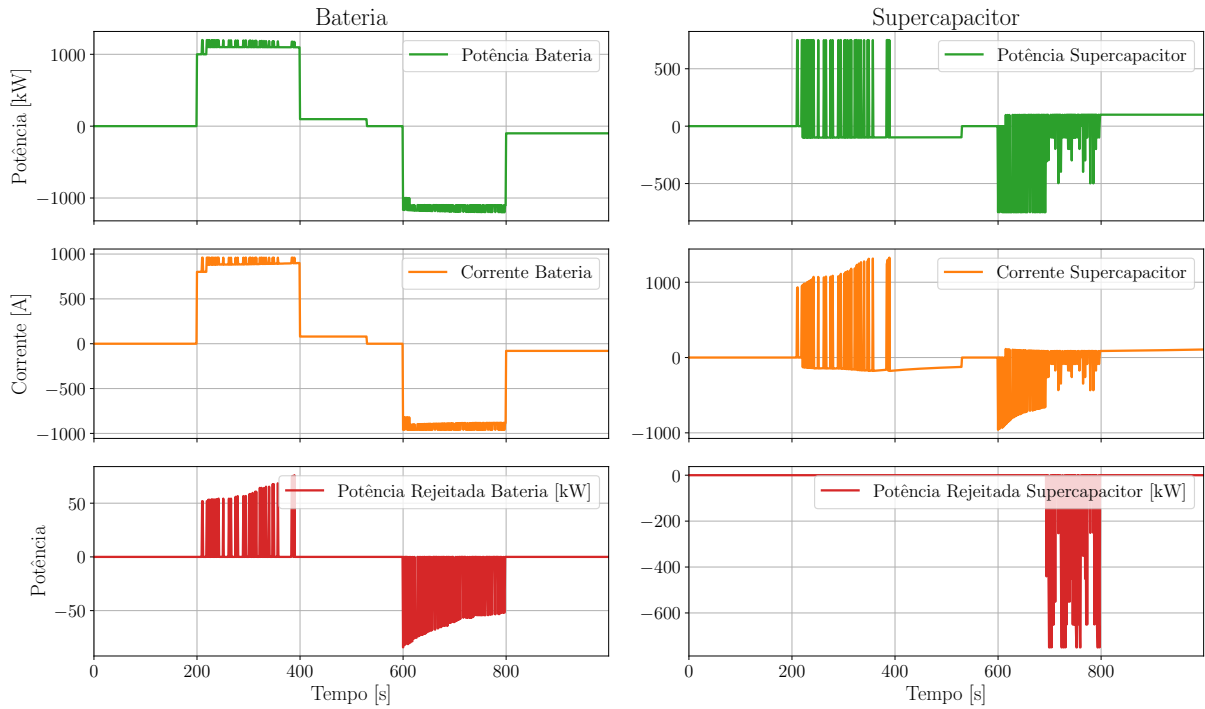
	$N_{s,b}$	$N_{m,b}$	$N_{p,b}$	Cap_b [Ah]	Tensão Nom. [V]	SoC Inicial [%]	Taxa C [$T_{x,b}$]	
Bateria	16	24	4	40	3,25	50	6	
	$N_{s,sc}$	$N_{m,sc}$	$N_{p,sc}$	Cor. Nom. [A]	Tensão Nom. [V]	SoC Inicial [%]	Taxa C [$T_{x,sc}$]	Cap. [F]
Supercapacitor	16	24	10	280	3,00	50	8	3140
	Pth [kW]	SoC_{sc,ref} [%]	BH [%]	T_{ref}				
Simulação	1250	50	4	0,5				

Na Figura 3.7 estão ilustrados os gráficos de potência, corrente e potência rejeitada para os bancos, utilizando o perfil sintético de validação. O comportamento do banco de baterias ocorreu conforme esperado. No período entre $200\text{ s} \leq t \leq 400\text{ s}$, o banco atuou fornecendo energia ao barramento, sendo esperada, portanto, a presença de potência positiva e corrente positiva. Observa-se que o banco de baterias rejeitou, em alguns picos, o fornecimento de potência nesse intervalo, sendo essa rejeição decorrente da capacidade máxima de fornecimento de corrente do banco, conforme ilustrado na Equação 3.25.

$$I_{max,b} = \text{Cap}_b \cdot N_{p,b} \cdot T_{c,b} = 40 \cdot 4 \cdot 6 = 960 \text{ A} \quad (3.25)$$

Dessa forma, observando que a corrente no sistema é ceifada ao atingir 960 A, é possível afirmar que o sistema de armazenamento em baterias rejeitou a entrega de

Figura 3.7 – Gráficos de potência, corrente e potência rejeitada para os elementos armazenadores utilizando um perfil de validação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

potência no intervalo $200\text{ s} \leq t \leq 400\text{ s}$ devido à limitação de corrente. Essa rejeição aumenta ao longo do tempo em razão do descarregamento da bateria, que reduz seu estado de carga e, conseqüentemente, sua tensão terminal. Com a queda de tensão, o sistema tenta compensar elevando o nível de corrente, o que intensifica ainda mais a rejeição, já que o limite máximo de corrente é ultrapassado de forma mais ampla.

Um comportamento semelhante ocorre no período entre $600\text{ s} \leq t \leq 800\text{ s}$, quando o sistema, agora absorvendo energia, também rejeita potência devido às limitações de corrente. Nesse cenário, porém, a rejeição diminui ao longo do tempo, pois o aumento do estado de carga eleva a tensão da bateria, reduzindo a corrente necessária para absorver a mesma potência e, assim, mitigando a rejeição.

Para a análise do comportamento do banco de supercapacitores exposto na Figura 3.7, utiliza-se complementarmente a Figura 3.8, que apresenta o comportamento de estado de carga, tensão e corrente dos sistemas de armazenamento. No período entre $200\text{ s} \leq t \leq 400\text{ s}$, observa-se que o banco de supercapacitores forneceu energia sem rejeitar potência. Esse comportamento ocorre devido à elevada capacidade de corrente desse componente e ao fato de seu estado de carga não ter sido esgotado nesse intervalo. Além disso, nota-se um efeito semelhante ao observado na bateria: a corrente do supercapacitor aumenta para compensar a queda de tensão decorrente da redução do estado de carga.

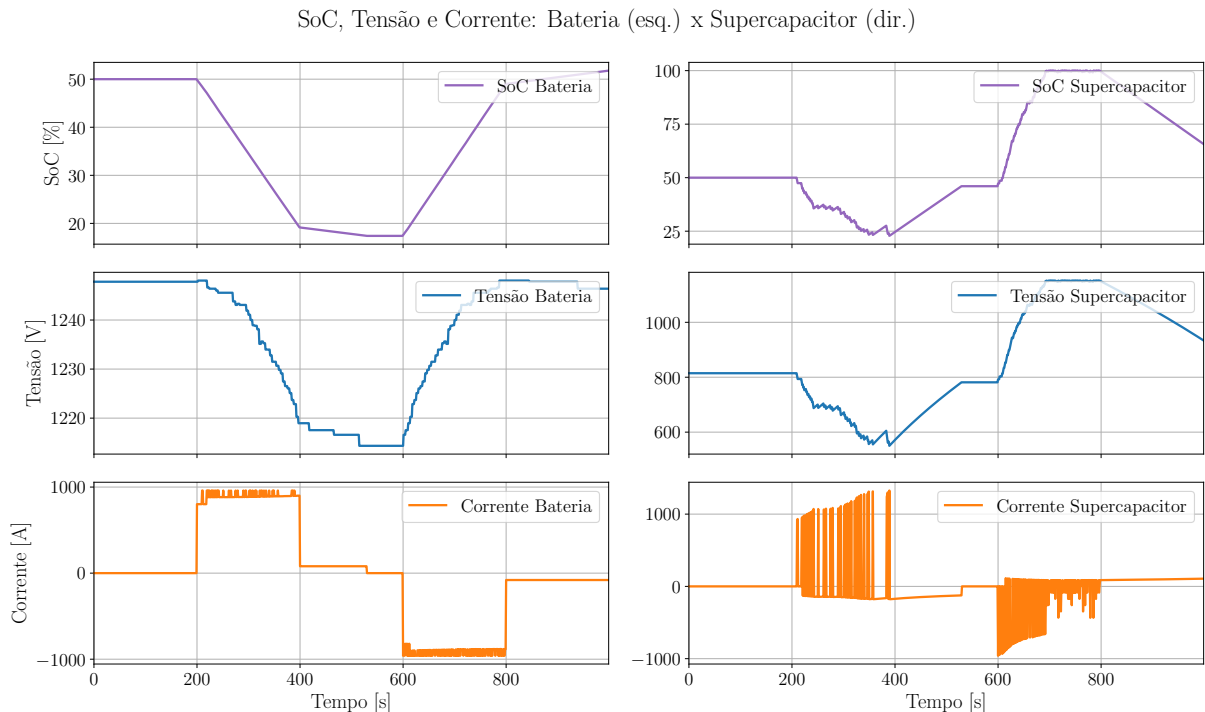
O período entre $400\text{ s} \leq t \leq 600\text{ s}$ representa a etapa de descarregamento do

caminhão, na qual não há demanda energética de tração ou frenagem. Nesse intervalo, observa-se que o supercapacitor atuou em conjunto com a bateria para manter seu estado de carga próximo ao valor de referência de 50%. Ao atingir 46%, o processo de carregamento foi interrompido devido à banda de histerese implementada no controle. Nesse mesmo período, o estado de carga da bateria reduz, uma vez que ela fornece energia ao banco de supercapacitores.

Entre $600\text{ s} \leq t \leq 800\text{ s}$, o supercapacitor passa a absorver picos de potência, elevando seu estado de carga. Em $t = 685\text{ s}$, o banco atinge seu estado máximo, passando então a rejeitar potência. Nessa condição, o sistema tenta descarregar o supercapacitor para o banco de baterias sempre que possível, de modo a liberar capacidade para absorver novos picos de energia.

Concluindo o ciclo, após $t = 800\text{ s}$, o caminhão deixa de demandar ou fornecer potência, permitindo que a energia armazenada no supercapacitor seja transferida para o banco de baterias. Nesse momento, observa-se a redução do estado de carga do banco de supercapacitores e o aumento correspondente no estado de carga da bateria, resultado direto do gerenciamento de energia entre os dois sistemas.

Figura 3.8 – Gráficos de estado de carga, tensão e corrente para os elementos armazenadores utilizando um perfil de validação.

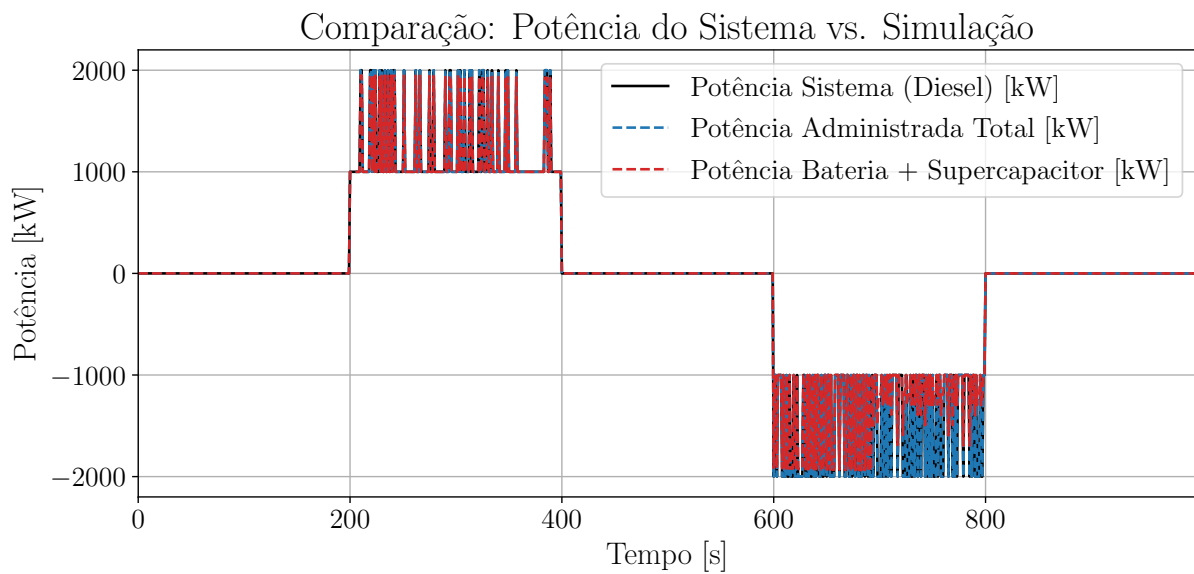


Fonte: Elaborado pelo autor.

As figuras apresentadas até este ponto evidenciam o comportamento esperado do modelo, tanto para o banco de supercapacitores quanto para o banco de baterias. Como etapa final de verificação, realiza-se a comparação entre a potência de entrada do

sistema e duas grandezas obtidas a partir da simulação, que são a soma das potências efetivamente processadas pelos bancos de bateria e supercapacitor, e a soma dessas potências com a parcela rejeitada pelo sistema. A primeira corresponde à potência administrada diretamente pelo HESS, enquanto a segunda representa a potência total administrada pelo conjunto, incluindo a contribuição associada às limitações operacionais. A Figura 3.9 apresenta essas três curvas, permitindo avaliar a coerência energética do modelo e verificar a correta implementação da estratégia de gerenciamento de potência.

Figura 3.9 – Comparação entre as potencia demandadas, administradas e absorvidas ou fornecidas pelos sistema de armazenamento para um perfil sintético.



O gráfico apresentado na Figura 3.9 confirma o comportamento esperado. A potência administrada total, definida como a soma das referências de potência para o banco de supercapacitores, da referência de potência para o banco de baterias e da potência rejeitada, coincide com a potência disponibilizada pelo perfil de entrada.

3.4 METODOLOGIA DE PROJETO ÓTIMO PROPOSTA

O problema de dimensionamento ótimo do sistema híbrido de armazenamento de energia (HESS) é formulado diretamente como um problema de otimização econômica baseado no Valor Presente Líquido (VPL) ao longo de um horizonte de análise de T meses.

Define-se o vetor de decisão

$$\mathbf{z} = (N_{m,b}, N_{p,b}, N_{m,sc}, N_{p,sc}, P_{th}),$$

onde:

- $N_{m,b}$: número de módulos de bateria em série;
- $N_{p,b}$: número de *strings* de bateria em paralelo;
- $N_{m,sc}$: número de módulos de supercapacitores em série;
- $N_{p,sc}$: número de *strings* de supercapacitores em paralelo;
- P_{th} : potência de limiar do controle energético.

O problema de otimização é formalmente definido como:

$$\begin{aligned}
 \max_{\mathbf{z}} \quad & \text{VPL}(\mathbf{z}) = -C_0(\mathbf{z}) - C_{rep}^{VP}(\mathbf{z}) + B_{reg}^{VP}(\mathbf{z}) \\
 \text{sujeito a} \quad & V_{tot}(\mathbf{z}) \leq V_{\max} \\
 & V_{b,\min} \leq V_b N_{s,b} N_{m,b} \leq V_{b,\max} \\
 & I_b \leq I_{b,\max} \\
 & I_{sc} \leq I_{sc,\max} \\
 & V_{sc,\min} \leq V_{sc} N_{s,sc} N_{m,sc} \leq V_{sc,\max} \\
 & N_{m,b}, N_{p,b}, N_{m,sc}, N_{p,sc} \in \mathbb{Z}_+ \\
 & P_{th} \in \mathbb{R}_+
 \end{aligned} \tag{3.26}$$

em que $C_0(\mathbf{z})$ representa o custo inicial de investimento, composto pelo custo total dos bancos de baterias e supercapacitores e pelo custo da eletrônica de potência; $C_{rep}^{VP}(\mathbf{z})$ corresponde ao custo total de substituições ao longo do horizonte de análise, devidamente trazido a valor presente por meio da taxa mínima de atratividade; $B_{reg}^{VP}(\mathbf{z})$ é o benefício econômico acumulado da regeneração de energia, também trazido a valor presente; $V_{tot}(\mathbf{z}) = N_{tot,b} Vol_b + N_{tot,sc} Vol_{sc}$ é o volume total ocupado pelos elementos armazenadores, sendo Vol_b e Vol_{sc} os volumes unitários da célula de bateria e do supercapacitor, respectivamente; $V_{\max}$ é o volume máximo disponível no compartimento do caminhão destinado ao sistema de armazenamento; V_b é a tensão nominal de uma célula de bateria; $V_{b,\min}$ e $V_{b,\max}$ representam, respectivamente, os limites inferior e superior admissíveis para a tensão total do banco de baterias; V_{sc} é a tensão nominal de uma célula de supercapacitor e $V_{sc,\min}$ e $V_{sc,\max}$ representam os limites inferior e superior admissíveis para a tensão total do banco de supercapacitores.

A seguir são detalhadas as parcelas da função-objetivo do problema de otimização formulado neste trabalho.

3.4.1 O Custo Inicial do Sistema

O custo inicial ocorre no instante $n = 0$ e, portanto, não sofre desconto financeiro. Ele é composto pelo custo total dos bancos de baterias, dos bancos de supercapacitores e da eletrônica de potência, sendo todos os valores expressos em moeda local.

Assim, o custo inicial total do sistema híbrido é expresso por

$$C_0(\mathbf{z}) = C_b^{unit} N_{tot,b} + C_{sc}^{unit} N_{tot,sc} + C_e. \quad (3.27)$$

em que $C_b^{unit} N_{tot,b}$ representa o custo total do banco de baterias, $C_{sc}^{unit} N_{tot,sc}$ corresponde ao custo total do banco de supercapacitores e C_e é o custo associado à eletrônica de potência.

O número total de células de bateria instaladas é dado por

$$N_{tot,b} = N_{s,b} N_{m,b} N_{p,b},$$

enquanto o número total de supercapacitores é definido por

$$N_{tot,sc} = N_{s,sc} N_{m,sc} N_{p,sc}.$$

Como os preços de referência dos componentes são originalmente cotados em dólares (USD), realiza-se a conversão cambial por meio da cotação média C_{usd} , expressa em BRL/USD. Dessa forma, os custos unitários em moeda local são definidos por

$$C_b^{unit} = Pr_{b,usd} C_{usd}, \quad (3.28)$$

em que $Pr_{b,usd}$ representa o preço unitário da célula de bateria em dólares, e por

$$C_{sc}^{unit} = Pr_{sc,usd} C_{usd}, \quad (3.29)$$

em que $Pr_{sc,usd}$ é o preço unitário do supercapacitor em dólares.

O custo da eletrônica de potência é igualmente convertido para reais e definido por

$$C_e = P_{conv} Pr_{e,kw} C_{usd}, \quad (3.30)$$

em que $Pr_{e,kw}$ corresponde ao custo específico do conversor em USD/kW e P_{conv} representa a potência nominal do conversor CC-CC de três portas, dimensionada a partir da soma das potências máximas admissíveis dos bancos de baterias e supercapacitores, extraídas

do perfil da minal, garantindo que o sistema suporte simultaneamente as condições de pico de tração e frenagem regenerativa.

3.4.2 Benefício Econômico da Regeneração Energética Provida pelo HESS

O benefício econômico associado à regeneração energética provida pelo HESS é incorporado à função objetivo por meio do valor presente da economia de diesel ao longo do horizonte de análise T . Diferentemente de uma modelagem dependente do tempo, neste trabalho considera-se que o benefício energético mensal permanece constante ao longo da vida útil do sistema.

Essa hipótese é justificada pelo fato de que, embora ocorra degradação progressiva dos bancos de baterias e supercapacitores, tal degradação se manifesta predominantemente como redução da capacidade energética total do *pack*. Na aplicação analisada, essa redução implica maior excursão do estado de carga (SoC) para absorver a mesma energia regenerada por ciclo. Entretanto, dentro das faixas operacionais adotadas e considerando os limites de potência e corrente do sistema, essa condição não compromete de forma significativa a capacidade de absorção da energia regenerativa proveniente da frenagem. Assim, assume-se que a energia efetivamente recuperada por ciclo permanece aproximadamente constante ao longo do horizonte de análise.

Essa simplificação não altera de maneira relevante os resultados econômicos, uma vez que o principal impacto financeiro da degradação está associado à necessidade de substituição dos bancos, já contemplada no fluxo de caixa. Por outro lado, a consideração de benefício energético constante reduz a complexidade computacional do modelo e permite uma formulação analítica mais direta.

Dessa forma, o valor presente do benefício econômico da regeneração é expresso por

$$B_{reg}^{VP}(\mathbf{z}) = \sum_{n=1}^T \frac{B_m(\mathbf{z})}{(1+i)^n}, \quad (3.31)$$

em que $B_m(\mathbf{z})$ representa o benefício econômico mensal constante e i é a Taxa Mínima de Atratividade mensal.

O benefício mensal é dado por

$$B_m(\mathbf{z}) = \frac{E_{c,op}(\mathbf{z}) N_{op,m}}{\eta} Pr_d, \quad (3.32)$$

em que $E_{c,op}(\mathbf{z})$ é a energia efetivamente armazenada por ciclo operacional, assumida constante ao longo do tempo; $N_{op,m}$ é o número de ciclos operacionais mensais; η é o fator

de conversão entre energia elétrica regenerada e equivalente energético do diesel (kWh/L); e Pr_d é o preço do diesel em R\$/L.

O número de ciclos mensais é estimado por

$$N_{op,m} = 30 \cdot \frac{24 T_d}{T_{op}}, \quad (3.33)$$

em que T_d é a taxa de disponibilidade diária do caminhão e T_{op} é a duração média de um ciclo operacional.

3.4.3 O Custo de Substituição dos Bancos de Armazenamento

O custo de substituição dos bancos de armazenamento é incorporado à função objetivo por meio do valor presente das reposições necessárias ao longo do horizonte de análise T . Essa parcela é definida por

$$C_{rep}^{VP}(\mathbf{z}) = \sum_k \frac{C_b^{unit} N_{tot,b}}{(1+i)^{t_{b,k}}} + \sum_k \frac{C_{sc}^{unit} N_{tot,sc}}{(1+i)^{t_{sc,k}}}, \quad (3.34)$$

em que $t_{b,k}$ e $t_{sc,k}$ representam, respectivamente, os instantes (em meses) da k -ésima substituição do banco de baterias e do banco de supercapacitores. As somas consideram apenas os eventos de substituição tais que $t_{b,k} \leq T$ e $t_{sc,k} \leq T$.

Os instantes de substituição são determinados a partir da vida útil dos componentes e do regime operacional do sistema. Para o banco de baterias, cuja vida útil é especificada pelo fabricante em número de ciclos completos a 100% de excursão de estado de carga (L_b), adota-se o conceito de ciclo equivalente (*Equivalent Full Cycle* — EFC) para compatibilizar a condição real de operação com a especificação de degradação.

O ciclo equivalente representa uma forma simplificada de mapear a excursão real de estado de carga (SoC) observada na aplicação para o número de ciclos completos considerados pelo fabricante. Como a vida útil usualmente é fornecida para ciclos com 100% de variação de SoC, um ciclo operacional cuja excursão seja inferior a esse valor contribui proporcionalmente para a degradação. Assim, se a excursão de SoC em um ciclo operacional for ΔSoC , expressa em porcentagem, o número de ciclos equivalentes por operação é dado por

$$N_{eq,op} = \frac{\Delta SoC}{100}.$$

Dessa forma, o número mensal de ciclos equivalentes é

$$N_{eq,m} = N_{op,m} \cdot \frac{\Delta SoC}{100},$$

em que $N_{op,m}$ é o número de ciclos operacionais mensais.

O instante da k -ésima substituição do banco de baterias é então determinado por

$$t_{b,k} = k \cdot \frac{L_b}{N_{eq,m}},$$

sendo L_b a vida útil especificada em ciclos completos equivalentes.

Cabe destacar que, por simplicidade, neste trabalho considera-se que a excursão de estado de carga (SoC) permanece constante ao longo da vida útil do *pack*. Embora, na prática, a degradação da capacidade tenda a aumentar gradualmente essa excursão para uma mesma energia processada, tal variação não é suficientemente significativa para alterar de forma relevante os resultados da análise econômica, sendo portanto desconsiderada no modelo.

Para o banco de supercapacitores, cuja vida útil é especificada em horas de operação L_{sc} , o instante da k -ésima substituição é definido por

$$t_{sc,k} = k \cdot \frac{L_{sc}}{H_m},$$

em que $H_m = 30 \cdot 24 T_d$ representa o número de horas mensais de operação efetiva do caminhão, sendo T_d a taxa de disponibilidade diária.

3.4.4 A Solução do Problema de Otimização a partir do Algoritmo NSGA-II

O problema de dimensionamento ótimo do HESS, formulado na Equação 3.26, apresenta características que dificultam a aplicação de métodos determinísticos clássicos. A função objetivo envolve termos não lineares, dependência implícita de simulações energéticas e eventos discretos de substituição ao longo do horizonte de análise. Além disso, o vetor de decisão contém variáveis inteiras e contínuas, configurando um problema de otimização mista e não convexa.

Embora o algoritmo NSGA-II (*Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II*) seja tradicionalmente empregado em problemas de otimização multiobjetivo, sua estrutura baseada em população, operadores genéticos e mecanismos de elitismo o torna igualmente aplicável e robusto para problemas mono-objetivo complexos. Nesse contexto, o NSGA-II é utilizado como um algoritmo evolucionário capaz de explorar eficientemente um espaço de busca discreto-contínuo, sem exigir derivadas, continuidade ou convexidade da função objetivo.

Para adequar o problema à estrutura típica do NSGA-II, a maximização do VPL é reformulada como um problema de minimização, conforme a convenção usual em algoritmos evolucionários. Define-se a função de aptidão

$$f_1(\mathbf{z}) = -\text{VPL}(\mathbf{z}),$$

de modo que o problema passa a ser expresso como

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{z}} \quad & f_1(\mathbf{z}) \\ \text{sujeito a} \quad & g_j(\mathbf{z}) \leq 0, \quad j = 1, \dots, m \\ & h_k(\mathbf{z}) = 0, \quad k = 1, \dots, p \\ & \mathbf{z} \in \Omega, \end{aligned} \tag{3.35}$$

em que Ω representa o domínio das variáveis de decisão, incluindo restrições de integralidade e limites operacionais.

As restrições físicas e operacionais do sistema — limites de tensão, corrente, volume e potência — são tratadas no processo evolutivo por meio de penalização das soluções inviáveis. Dessa forma, indivíduos que violam restrições recebem um valor de aptidão degradado, reduzindo sua probabilidade de seleção nas gerações subsequentes.

No presente trabalho, cada indivíduo da população representa um vetor

$$\mathbf{z} = (N_{m,b}, N_{p,b}, N_{m,sc}, N_{p,sc}, P_{th}),$$

sendo as quatro primeiras variáveis inteiras e P_{th} contínua. A avaliação de cada indivíduo envolve:

1. Verificação das restrições elétricas e volumétricas;
2. Simulação do fluxo energético para determinação de $E_{c,op}(\mathbf{z})$;
3. Cálculo do custo inicial $C_0(\mathbf{z})$;
4. Determinação dos instantes de substituição e do custo presente $C_{rep}^{VP}(\mathbf{z})$;
5. Cálculo do benefício presente $B_{reg}^{VP}(\mathbf{z})$;
6. Avaliação final do $\text{VPL}(\mathbf{z})$.

Apesar de o problema possuir apenas um objetivo explícito (maximização do VPL), a utilização do NSGA-II apresenta vantagens relevantes: (i) robustez frente à não linearidade e descontinuidade introduzida pelas substituições discretas, (ii) capacidade de lidar naturalmente com variáveis inteiras, (iii) exploração global do espaço de busca, reduzindo a probabilidade de convergência para ótimos locais, e (iv) possibilidade futura de extensão direta para formulações multiobjetivo, como inclusão simultânea de métricas técnicas (massa, volume, degradação ou eficiência energética).

Portanto, a escolha do NSGA-II não decorre da natureza multiobjetivo do problema, mas sim de sua capacidade de tratar eficientemente problemas de otimização não convexos, mistos e fortemente não lineares, como o dimensionamento econômico do HESS proposto neste trabalho.

3.5 Resumo do Capítulo

Neste capítulo foi apresentada a metodologia de projeto ótimo para o dimensionamento do HESS, formulando-se o problema como uma maximização do Valor Presente Líquido (VPL) ao longo de um horizonte de T meses. O vetor de decisão contempla os parâmetros estruturais dos bancos de baterias e supercapacitores, bem como a potência de limiar do controle energético.

A função objetivo integra o custo inicial, o custo de substituição, modelado a partir da vida útil dos componentes e do conceito de ciclo equivalente, e o benefício econômico da regeneração de energia, assumido constante ao longo do tempo por razões de simplificação sem prejuízo relevante à análise econômica. Também foram estabelecidas as restrições físicas e operacionais do sistema, resultando em um problema de otimização não linear e mista-inteira.

Por fim, foi descrita a aplicação do algoritmo NSGA-II como ferramenta de solução, destacando sua robustez para tratar o espaço de busca discreto, não convexo e multimodal do problema.

No capítulo seguinte, são apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir da aplicação da metodologia proposta.

4 Resultados

Este capítulo apresenta os resultados obtidos a partir da metodologia de dimensionamento e avaliação econômica desenvolvida no Capítulo 3. Com base nos modelos matemáticos, parâmetros e restrições previamente estabelecidos, são determinadas as configurações ótimas dos sistemas híbridos de armazenamento de energia para os diferentes perfis operacionais analisados.

Inicialmente, são apresentados os perfis de potência das três minas consideradas, bem como os principais parâmetros adotados no projeto, devidamente justificados. Em seguida, são expostos os resultados do processo de otimização para cada caso, contemplando não apenas os indicadores econômicos, mas também a análise do comportamento dinâmico dos HESS ótimos por meio de simulações temporais.

Na sequência, realiza-se uma análise de sensibilidade paramétrica, com o objetivo de avaliar o impacto da variação de parâmetros-chave sobre o dimensionamento ótimo e sobre os indicadores de viabilidade econômica.

Por fim, é apresentada uma análise consolidada dos resultados, com ênfase nas principais conclusões técnicas e econômicas decorrentes do estudo.

4.1 Análise dos Perfis

4.1.1 Mina de Conceição do Mato Dentro

O primeiro perfil corresponde a um caminhão Komatsu 730E operando na Mina de Conceição do Mato Dentro, no interior de Minas Gerais. Essa mina possui uma característica operacional distinta das demais, pois apresenta um ciclo invertido: o caminhão é carregado em um ponto mais elevado e descarrega o material em um ponto inferior. Como consequência, esse perfil apresenta uma grande quantidade de energia dissipada nos grids, o que é particularmente interessante para a implementação do banco de armazenamento híbrido, já que disponibiliza elevados níveis de energia regenerável durante a frenagem regenerativa. As características desse perfil estão apresentadas na Tabela 4.1.

O perfil apresenta correntes nos dois sentidos, sendo a corrente máxima de tração igual a 1884,41 A e a corrente de frenagem, dissipada no banco resistivo, de $-1412,29$ A. A presença de picos de corrente elevados pode ser um diferencial para a adoção de supercapacitores, já que esses dispositivos apresentam maior densidade de potência em comparação com baterias convencionais. Observa-se também que o perfil possui um elevado patamar de potência de frenagem, o que pode ser explicado pelo ciclo operacional inverso da mina.

Tabela 4.1 – Análise do perfil de operação da Mina de Conceição do Mato Dentro.

Parâmetro Observado	Valor
Corrente Máxima	1884,41 A
Corrente Mínima	-1412,29 A
Tensão Máxima	1497,92 V
Tensão Mínima	4,39 V
Potência Máxima	1298,21 kW
Potência Mínima	-1952,69 kW
Energia Consumida	153,79 kWh
Energia Dissipada	-147,73 kWh
Média Potência Consumida	786,44 kW
Média Potência Dissipada	-636,16 kW
Tempo de Potência Consumida	704 s
Tempo de Potência Dissipada	836 s
Relação entre Dissipada e Consumida	0,96

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para esse deslocamento, foram consumidos 153,79 kW h de energia para a tração do veículo, enquanto 143,73 kW h foram dissipados no banco resistivo para realizar a frenagem. Dessa forma, nota-se que, para esse perfil, seria teoricamente possível regenerar até 96% da energia total gasta, caso toda a energia de frenagem pudesse ser recuperada e armazenada.

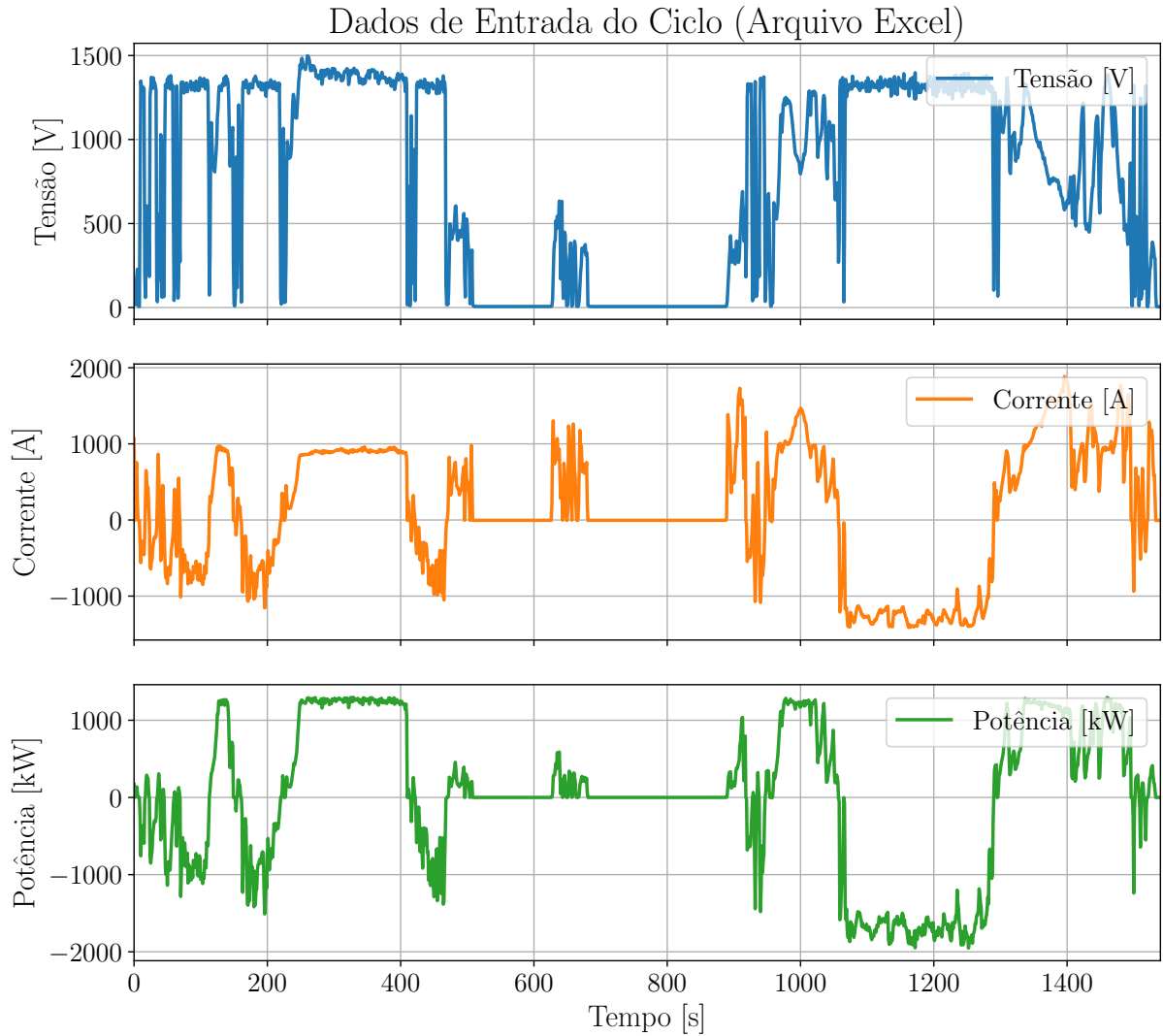
O perfil de potência, corrente e tensão está ilustrado na Figura 4.1, sendo possível observar os comportamentos apresentados na Tabela 4.1. Além disso, nota-se que o perfil é composto por platôs de potência, que representam momentos específicos do deslocamento e refletem as diferentes fases operacionais do ciclo do caminhão.

4.1.2 Mina de Araxá

A Mina de Araxá está localizada na cidade de Araxá, no oeste do estado de Minas Gerais. Nessa mina é extraído fosfato, componente utilizado principalmente na produção de fertilizantes. A lavra apresenta uma topologia intermediária, com o ponto de carregamento situado em uma cota média e o ponto de descarregamento em um nível levemente inferior. Além disso, essa mina possui trechos de aclives e declives bem distribuídos ao longo de toda a operação. A Tabela 4.2 expõe as características desse perfil de operação.

O perfil de operação do caminhão em Araxá apresenta correntes de tração superiores às observadas em Conceição do Mato Dentro, enquanto as correntes de frenagem são menores, evidenciando a diferença entre os dois cenários operacionais. Além disso, o caminhão operou com potência máxima de tração de 1376,42 kW e potência máxima de frenagem de -1879,15 kW, valores semelhantes aos registrados em Conceição do Mato Dentro. No entanto, a energia total de tração foi de 99,28 kW h,

Figura 4.1 – Perfil de operação para a Mina de Conceição do Mato Dentro.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 4.2 – Análise do perfil de operação da Mina de Araxá.

Parâmetro Observado	Valor
Corrente Máxima	2090,35 A
Corrente Mínima	-1399,26 A
Tensão Máxima	1580,95 V
Tensão Mínima	5,37 V
Potência Máxima	1376,42 kW
Potência Mínima	-1879,15 kW
Energia Consumida	99,28 kWh
Energia Dissipada	-50,95 kWh
Média Potência Consumida	683,38 kW
Média Potência Dissipada	-475,21 kW
Tempo de Potência Consumida	523 s
Tempo de Potência Dissipada	386 s
Relação entre Dissipada e Consumida	0,51

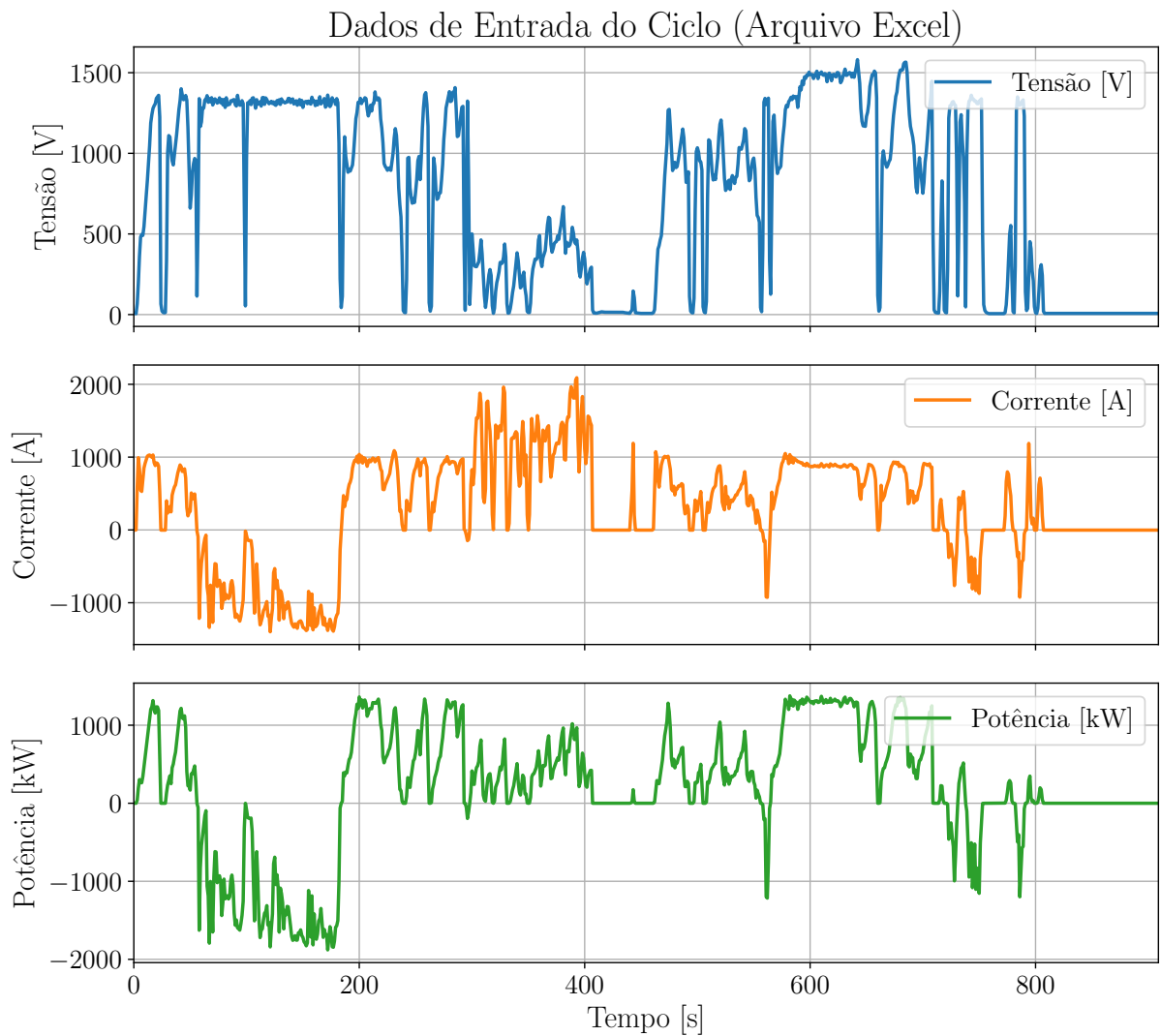
Fonte: Elaborado pelo autor.

enquanto a energia de frenagem foi de 50,95 kWh, resultando em uma relação entre energia dissipada e consumida de aproximadamente 51%.

Dessa forma, o perfil de operação em Araxá se diferencia claramente daquele de Conceição do Mato Dentro, representando um cenário em que não é possível regenerar uma quantidade de energia próxima à consumida. Isso caracteriza um ambiente menos favorável para a adoção de um sistema híbrido de armazenamento de energia.

O perfil de tensão, corrente e potência para essa operação está ilustrado na Figura 4.2, sendo possível observar os comportamentos apresentados na Tabela 4.2. Nota-se que esse perfil apresenta características distintas do perfil anterior, com platôs de potência menores, maior quantidade de picos de potência e, principalmente, menor potência dissipada no banco resistivo.

Figura 4.2 – Perfil de operação para a Mina de Araxá.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.3 Mina de Riacho dos Machados

O terceiro perfil a ser analisado corresponde à operação na Mina de Riacho dos Machados, localizada no norte de Minas Gerais. Essa operação se caracteriza por longos trechos de aclave e declive, apresentando um comportamento praticamente definido por um grande consumo energético durante a subida da cava, momento em que o caminhão está carregado, seguido de uma dissipação energética menor, porém prolongada, durante a descida, quando o caminhão se encontra descarregado. A Tabela 4.3 apresenta as características operacionais dessa mina.

Nesse cenário, foi observada uma corrente máxima de tração de 1661,98 A, superior à corrente máxima de frenagem, de 1432,58 A, indicando um perfil pouco energético do ponto de vista da frenagem. Essa característica é confirmada pela grande discrepância entre a energia consumida (379,85 kWh) e a energia dissipada (172,76 kWh), resultando em uma relação entre energia dissipada e consumida de aproximadamente 45%, um patamar similar ao da mina de Araxá.

Tabela 4.3 – Análise do perfil de operação da Mina de Riacho dos Machados.

Parâmetro Observado	Valor
Corrente Máxima	1661,98 A
Corrente Mínima	-1432,58 A
Tensão Máxima	1672,23 V
Tensão Mínima	0,0 V
Potência Máxima	1542,87 kW
Potência Mínima	-1881,12 kW
Energia Consumida	379,85 kWh
Energia Dissipada	-172,76 kWh
Média Potência Consumida	814,44 kW
Média Potência Dissipada	-466,92 kW
Tempo de Potência Consumida	1679 s
Tempo de Potência Dissipada	1332 s
Relação entre Dissipada e Consumida	0,45

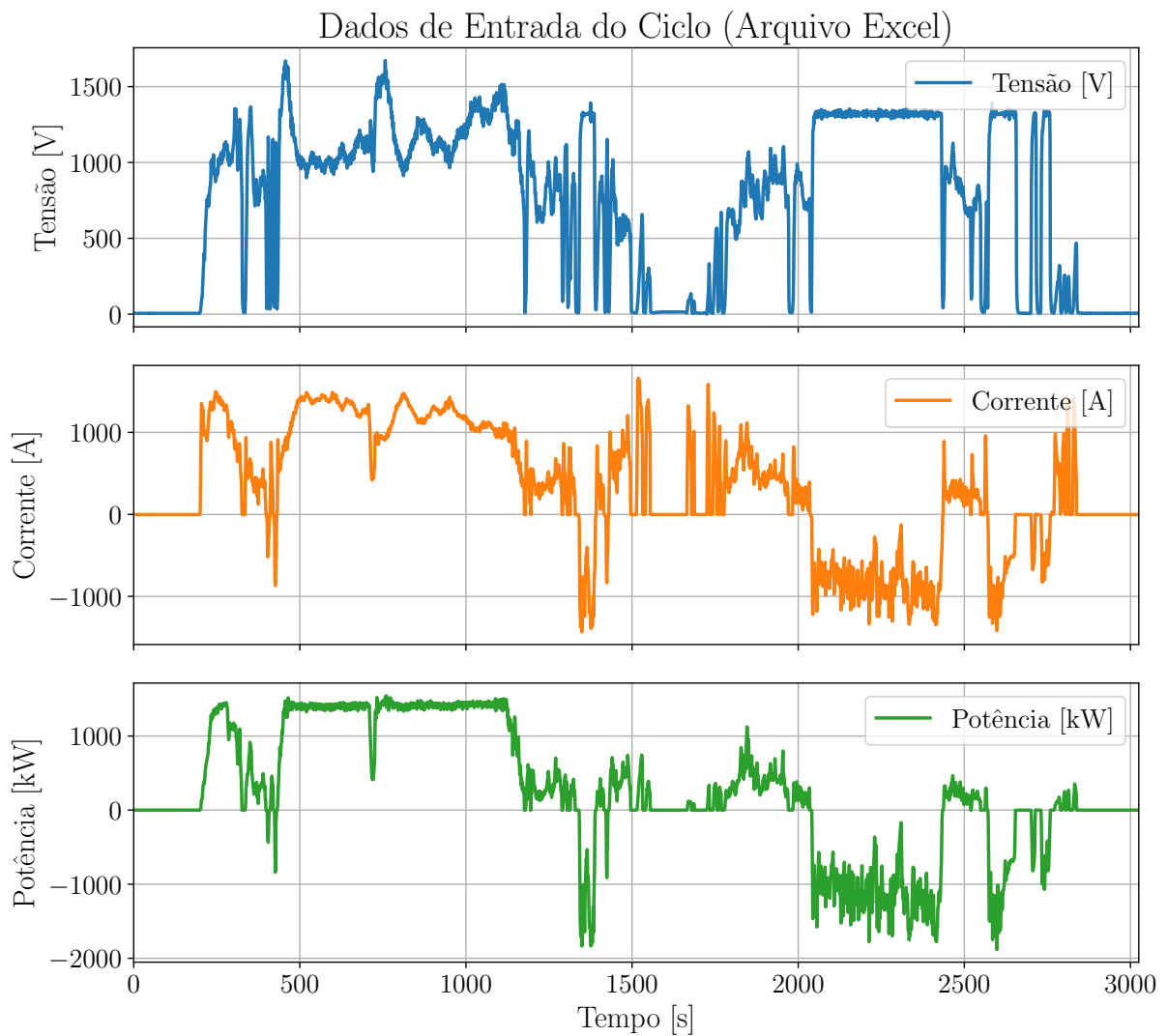
Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 4.3 apresenta os perfis de tensão, corrente e potência para a operação na Mina de Riacho dos Machados. É possível observar um patamar bem definido de potência positiva, correspondente à longa subida da cava, seguido por um breve período de potências positivas menores e negativas, representando o deslocamento em terreno de cota praticamente constante. Em seguida, há um intervalo de potência nula, indicando o tempo em que o caminhão permanece parado para descarregar o material. Logo após, observa-se um período de potências negativas elevadas, associado à descida da cava.

A Tabela 4.4 apresenta, de forma resumida, uma comparação entre os três perfis, considerando valores de corrente máxima e mínima, potências máximas de tração e frenagem, energia consumida, energia dissipada e a relação entre energia dissipada e

consumida. Nota-se que as minas possuem perfis de movimentação distintos, que se refletem diretamente nas características elétricas e energéticas dos veículos. Entre os três cenários, o perfil de Conceição do Mato Dentro se mostra o mais favorável para a implementação de um banco híbrido de armazenamento de energia, devido à maior proporção entre energia dissipada e energia consumida. Já os perfis de Araxá e Riacho dos Machados apresentam relações menores entre energia dissipada e consumida, no entanto, ainda com um excelente potencial para reaproveitamento energético. No caso específico de Riacho dos Machados, a presença de longas subidas e descidas pode levar o sistema de armazenamento a operar próximo de seus limites máximos e mínimos, aspecto que será explorado de forma mais detalhada na próxima seção.

Figura 4.3 – Perfil de operação para a Mina de Riacho dos Machados.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 4.4 – Comparação entre os parâmetros observados na três minas.

Parâmetro Observado	Conceição do Mato Dentro	Araxá	Riacho dos Machados
Corrente Máxima	1884,41 A	2090,35 A	1661,98 A
Corrente Mínima	-1412,29 A	-1399,26 A	-1432,58 A
Potência Máxima	1298,21 kW	1376,42 kW	1542,87 kW
Potência Mínima	-1952,69 kW	-1879,15 kW	-1881,12 kW
Energia Consumida	153,79 kWh	99,28 kWh	379,85 kWh
Energia Dissipada	-147,73 kWh	-50,95 kWh	-172,76 kWh
Relação entre Dissipada e Consumida	0,96	0,51	0,45

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2 Parâmetros Usados no Projeto

Conforme apresentado na Seção 3.4, o problema de otimização depende de um conjunto de parâmetros técnicos, energéticos, econômicos e operacionais. Nesta seção, esses parâmetros são organizados por categoria, de modo a facilitar sua interpretação e consulta posterior.

4.2.1 Parâmetros das Células de Armazenamento

A Tabela 4.5 apresenta os parâmetros elétricos e volumétricos das células de bateria e dos supercapacitores, extraídos dos respectivos datasheets dos fabricantes. Esses valores são utilizados para o dimensionamento elétrico dos arranjos série-paralelo e para a verificação das restrições de corrente e taxa C.

Tabela 4.5 – Parâmetros elétricos das células de armazenamento.

Parâmetro	Descrição	Valor
V_b	Tensão nominal da célula de bateria	3,2 V
$I_{b,nom}$	Corrente nominal da célula de bateria	40 A
$T_{x,b}$	Taxa C máxima da bateria	6 C
V_{sc}	Tensão nominal da célula de supercapacitor	3,0 V
$I_{sc,nom}$	Corrente nominal do supercapacitor	280 A
$T_{x,sc}$	Taxa C equivalente do supercapacitor	1 C
Vol_b	Volume unitário célula bateria	0,596 L
Vol_{sc}	Volume unitário supercapacitor	0,496 L

4.2.2 Parâmetros de Arranjo e Restrições Elétricas

A Tabela 4.6 reúne os limites de tensão, o número de módulos em série e *strings* em paralelo, bem como as restrições de corrente do sistema. As faixas de tensão foram

definidas com base na tensão típica do barramento CC do sistema de tração e nas limitações práticas da eletrônica de potência. O limite inferior foi estabelecido de modo a evitar a operação do conversor com razões cíclicas excessivamente baixas, o que poderia comprometer o desempenho e a eficiência do estágio de conversão. Já o limite superior foi fixado em 1500 V, valor que corresponde ao limite convencional de baixa tensão em corrente contínua.

Os limites do número de módulos em série decorrem dessas restrições de tensão, enquanto os limites de paralelismo foram estabelecidos a partir da corrente máxima admissível no barramento (2000 A). Além disso, foi estabelecida a restrição volumétrica para todo o sistema de armazenamento, baseado no volume disponível fisicamente para sua instalação.

Tabela 4.6 – Parâmetros de arranjo dos bancos e restrições elétricas.

Parâmetro	Descrição	Valor
$V_{b,b}$	Faixa de tensão banco baterias	750–1500 V
$N_{m,b}$	Nº módulos de bateria em série	15–28
$N_{p,b}$	Nº de strings de bateria em paralelo	0–8
$V_{b,sc}$	Faixa de tensão banco supercapacitores	500–1500 V
$N_{m,sc}$	Nº módulos de supercapacitores em série	11–31
$N_{p,sc}$	Nº de strings de supercapacitores em paralelo	0–7
V_{max}	Volume total dos bancos armazenadores	1415 L
$I_{b,max}$	Corrente máxima banco de baterias	2000 A
$I_{sc,max}$	Corrente máxima banco de supercapacitores	2000 A
P_{conv}	Potência nominal do conversor	2000 kW

A potência nominal do conversor foi fixada em 2000 kW, valor ligeiramente superior aos picos regenerativos observados em campo (≈ 1900 kW), garantindo margem operacional adequada. Deste modo, a potência deste conversor não constitui uma variável de otimização.

4.2.3 Parâmetros Energéticos do Diesel

A Tabela 4.7 apresenta os parâmetros físico-químicos do diesel utilizados para converter a energia elétrica regenerada em economia equivalente de combustível.

Os valores de densidade do diesel (d_d), energia específica ($E_{e,d}$) e eficiência do motor (η_d) foram extraídos de (WANG *et al.*, 2013), que analisa o desempenho energético

Tabela 4.7 – Parâmetros energéticos do diesel.

Parâmetro	Descrição	Valor
d_d	Densidade do diesel	0,8355 kg/L
$E_{e,d}$	Energia específica do diesel	42,77 MJ/kg
η_d	Eficiência do motor diesel	36%
$E_{d,l}$	Energia química por litro	35,73 MJ/L
$E_{d,t}$	Energia térmica útil por litro	9,93 kWh
η	Fator de conversão energético	3,58 kWh/L
Pr_d	Preço médio do diesel	R\$ 5,78

de motores diesel aplicados a veículos pesados. Esses parâmetros permitem estabelecer a equivalência entre energia elétrica regenerada e energia química do combustível.

Inicialmente, determina-se a energia química por litro de diesel ($E_{d,l}$) a partir da densidade e da energia específica:

$$E_{d,l} = d_d \cdot E_{e,d} = 0,8355 \times 42,77 = 35,73 \text{ MJ/L.}$$

Em seguida, converte-se esse valor para quilowatt-hora, obtendo-se a energia térmica equivalente por litro:

$$E_{d,t} = \frac{35,73}{3,6} = 9,93 \text{ kWh/L,}$$

Considerando a eficiência média do motor diesel ($\eta_d = 36\%$), determina-se o fator global de conversão energético η , que relaciona diretamente a energia elétrica regenerada ao volume equivalente de diesel economizado:

$$\eta = \eta_d \cdot E_{d,t} = 0,36 \times 9,93 = 3,58 \text{ kWh/L.}$$

Esse fator indica que cada litro de diesel efetivamente convertido em trabalho mecânico corresponde a aproximadamente 3,58 kWh de energia útil no eixo. Assim, ao dividir a energia elétrica regenerada por esse fator, obtém-se o volume equivalente de diesel economizado.

Por fim, o preço médio do diesel (Pr_d) foi definido a partir da média histórica dos últimos três anos (PETRÓLEO, 2026), com o objetivo de reduzir a influência de flutuações conjunturais de mercado. Esse parâmetro é diretamente utilizado na conversão da economia energética em benefício econômico mensal.

4.2.4 Parâmetros Econômicos

A Tabela 4.8 reúne os parâmetros de custo e financeiros utilizados na análise de VPL.

Tabela 4.8 – Parâmetros econômicos do modelo.

Parâmetro	Descrição	Valor
$Pr_{b,kwh}$	Custo bateria por energia	100 USD/kWh
$Pr_{sc,kwh}$	Custo supercapacitor por energia	2500 USD/kWh
$Pr_{b,usd}$	Preço unitário célula bateria	USD 12,80
$Pr_{sc,usd}$	Preço unitário supercapacitor	USD 9,75
$Pr_{e,kw}$	Custo eletrônica de potência	10 USD/kW
C_{usd}	Cotação média do dólar	5,30 BRL/USD
TMA_a	Taxa mínima de atratividade anual	10%

A cotação do dólar (C_{usd}) foi definida com base na série histórica dos últimos cinco anos (Investing.com, 2026), considerando os valores mínimo, médio e máximo de R\$ 4,58, R\$ 5,30 e R\$ 6,31 por dólar. Como os principais componentes do sistema são cotados em moeda estrangeira, essa variável exerce influência direta sobre o investimento inicial. Para o cenário base foi adotada a cotação média (R\$ 5,30/USD).

O custo da eletrônica de potência ($Pr_{e,kw}$) foi definido a partir das faixas reportadas em (DOMINGUES-OLAVARRÍA *et al.*, 2017), que apresentam modelos completos de custo para conversores estáticos. Considerou-se a faixa de 5, 10 e 20 USD/kW, adotando-se 10 USD/kW como valor representativo. Ressalta-se que a tendência histórica dessa tecnologia é de redução de custo ao longo do tempo, em função de ganhos de escala e maturidade industrial.

Para o custo das baterias ($Pr_{b,kwh}$), foram utilizados dados recentes de modelagem e projeções de custo para baterias de íons de lítio reportados em (ORANGI *et al.*, 2024; ROY *et al.*, 2023). Consideraram-se os valores de 50, 100 e 271 USD/kWh, representando, respectivamente, cenários otimista, intermediário e conservador. O valor de 100 USD/kWh foi adotado como caso base, por estar alinhado com estimativas contemporâneas para aplicações estacionárias e de mobilidade pesada em escala industrial.

Ressalta-se que esses valores correspondem ao custo a nível de célula (cell-level cost). Em uma implementação prática, o custo total do sistema de armazenamento (pack-level cost) incluiria componentes adicionais, tais como sistema de gerenciamento de baterias (BMS), estrutura mecânica, sistemas de interconexão elétrica, proteção e sistema de gerenciamento térmico. Esses subsistemas podem representar uma parcela significativa do custo total do pack.

Entretanto, a modelagem detalhada desses elementos demandaria premissas construtivas específicas e aumentaria substancialmente a complexidade do modelo econômico. Assim, por razões de simplificação e comparabilidade entre cenários, adotou-se exclusivamente o custo a nível de célula, assumindo implicitamente que os

demais custos são proporcionais à energia instalada e não alteram qualitativamente as conclusões da análise econômica.

O custo dos supercapacitores ($Pr_{sc,kwh}$) foi extraído de (SIRMANNE; KULARATNA; ARAWAWALA, 2023) e (ROY *et al.*, 2023), resultando na faixa de 1500, 2500 e 3500 USD/kWh. A diferença significativa em relação às baterias reflete a menor densidade energética dessa tecnologia. Para as análises principais, adotou-se 2500 USD/kWh como valor intermediário.

Adicionalmente, para fins de modelagem eletroquímica e restrições operacionais, foram consideradas taxas C de referência iguais a 2C, 6C e 10C, permitindo avaliar diferentes níveis de severidade operacional sobre os dispositivos de armazenamento.

A Taxa Mínima de Atratividade (TMA) anual foi fixada em 10%, valor compatível com investimentos industriais de médio risco no setor de mineração e energia. Esse parâmetro fundamenta o cálculo do Valor Presente Líquido (VPL), sendo posteriormente convertido para base mensal para desconto dos fluxos de caixa ao longo do horizonte de análise.

4.2.5 Parâmetros Operacionais

Por fim, a Tabela 4.9 apresenta os parâmetros associados ao regime de operação do caminhão, utilizados na estimativa do número mensal de ciclos e, consequentemente, do benefício energético.

Tabela 4.9 – Parâmetros operacionais.

Parâmetro	Descrição	Valor
T_d	Taxa de disponibilidade diária	0,8
H_{dia}	Horas de operação por dia	19,2 h

A disponibilidade diária de 80% resulta em 19,2 horas efetivas de operação por dia, sendo determinante para o cálculo do número mensal de ciclos e do fluxo de caixa associado à regeneração energética.

4.3 Resultados de Projeto e Simulações dos Sistemas de Armazenamento Ótimos para as Minas

Para o dimensionamento ótimo do banco de armazenamento híbrido para a Mina de Conceição do Mato Dentro, foi executado o algoritmo de simulação com foco na otimização do Valor Presente Líquido, considerando um horizonte de 60 meses (5 anos). A Tabela 4.10 apresenta a evolução do algoritmo de otimização para esse cenário, em que **n_gen** representa o número da geração, **n_evals** o número de avaliações realizadas, **cv_min** as violações mínimas de restrição, **cv_avg** as violações médias,

n_nds a quantidade de soluções de Pareto encontradas e **eps** a variação da solução ótima/fronreira de Pareto, isto é, o quanto o espaço de objetivos se desloca, sendo que valores mais distantes de zero indicam maior modificação. A coluna **indicator** informa se a solução encontrada representa valores ótimos (ideal) ou valores mais distantes (nadir).

É importante ressaltar que, apesar de estar sendo utilizado um método de otimização multi-objetivo, o problema resolvido neste trabalho é *single-objective*. Conforme já mencionado no trabalho, esse método foi escolhido visando, futuramente, incorporar outros critérios, como a redução da necessidade de troca dos elementos armazenadores devido a restrições na cadeia de fornecimento. O número de soluções não

Tabela 4.10 – Tabela evolutiva do algoritmo de otimização para o perfil da Mina de Conceição do Mato Dentro.

n_gen	n_evals	n_nds	cv_min	cv_avg	eps	indicator
1	20	1	0.0	0.0	0.0	f
2	40	1	0.0	0.0	$2,66 \cdot 10^5$	ideal
3	60	2	0.0	0.0	0.0	f
4	80	1	0.0	0.0	$1,29 \cdot 10^5$	ideal
5	100	1	0.0	0.0	$4,34 \cdot 10^5$	ideal
6	120	1	0.0	0.0	$1,99 \cdot 10^4$	ideal
7	140	1	0.0	0.0	$2,66 \cdot 10^5$	ideal
8	160	1	0.0	0.0	$3,46 \cdot 10^3$	ideal
9	180	1	0.0	0.0	$1,61 \cdot 10^5$	ideal
10	200	2	0.0	0.0	0.0	f
11	220	5	0.0	0.0	0.0	f
12	240	10	0.0	0.0	0.0	f
13	260	1	0.0	0.0	$8,10 \cdot 10^3$	ideal
14	280	1	0.0	0.0	0.0	f
15	300	3	0.0	0.0	0.0	f
16	320	8	0.0	0.0	0.0	f
17	340	19	0.0	0.0	0.0	f
18	360	20	0.0	0.0	0.0	f
19	380	20	0.0	0.0	0.0	f
20	400	20	0.0	0.0	0.0	f
21	420	20	0.0	0.0	0.0	f
22	440	20	0.0	0.0	0.0	f
23	460	1	0.0	0.0	$2,83 \cdot 10^3$	ideal
24	480	4	0.0	0.0	0.0	f
25	500	9	0.0	0.0	0.0	f
26	520	20	0.0	0.0	0.0	f
27	540	20	0.0	0.0	0.0	f
28	560	20	0.0	0.0	0.0	f
29	580	20	0.0	0.0	0.0	f
30	600	20	0.0	0.0	0.0	f

Fonte: Elaborado pelo autor.

dominadas de Pareto apresentado na Tabela 4.10 diz respeito a pequenas variações na potência de limiar que não alteram o resultado em si, uma vez que os dados de entrada são discretos e apresentam “saltos”. Em alguns casos, a variação do limiar ocorre entre dois pontos amostrados, não modificando a absorção/fornecimento ou a rejeição de potência.

Sendo assim, foi encontrada uma única solução ótima, exposta na Tabela 4.11. Para esse perfil de operação, foi obtido como ponto ótimo o número de 28 módulos de bateria, cada um contendo 16 células em série, e 4 *strings* de baterias em paralelo. Para o banco de supercapacitores, foram encontrados 14 módulos de supercapacitor com 16 supercapacitores em série, e 3 *strings* de supercapacitores em paralelo. A tensão de limiar ótima foi de 1600 kW, sendo o grande limitante para esse perfil o volume total disponível.

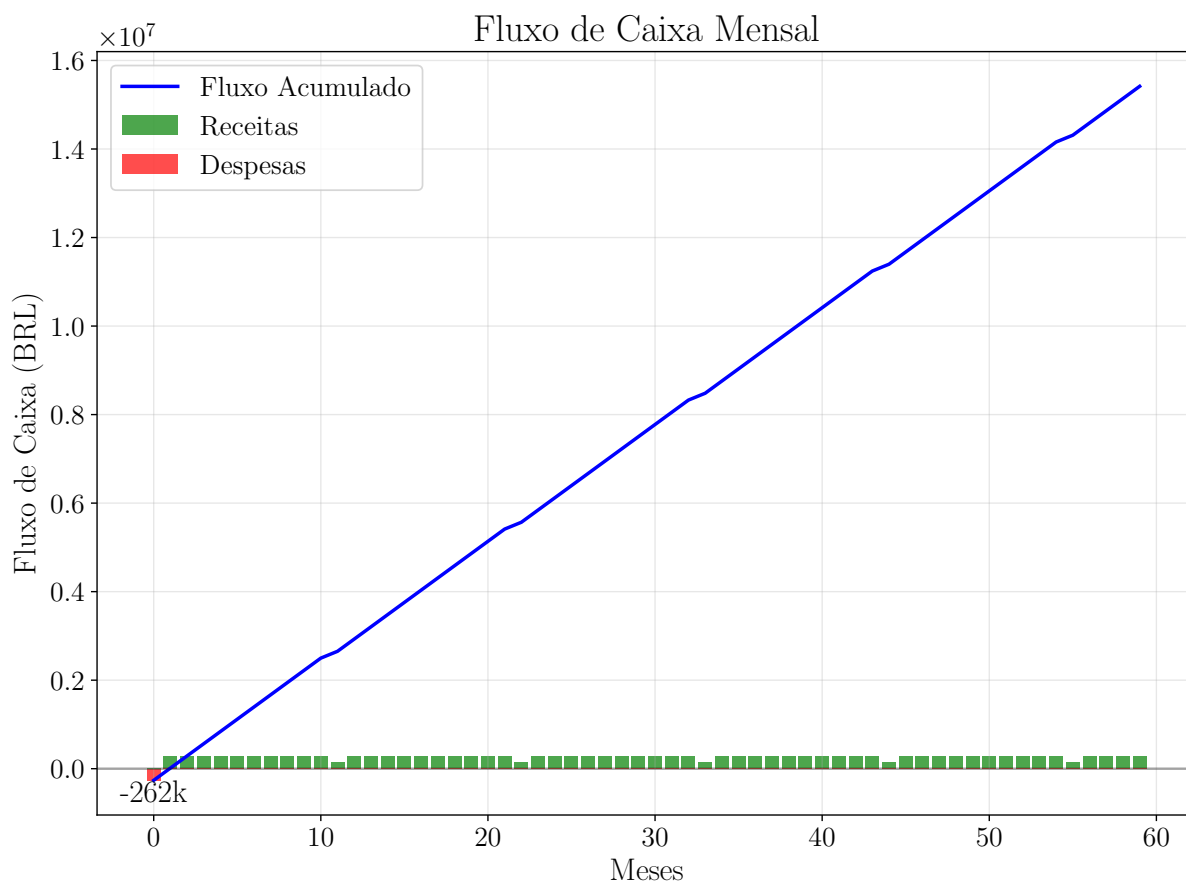
Vale lembrar, conforme explicitado na Seção 2.3, que o projeto é formado por *strings* compostas de $N_{s,b}$ baterias em série e $N_{m,b}$ módulos de bateria, sendo o número de baterias em paralelo o número de *strings* que devem ser paralelizadas. O mesmo vale para os supercapacitores. Para esse projeto, foi obtido um Valor Presente Líquido positivo de R\$ 12.217.613,51, mostrando que a implantação do HESS é muito vantajosa do ponto de vista financeiro.

Tabela 4.11 – Resultado ótimo obtido pelo algoritmo de otimização para a Mina de Conceição do Mato Dentro.

Resultado Ótimo para a Mina de Conceição do Mato Dentro			
Baterias em Serie	16	Supercapacitores em Serie	16
Baterias em Paralelo	4	Supercapacitores em Paralelo	3
Módulos de Baterias	28	Módulos de Supercapacitores	14
Tensão Nominal	1456 V	Tensão Nominal	672 V
Volume Total			1.401,34 L
Potência de Limiar			1600 kW
Valor Presente Líquido			R\$ 12.217.613,51

A Figura 4.4 apresenta o fluxo de caixa mensal para a implementação do sistema de armazenamento para a Mina de Conceição do Mato Dentro. O fluxo de caixa apresenta um gasto inicial de aproximadamente R\$ -262.000,00 decorrente da aquisição dos elementos armazenadores e da compra dos conversores eletrônico de potência. Nos meses subsequentes, devido à economia de diesel proporcionada pelo reaproveitamento da energia absorvida pela frenagem regenerativa, foi gerado um fluxo de caixa positivo de aproximadamente R\$ 276.000,00. Nos meses 11, 22, 33, 44 e 55, o fluxo de caixa foi de aproximadamente R\$ 15.000,00, decorrente da necessidade de troca das baterias devido ao fim do ciclo de vida. Devido à alta vida útil dos supercapacitores, para este exemplo, não foi necessária a realização da troca desses componentes ao longo do período analisado.

Figura 4.4 – Fluxo de caixa mensal para a Mina de Conceição do Mato Dentro



Fonte: Elaborado pelo autor.

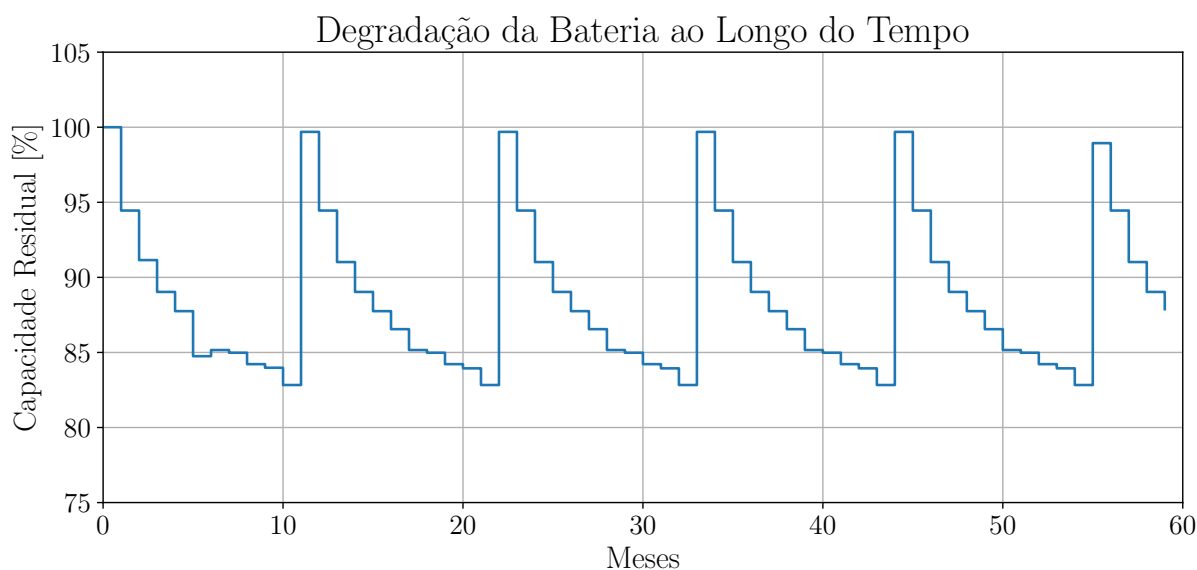
Na Figura 4.5 é apresentada a curva de degradação da bateria ao longo do tempo de operação, em meses. Na curva, é possível perceber degraus positivos nos meses 11, 22, 33, 44 e 55, momentos em que a bateria ultrapassou a vida útil de 5300 ciclos (considerando o conceito de *Full Equivalent Cycle* apresentado anteriormente na Seção 2.3) e precisou ser trocada. Dessa forma, para o perfil de potência apresentado pela operação em Conceição do Mato Dentro, o banco de baterias necessitaria ser substituído a cada 11 meses, aproximadamente.

Na Figura 4.6 é demonstrada a curva de degradação do banco de supercapacitores ao longo do tempo de operação, em meses. Essa curva evidencia uma das principais características dos supercapacitores: sua elevada vida útil. A partir dos resultados, observa-se que a vida útil dos supercapacitores, calculada em horas de operação, praticamente não se degradou, mantendo 99,32% da capacidade inicial.

Na Figura 4.7 são demonstrados os gráficos de potência, corrente e potência rejeitada para os elementos armazenadores.

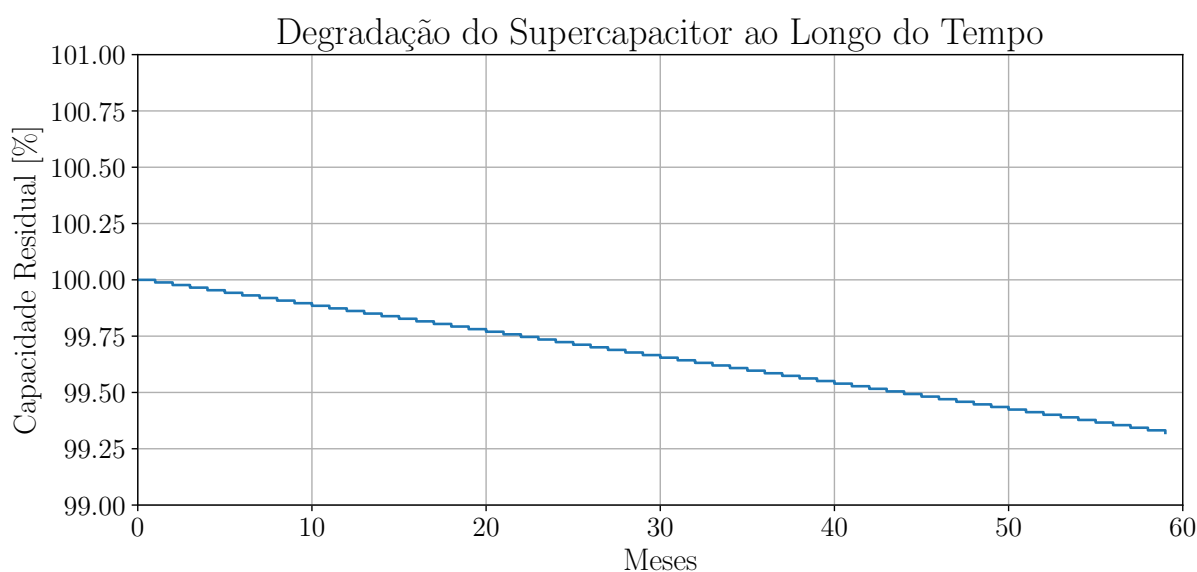
O gráfico de potência do banco de baterias demonstra que o sistema foi capaz de gerenciar, com boa eficiência, a demanda energética ao longo do ciclo. Observa-se que o banco conseguiu fornecer potência de forma praticamente integral durante a maior parte

Figura 4.5 – Curva de degradação da bateria para a simulação utilizando o perfil de Conceição do Mato Dentro.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.6 – Curva de degradação do banco de supercapacitor para a simulação utilizando o perfil de Conceição do Mato Dentro.



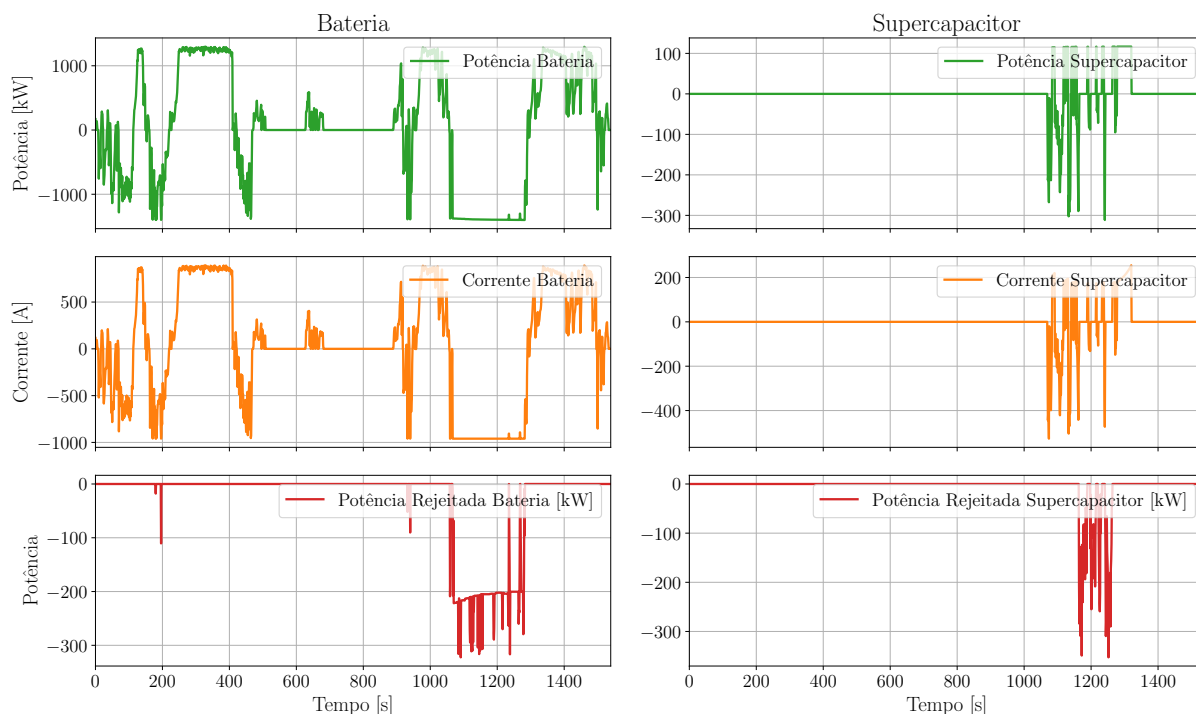
Fonte: Elaborado pelo autor.

da operação, evidenciando que a configuração adotada, composta por 28 módulos em série de 16 baterias e quatro strings em paralelo, foi adequada para atender às exigências dinâmicas do perfil de Conceição do Mato Dentro.

O gráfico de potência do banco de supercapacitores demonstra a utilização desse elemento em momentos específicos do trajeto, correspondentes aos intervalos de maior densidade de potência (entre $t = 1000\text{ s}$ e $t = 1400\text{ s}$), conforme pode ser verificado na Figura 4.7. Esse comportamento reflete exatamente o esperado para os supercapacitores, que atuam de forma mais eficiente em situações caracterizadas por picos de potência ou

por demandas que exigem elevada densidade de potência.

Figura 4.7 – Gráficos de potência, corrente e potência rejeitada para os elementos armazenadores considerando a operação na Mina de Conceição do Mato Dentro.



Fonte: Elaborado pelo autor.

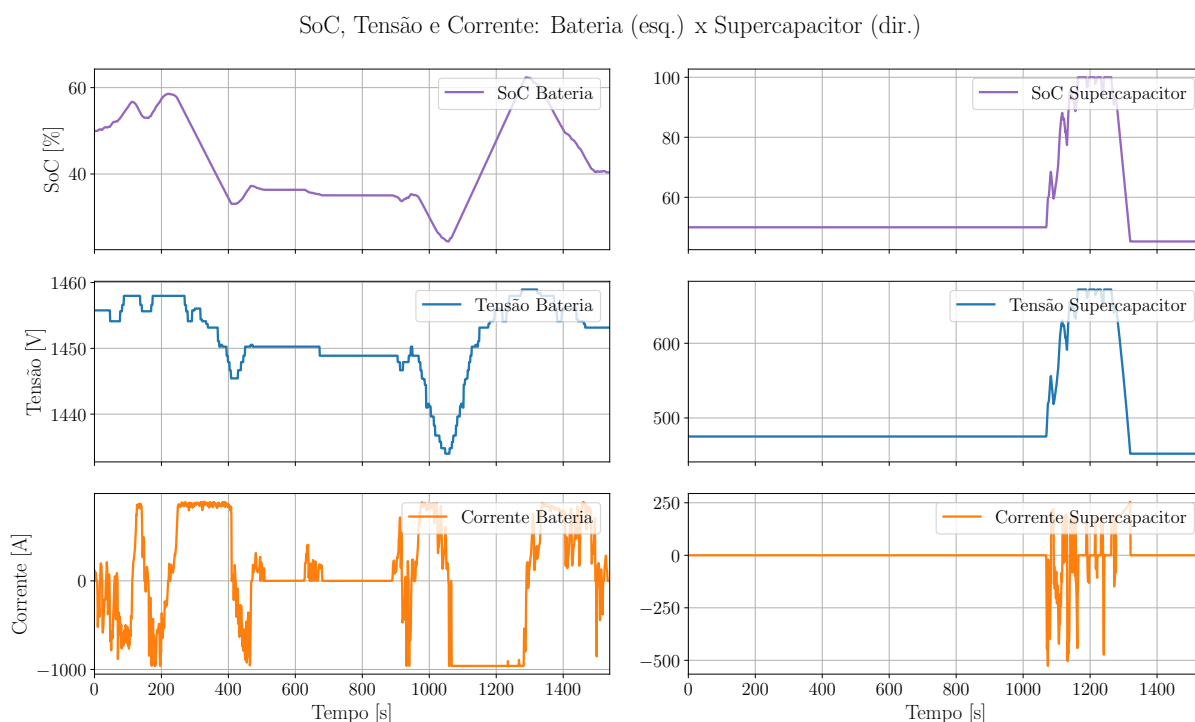
O gráfico de potência rejeitada demonstra que o sistema deixou de absorver potência em momentos entre $t = 1000\text{s}$ e $t = 1400\text{s}$ em ambos os sistemas de armazenamento. No banco de baterias, essa rejeição ocorreu devido à limitação de corrente igual a 960 A, valor definido pela capacidade de projeto de 6C e pela capacidade individual da bateria de 40 A h. Já a rejeição de potência no banco de supercapacitores está associada à sua capacidade de armazenamento, uma vez que o estado de carga desses componentes atingiu o valor máximo, conforme demonstrado na Figura 4.8.

Na Figura 4.8 são apresentadas as curvas de estado de carga, tensão e corrente para os elementos armazenadores de energia. O perfil de excursão do estado de carga demonstra que, para essa operação, é possível recuperar quase toda a energia gasta para tração. Durante toda a operação, o estado de carga do banco de baterias excursionou começando em 50%, atingiu um mínimo de 24,37% em $t = 1056\text{s}$ e um máximo de 62,40% em $t = 1290\text{s}$. Ao final do percurso, o banco de baterias terminou com estado de carga igual a 40,38%. A excursão de tensão do banco de baterias foi realizada por meio da curva de tensão por estado de carga demonstrada na Seção 2.3.

O perfil de excursão do sistema de armazenamento em supercapacitores apresenta um comportamento distinto daquele observado para as baterias, mantendo-se praticamente constante no início do ciclo e passando a absorver energia apenas nos momentos de maior densidade de potência. O banco inicia o ciclo com 50% de estado de

carga, sendo efetivamente acionado a partir de $t = 1070$ s. Nesse intervalo, o estado de carga atinge seu valor máximo em $t = 1164$ s, realizando breves descarregamentos para o banco de baterias. Em $t = 1263$ s, com a redução da demanda de potência, os supercapacitores passam a descarregar energia no banco de baterias, mantendo-o disponível para absorver ou fornecer potência conforme necessário. Ao final do período, o banco de supercapacitores converge para o valor de referência e encerra o percurso com um estado de carga de 46%.

Figura 4.8 – Gráficos de Estado de Carga, Tensão e corrente dos elementos armazenadores considerando a operação na Mina de Conceição do Mato Dentro.



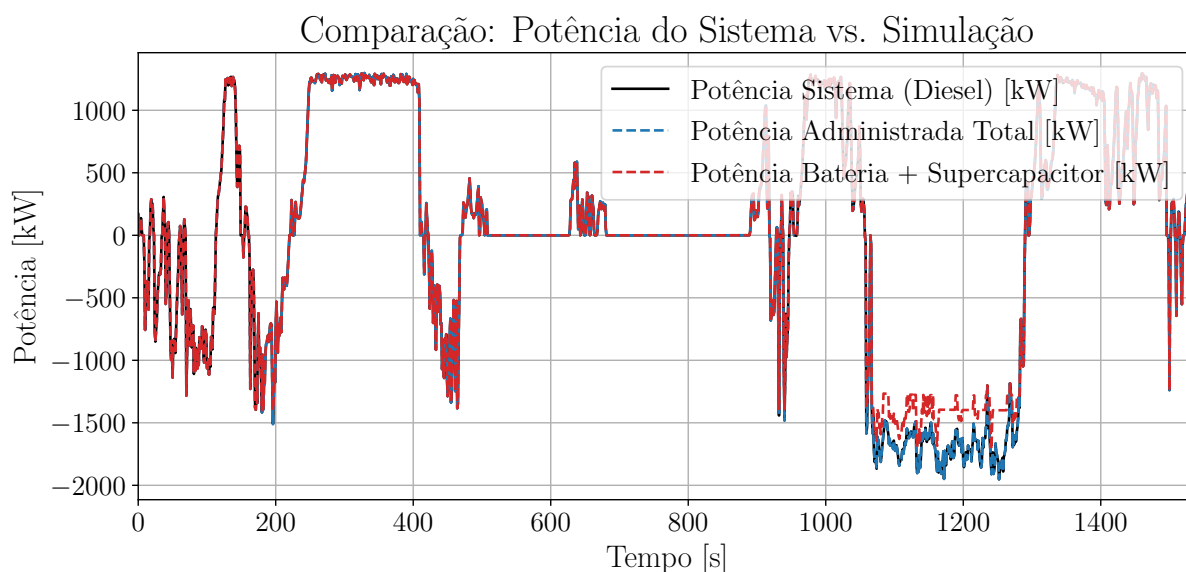
Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 4.9 é ilustrada uma comparação entre a curva de potência demandada pelo sistema (em preto), a potência administrada total, isto é, a soma da potência gerenciada pela bateria, pelo supercapacitor e a potência rejeitada, em azul; e a soma das potências efetivamente gerenciadas pelo sistema de armazenamento em baterias e supercapacitores, em vermelho. A partir dessas curvas, é perceptível que o sistema de armazenamento em baterias conseguiu suprir a demanda energética durante todo o ciclo de operação, além de absorver a maior parte das potências associadas à frenagem regenerativa, rejeitando potência apenas no período entre $t = 1000$ s e $t = 1400$ s.

Foi aplicada a mesma metodologia aos perfis das minas de Araxá e Riacho dos Machados, sendo os resultados completos apresentados no Apêndice A. Para a Mina de Araxá, o dimensionamento ótimo encontrado está demonstrado na Tabela 4.12.

Em comparação com a Mina de Conceição do Mato Dentro, o resultado obtido para Araxá demonstra um dimensionamento idêntico para o banco de baterias, reflexo da alta

Figura 4.9 – Comparação entre as potencia demandadas, administradas e absorvidas ou fornecidas pelo sistema de armazenamento para o perfil de Mina de Conceição do Mato Dentro.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 4.12 – Resultado ótimo obtido pelo algoritmo de otimização para a Mina de Araxá.

Resultado Ótimo para a Mina de Araxá			
Baterias em Serie	16	Supercapacitores em Serie	16
Baterias em Paralelo	4	Supercapacitores em Paralelo	1
Módulos de Baterias	28	Módulos de Supercapacitores	21
Tensão Nominal	1456 V	Tensão Nominal	1008 V
Volume Total			1.234,69 L
Potência de Limiar			1375 kW
Valor Presente Líquido			R\$ 7.006.170,73

demanda energética presente em ambos os perfis. Entretanto, observa-se uma redução no número de strings de supercapacitores, que passa de três para apenas uma. Ao comparar os valores apresentados na Tabela 4.1 e na Tabela 4.2, nota-se que a Mina de Conceição do Mato Dentro apresenta médias de potência consumida e dissipada superiores às do perfil de Araxá, indicando uma maior demanda por densidade de potência — fator que justifica a necessidade de um número maior de supercapacitores. Além disso, o fato de possuir uma média de energia dissipada mais elevada torna Conceição do Mato Dentro um cenário ainda mais favorável para a implementação do banco híbrido, pois o maior volume de energia potencialmente regenerável aumenta diretamente o VPL. Isso ocorre porque uma maior quantidade de energia recuperada implica maior economia de diesel, que é convertida em valor monetário no cálculo do VPL.

Para a Mina de Riacho dos Machados, o dimensionamento ótimo encontrado está apresentado na Tabela 4.13.

O resultado obtido para a Mina de Riacho dos Machados demonstra um número

Tabela 4.13 – Resultado ótimo obtido pelo algoritmo de otimização para a Mina de Riacho dos Machados.

Resultado Ótimo para a Mina de Riacho dos Machados			
Baterias em Serie	16	Supercapacitores em Serie	16
Baterias em Paralelo	5	Supercapacitores em Paralelo	1
Módulos de Baterias	27	Módulos de Supercapacitores	11
Tensão Nominal	1404 V	Tensão Nominal	528 V
Volume Total			1.374,66 L
Potência de Limiar			1525 kW
Valor Presente Líquido			R\$ 8.225.071,58

Fonte: Elaborado pelo autor.

maior de baterias, uma vez que houve a redução de um módulo para permitir a adição de uma string em paralelo (totalizando 2160 baterias para esse perfil, em comparação com 1792 nos demais). Ao comparar a média de potência consumida — 814,44 kW para esse perfil, contra 683,38 kW e 786,44 kW para as minas de Araxá e Conceição do Mato Dentro, respectivamente — observa-se que Riacho dos Machados apresenta a maior demanda energética. Dessa forma, para suprir essa densidade energética superior, foi necessária a adição de um número maior de baterias. Em consequência do aumento no volume ocupado pelo banco de baterias, tornou-se necessária a redução do número de supercapacitores devido às limitações volumétricas, considerando o volume total disponível de 1374,66 L. Assim, para esse perfil, foi dimensionado um banco de supercapacitores composto por 11 módulos em série e 1 string em paralelo.

4.4 Análise de Sensibilidade

Como forma de avaliar o comportamento do algoritmo de projeto frente à variação de parâmetros, algo plausível, dada a sensibilidade e a incerteza associadas aos valores adotados na seção anterior, será realizada uma análise de sensibilidade considerando diferentes cenários de variação paramétrica. Para isso, serão ajustados os seguintes parâmetros:

- Preço do diesel;
- Cotação do dólar;
- Preço eletrônica de potência;
- Preço da bateria;
- Preço do supercapacitor;
- C-rate da bateria;
- Valor mínimo de módulos de bateria;

- Valor mínimo de módulos de supercapacitores;

A Tabela 4.14 apresenta os valores que foram usados na análise de sensibilidade dos resultados frente à variação dos parâmetros supracitados. Os valores utilizados são baseados em alguns trabalhos da literatura já destacados na Seção 4.2.

Tabela 4.14 – Tabela demonstrativa dos valores avaliados na análise de sensibilidade.

Parametro	Diesel [R\$]	Dolar [USD/BRL]	Elepot. [USD/kW]	Bat. [USD/kWh]	SC [USD/kWh]	C-Rate	Min. $N_{m,b}$	Min. $N_{m,sc}$
Valor Inferior	3,69	4,58	5	50	1500	2	8	6
Valor Padrão	5,78	5,30	10	100	2500	6	15	11
Valor Superior	7,46	6,31	20	271	3500	10	22	18

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 4.15 está apresentado o resultado final do VPL considerando o banco de armazenamento ótimo obtido na Seção 4.3 para a Mina de Conceição do Mato Dentro, composto por $N_{m,b} = 28$, $N_{p,b} = 4$, $N_{m,SC} = 14$, $N_{p,sc} = 3$ e $P_{th} = 1600$ kW, variando de acordo com os parâmetros de sensibilidade definidos na Tabela 4.14. A primeira linha da tabela corresponde ao caso base, isto é, todos os parâmetros em seus valores de referência, enquanto as linhas subsequentes apresentam os resultados obtidos a partir da modificação individual de cada parâmetro avaliado. Em verde estão os parâmetros cujo valor absoluto foi aumentado em comparação com o caso base, e em vermelho aqueles cujo valor absoluto foi reduzido. Ao lado de cada valor, entre parênteses, encontra-se a porcentagem de variação em relação ao caso base. É importante destacar que nem todos os parâmetros influenciam o VPL de forma direta (isto é, nem sempre um aumento no valor absoluto do parâmetro implica aumento no VPL), havendo casos em que o efeito é inverso.

A análise de sensibilidade apresentada na Tabela 4.15 indica que os parâmetros com maior influência sobre o resultado econômico do sistema são o preço do diesel e a *c-rate* da bateria. O preço do diesel exerce papel preponderante na análise, uma vez que constitui o principal mecanismo de conversão da economia energética proporcionada pelo HESS em benefício financeiro. Dessa forma, variações nesse parâmetro afetam diretamente o valor econômico associado à energia recuperada durante os eventos de frenagem regenerativa.

Por outro lado, a *c-rate* da bateria impacta diretamente a capacidade do sistema em absorver potência durante os eventos de frenagem. Valores baixos desse parâmetro impõem limitações significativas à taxa máxima de carga da bateria, restringindo a quantidade de energia regenerativa que pode ser efetivamente armazenada. Como consequência, parte da energia disponível no processo de frenagem deixa de ser aproveitada, reduzindo o potencial de recuperação energética do HESS.

Observa-se, entretanto, que o aumento da *c-rate* para valores superiores ao caso base (10 em comparação a 6) produz impacto relativamente limitado no resultado final. Isso ocorre porque, com a tecnologia considerada no caso base (*c-rate* igual a 6), já é possível absorver praticamente toda a energia regenerativa disponível no perfil operacional

da mina. Esse resultado indica que o nível tecnológico atualmente considerado para o sistema de baterias já se mostra suficiente para capturar a maior parte do potencial de recuperação energética do ciclo analisado, proporcionando um desempenho econômico satisfatório para a implementação do HESS.

Tabela 4.15 – Análise de sensibilidade considerando alterações dos parâmetros para o dimensionamento base para a Mina de Conceição do Mato Dentro.

Cenário	Parâmetro Modificado	Alteração no Valor	VPL [R\$ milhões]	Sensibilidade
0	Caso base	-	12,22	-
1	Preço Diesel	3,69 (↓ 36,2%)	7,53 (↓ 38,3%)	1,058
2	Preço Diesel	7,46 (↑ 29,1%)	15,98 (↑ 30,8%)	1,058
3	Cotação Dólar	4,58 (↓ 13,6%)	12,32 (↑ 0,8%)	-0,058
4	Cotação Dólar	6,31 (↑ 19,1%)	12,08 (↓ 1,1%)	-0,057
5	Preço Razão Elepot	5,0 (↓ 50,0%)	12,27 (↑ 0,4%)	-0,008
6	Preço Razão Elepot	20,0 (↑ 100,0%)	12,11 (↓ 0,9%)	-0,009
7	Preço Bat	6,4 (↓ 50,0%)	12,51 (↑ 2,4%)	-0,048
8	Preço Bat	34,688 (↑ 171,0%)	11,20 (↓ 8,3%)	-0,048
9	Preço SC	5,85 (↓ 40,0%)	12,23 (↑ 0,1%)	-0,002
10	Preço SC	13,65 (↑ 40,0%)	12,20 (↓ 0,1%)	-0,002
11	C-rate	2,0 (↓ 66,7%)	5,09 (↓ 58,3%)	0,874
12	C-rate	10,0 (↑ 66,7%)	13,76 (↑ 12,6%)	0,188

Fonte: Elaborado pelo autor.

A fim de avaliar o impacto das variações paramétricas sobre o dimensionamento ótimo do sistema, o algoritmo de otimização foi novamente executado para cada novo conjunto de parâmetros analisado. Os resultados apresentados na Tabela 4.16 evidenciam que as variações nos parâmetros analisados impactam não apenas VPL, mas também o próprio dimensionamento ótimo do sistema híbrido de armazenamento de energia. Dessa forma, observa-se que alterações em variáveis econômicas e tecnológicas podem levar o algoritmo de otimização a selecionar diferentes combinações de baterias, supercapacitores e limiar de potência, refletindo o compromisso entre investimento inicial, capacidade de absorção de energia regenerativa e retorno econômico do sistema. No caso base, o algoritmo de otimização resultou em uma configuração composta por $N_{m,b} = 28$ módulos de bateria com $N_{p,b} = 4$ ramos em paralelo, associados a um banco de supercapacitores com $N_{m,sc} = 14$ módulos e $N_{p,sc} = 3$ ramos em paralelo. O limiar ótimo de potência obtido foi de $P_{th} = 1600$ kW, resultando em um VPL de aproximadamente R\$ 12,22 milhões.

Observa-se inicialmente que o preço do diesel é o parâmetro que produz maior impacto simultâneo no resultado econômico e na configuração do sistema. Quando o preço do diesel é reduzido para R\$ 3,69 (cenário 1), o VPL diminui para aproximadamente R\$ 8,45 milhões, representando uma redução de cerca de 30,8% em relação ao caso base. Nesse cenário, a solução ótima não possui supercapacitores em sua composição ($N_{p,sc} = 0$). Em contrapartida, quando o preço do diesel aumenta para R\$ 7,46 (cenário 2), o VPL cresce significativamente para R\$ 17,94 milhões, indicando que o benefício econômico do

HESS é fortemente dependente do valor do combustível economizado. Nota-se também uma tendência de aumento da participação da bateria no sistema, refletida no incremento de $N_{p,b}$ para 5.

A cotação do dólar também influencia o resultado econômico, porém de forma mais moderada. Nos cenários 3 e 4, apesar de ocorrerem variações relevantes no custo dos equipamentos importados, o impacto no VPL permanece relativamente limitado, variando entre aproximadamente R\$ 13,55 e R\$ 13,83 milhões. Isso ocorre porque o custo inicial do sistema representa apenas uma parcela do fluxo de caixa total, enquanto a economia de combustível ao longo da vida útil possui peso dominante na análise econômica.

Por outro lado, os custos da eletrônica de potência e dos supercapacitores apresentaram impacto relativamente reduzido na configuração ótima e no VPL. Mesmo para variações expressivas desses parâmetros (cenários 5, 6, 9 e 10), a arquitetura ótima permanece praticamente inalterada em relação ao caso base, com variações inferiores a 1% no VPL. Esse resultado indica que, para o perfil de potência analisado, o investimento nesses componentes representa parcela pequena do custo total do sistema, não sendo determinante para a viabilidade econômica da solução.

Em contraste, o preço das baterias apresenta influência mais perceptível na configuração ótima do sistema. No cenário de aumento significativo desse custo (cenário 8), observa-se uma reconfiguração parcial do HESS, com aumento do número de módulos de supercapacitores ($N_{m,sc} = 21$) e redução do número de ramos paralelos desse banco ($N_{p,sc} = 2$), evidenciando que o algoritmo busca compensar o encarecimento da bateria com maior utilização do armazenamento de alta potência proporcionado pelos supercapacitores. Ainda assim, o impacto no VPL permanece relativamente moderado, com redução de aproximadamente 8,3%.

A Taxa C da bateria mostrou-se um dos parâmetros técnicos mais relevantes para o desempenho do sistema. Quando a Taxa C é reduzida para 2 (cenário 11), a capacidade da bateria de absorver potência durante a frenagem é significativamente limitada, o que obriga o algoritmo a aumentar o número de módulos de supercapacitores ($N_{m,sc} = 16$) e reduzir o número de ramos paralelos desse banco ($N_{p,sc} = 1$). Como consequência, o VPL cai drasticamente para cerca de R\$ 6,00 milhões, uma redução de aproximadamente 50,9%. Por outro lado, o aumento da Taxa C para 10 (cenário 12) permite maior absorção de potência pela bateria, resultando em uma solução que elimina completamente os ramos de supercapacitores, elevando o VPL para cerca de R\$ 14,19 milhões.

Por fim, observa-se que as variações impostas nos limites mínimos de módulos de bateria e supercapacitores (cenários 13 a 16) não alteraram a solução ótima encontrada pelo algoritmo. Isso indica que as restrições consideradas não foram ativas na solução do problema, confirmando que o dimensionamento obtido no caso base já se encontra suficientemente afastado desses limites.

De maneira geral, os resultados demonstram que os parâmetros relacionados à economia de combustível (especialmente o preço do diesel) e às limitações técnicas de potência da bateria (Taxa C) são os fatores mais determinantes para o desempenho econômico do HESS. Em contrapartida, os custos de componentes específicos, como eletrônica de potência e supercapacitores, possuem impacto secundário na configuração ótima do sistema para o perfil de operação considerado.

Tabela 4.16 – Análise de sensibilidade para a Mina de Conceição do Mato Dentro considerando alterações dos parâmetros e executado novamente o algoritmo de otimização.

Cenário	Parâmetro Modificado	Alteração no Valor	$N_{m,b}$	$N_{p,b}$	$N_{m,sc}$	$N_{p,sc}$	Pth [kW]	VPL [R\$ milhões]
0	Caso base	-	28	4	14	3	1600	12,22
1	Preço Diesel	3.69 (↓ 36.2%)	28	5.0 (↑ 25.0%)	13.0 (↓ 7.1%)	0.0 (↓ 100.0%)	1500.0 (↓ 6.2%)	8.45 (↓ 30.8%)
2	Preço Diesel	7.46 (↑ 29.1%)	28	5.0 (↑ 25.0%)	14	0.0 (↓ 100.0%)	1275.0 (↓ 20.3%)	17.94 (↑ 46.9%)
3	Cotação Dolar	4.58 (↓ 13.6%)	28	5.0 (↑ 25.0%)	14	0.0 (↓ 100.0%)	1275.0 (↓ 20.3%)	13.83 (↑ 13.2%)
4	Cotação Dolar	6.31 (↑ 19.1%)	28	5.0 (↑ 25.0%)	13.0 (↓ 7.1%)	0.0 (↓ 100.0%)	1500.0 (↓ 6.2%)	13.55 (↑ 10.9%)
5	Preço Elepot	5.0 (↓ 50.0%)	28	4	14	3	1600	12,27 (↑ 0.4%)
6	Preço Elepot	20.0 (↑ 100.0%)	28	4	14	3	1600	12,11 (↓ 0.9%)
7	Preço Bat	6.4 (↓ 50.0%)	28	4	14	3	1600	12,51 (↑ 2.4%)
8	Preço Bat	34.688 (↑ 171.0%)	28	4	21.0 (↑ 50.0%)	2.0 (↓ 33.3%)	1600	11,20 (↓ 8.3%)
9	Preço SC	5.85 (↓ 40.0%)	28	4	14	3	1600	12,23 (↑ 0.1%)
10	Preço SC	13.65 (↑ 40.0%)	28	5.0 (↑ 25.0%)	13.0 (↓ 7.1%)	0.0 (↓ 100.0%)	1500.0 (↓ 6.2%)	13,71 (↑ 12.2%)
11	C-rate	2.0 (↓ 66.7%)	27.0 (↓ 3.6%)	5.0 (↑ 25.0%)	16.0 (↑ 14.3%)	1.0 (↓ 66.7%)	1600	6,00 (↓ 50.9%)
12	C-rate	10.0 (↑ 66.7%)	27.0 (↓ 3.6%)	4	20.0 (↑ 42.9%)	0.0 (↓ 100.0%)	1175.0 (↓ 26.6%)	14,19 (↑ 16.2%)
13	Nm_b min	8.0 (↓ 46.7%)	28	4	14	3	1600	12,22
14	Nm_b min	22.0 (↑ 46.7%)	28	4	14	3	1600	12,22
15	Nm_sc min	6.0 (↓ 45.5%)	28	4	14	3	1600	12,22
16	Nm_sc min	18.0 (↑ 63.6%)	28	4	14	3	1600	12,22

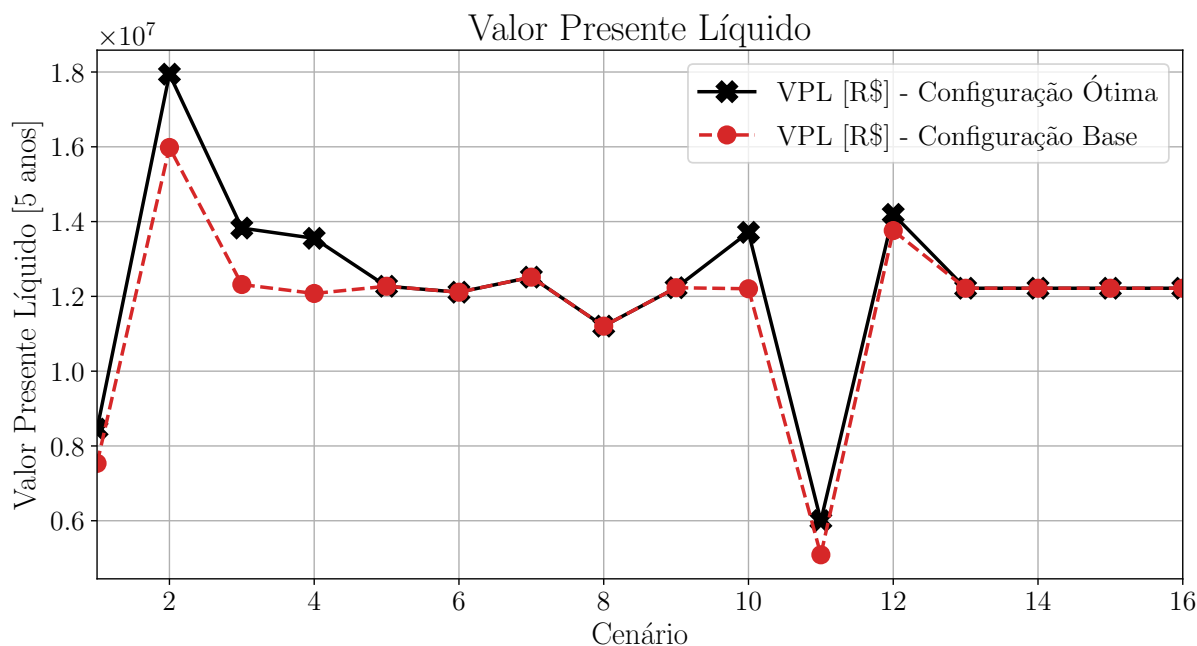
Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 4.16 mostra que, ao variar determinados parâmetros, ocorreram modificações no dimensionamento do banco de armazenamento em alguns cenários. Isso indica que o caso base deixa de ser a solução ótima quando submetido a essas alterações, evidenciando a sensibilidade do sistema às condições econômicas e tecnológicas avaliadas. Para comparar o desempenho do caso base com o novo dimensionamento ótimo obtido pelo algoritmo, foi elaborado o gráfico apresentado na Figura 4.10, no qual são analisados os valores de VPL para cada cenário considerando ambas as configurações.

Apesar de a configuração base não ser ideal para todos os cenários, em todos os casos o projeto e a implementação de um banco de armazenamento híbrido mostraram-se lucrativos, considerando uma Taxa Interna de Retorno de 10% ao ano. No melhor cenário, essa configuração proporcionaria um lucro de R\$ 17.942.054,37, enquanto no pior cenário ainda resultaria em um lucro de R\$ 6.002.769,07, ambos considerando a mesma taxa interna de retorno. É importante destacar que esses valores referem-se ao retorno obtido por um único caminhão, sendo possível replicar a solução em diversos veículos do mesmo modelo, ampliando significativamente o lucro total e reduzindo ainda mais a pegada de carbono da operação.

Foi aplicada a mesma metodologia aos perfis das minas de Araxá e Riacho dos Machados, sendo os resultados completos apresentados no Apêndice B. Para as Minas de Araxá e Riacho dos Machados, a análise de sensibilidade considerando alterações dos

Figura 4.10 – Comparação entre o VPL considerando a configuração ótima e a configuração base para a Mina de Conceição do Mato Dentro.



Fonte: Elaborado pelo autor.

parâmetros estão expostos nas Tabelas 4.17 e Tabela 4.18, respectivamente.

Os resultados obtidos para as Minas de Araxá e Riacho dos Machados apresentam comportamento qualitativamente semelhante ao observado para a Mina de Conceição do Mato Dentro. Em ambos os casos, os parâmetros que exercem maior influência sobre o Valor Presente Líquido são o preço do diesel e a taxa C das baterias, enquanto as variações nos custos da eletrônica de potência, do supercapacitor e na cotação do dólar produzem impactos relativamente modestos.

Tabela 4.17 – Análise de sensibilidade considerando alterações dos parâmetros para o dimensionamento base para a Mina de Araxá.

Cenário	Parâmetro Modificado	Alteração no Valor	VPL [R\$ milhões]	Sensibilidade
0	Caso base	-	7,01	-
1	Preço Diesel	3.69 (↓ 36.2%)	4,11 (↓ 41.4%)	1,143
2	Preço Diesel	7.46 (↑ 29.1%)	9,34 (↑ 33.2%)	1,140
3	Cotação Dólar	4.58 (↓ 13.6%)	7,14 (↑ 2.0%)	-0,147
4	Cotação Dólar	6.31 (↑ 19.1%)	6,81 (↓ 2.7%)	-0,142
5	Preço Razão Elepot	5.0 (↓ 50.0%)	7,06 (↑ 0.8%)	-0,016
6	Preço Razão Elepot	20.0 (↑ 100.0%)	6,90 (↓ 1.5%)	-0,015
7	Preço Bat	6.4 (↓ 50.0%)	7,45 (↑ 6.3%)	-0,126
8	Preço Bat	34.688 (↑ 171.0%)	5,49 (↓ 21.6%)	-0,126
9	Preço SC	5.85 (↓ 40.0%)	7,01 (↑ 0.1%)	-0,002
10	Preço SC	13.65 (↑ 40.0%)	7,00 (↓ 0.1%)	-0,002
11	C-rate	2.0 (↓ 66.7%)	2,58 (↓ 63.2%)	0,947
12	C-rate	10.0 (↑ 66.7%)	7,06 (↑ 0.7%)	0,010

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 4.18 – Análise de sensibilidade considerando alterações dos parâmetros para o dimensionamento base para a Mina de Riacho dos Machados.

Cenário	Parâmetro Modificado	Alteração no Valor	VPL [R\$ milhões]	Sensibilidade
0	Caso base	-	8,23	-
1	Preço Diesel	3.69 (↓ 36.2%)	5,03 (↓ 38.8%)	1,071
2	Preço Diesel	7.46 (↑ 29.1%)	10,79 (↑ 31.2%)	1,072
3	Cotação Dólar	4.58 (↓ 13.6%)	8,31 (↑ 1.0%)	-0,073
4	Cotação Dólar	6.31 (↑ 19.1%)	8,11 (↓ 1.4%)	-0,073
5	Preço Razão Elepot	5.0 (↓ 50.0%)	8,28 (↑ 0.6%)	-0,012
6	Preço Razão Elepot	20.0 (↑ 100.0%)	8,12 (↓ 1.3%)	-0,013
7	Preço Bat	6.4 (↓ 50.0%)	8,47 (↑ 3.0%)	-0,060
8	Preço Bat	34.688 (↑ 171.0%)	7,38 (↓ 10.3%)	-0,060
9	Preço SC	5.85 (↓ 40.0%)	8,23 (↑ 0.0%)	0
10	Preço SC	13.65 (↑ 40.0%)	8,22 (↓ 0.0%)	0
11	C-rate	2.0 (↓ 66.7%)	3,76 (↓ 54.2%)	0,812
12	C-rate	10.0 (↑ 66.7%)	8,28 (↑ 0.7%)	0,010

Fonte: Elaborado pelo autor.

Pelos resultados obtidos, observa-se que, para as aplicações de mineração analisadas, há uma predominância do uso de baterias no banco híbrido de armazenamento de energia, com participação relativamente menor de supercapacitores. Esse comportamento está diretamente associado às características das baterias de fosfato de ferro-lítio (LFP), que apresentam valores de C-rate relativamente elevados quando comparados a outras tecnologias de armazenamento. Essa característica permite que as baterias absorvam não apenas a energia média associada aos ciclos de frenagem regenerativa, mas também parte relevante dos picos de potência presentes no perfil de operação dos caminhões fora de estrada. Como consequência, o processo de otimização tende a privilegiar o uso de baterias como principal elemento de armazenamento energético.

Ainda assim, em determinados cenários operacionais, especialmente aqueles caracterizados por transientes de potência mais abruptos, a utilização de supercapacitores mostra-se relevante para complementar o desempenho do sistema. Nesses casos, os supercapacitores atuam principalmente como elementos de suporte dinâmico, absorvendo os picos instantâneos de potência que poderiam exceder os limites operacionais das baterias. Dessa forma, mesmo apresentando menor participação no armazenamento total de energia, os supercapacitores contribuem para aumentar a fração de energia regenerável efetivamente capturada pelo sistema.

4.5 Análise Consolidada

Os resultados apresentados na Seção 4.1 demonstram que o uso de um banco híbrido de armazenamento de energia é economicamente viável para os perfis de operação analisados, considerando os parâmetros adotados como base. Essa conclusão é reforçada pela análise de sensibilidade apresentada na Seção 4.4, que evidencia a

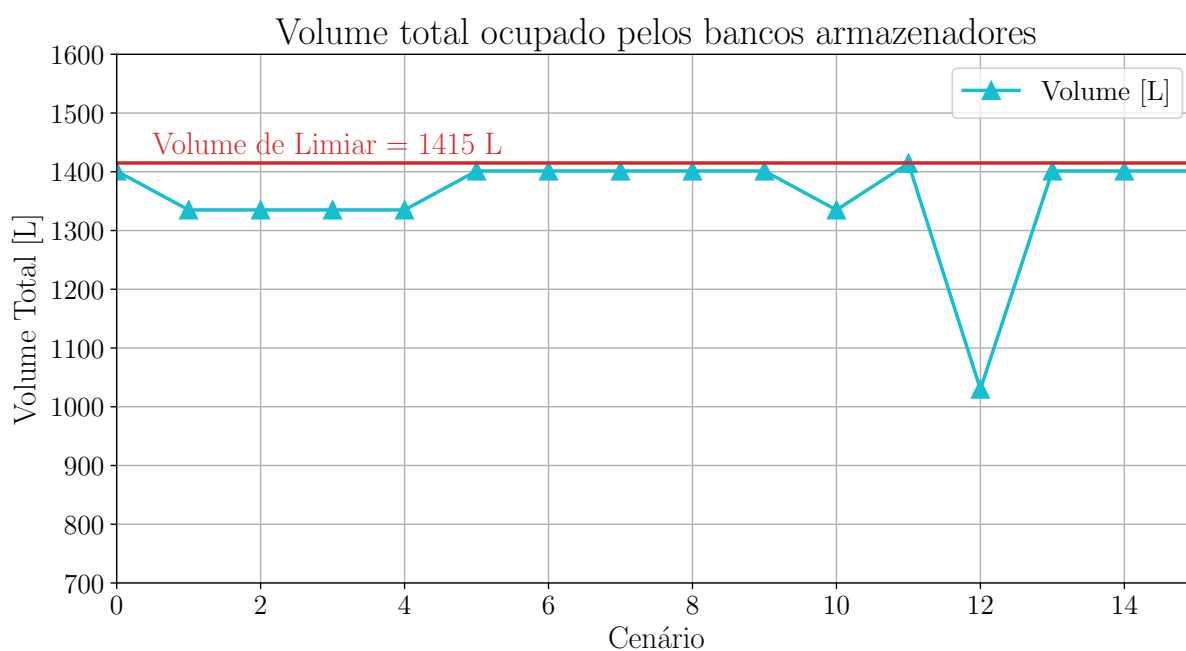
robustez da solução frente a variações relevantes nos principais parâmetros econômicos e tecnológicos do modelo.

A análise das tabelas de sensibilidade mostra um comportamento consistente entre as diferentes minas avaliadas. Em todos os casos, o parâmetro de maior influência sobre o Valor Presente Líquido (VPL) é o preço do diesel, seguido pelo C-rate das baterias. Esse resultado é coerente com a natureza do problema, uma vez que o preço do diesel impacta diretamente o benefício econômico associado à regeneração energética: quanto maior o custo do combustível, maior o valor econômico da energia recuperada durante os eventos de frenagem. De forma semelhante, o C-rate das baterias influencia a capacidade do sistema de absorver potência durante esses eventos, determinando a fração da energia regenerável que pode ser efetivamente armazenada.

A Figura 4.11 ilustra o volume total ocupado pelo banco híbrido para a Mina de Conceição do Mato Dentro. Observa-se que o dimensionamento ótimo opera muito próximo do limite volumétrico disponível no veículo, indicando que o algoritmo de otimização tende a utilizar a maior quantidade possível de elementos armazenadores para maximizar a energia recuperada. Esse comportamento está associado ao elevado retorno econômico proporcionado pela regeneração energética, no qual a economia acumulada de diesel ao longo da operação supera significativamente os custos iniciais associados à aquisição dos sistemas de armazenamento, da eletrônica de potência e da manutenção do sistema.

Nesse contexto, o papel dos supercapacitores torna-se complementar ao das

Figura 4.11 – Volume total dos bancos ótimo de elementos armazenadores para cada variação paramétrica.



Fonte: Elaborado pelo autor.

baterias dentro da arquitetura híbrida. Enquanto as baterias são responsáveis por armazenar a maior parte da energia regenerada devido à sua maior densidade energética, os supercapacitores contribuem principalmente para ampliar a capacidade de potência do sistema. Dessa forma, eles permitem que picos transitórios de potência sejam absorvidos sem ultrapassar os limites operacionais das baterias, reduzindo a necessidade de dissipação de energia nas resistências de frenagem. Consequentemente, perfis de operação caracterizados por frenagens mais intensas ou transientes de potência mais pronunciados tendem a aumentar a participação relativa dos supercapacitores no sistema híbrido, enquanto perfis mais suaves favorecem soluções predominantemente baseadas em baterias.

Para validar a interpretação apresentada anteriormente, o perfil sintético utilizado na etapa de validação da simulação (Subseção 3.3.2) foi submetido ao algoritmo de otimização. Esse perfil representa um cenário hipotético composto por patamares de potência nos quais o banco de baterias é capaz de absorver ou fornecer integralmente a potência requerida, intercalados com picos aleatórios de grande amplitude, nos quais a atuação dos supercapacitores se torna necessária. O dimensionamento ótimo obtido para esse perfil é apresentado na Tabela 4.19. É importante ressaltar que o valor presente líquido associado a esse cenário possui caráter exclusivamente teórico, servindo apenas para demonstrar que, mesmo em um perfil sintético, a implementação do banco híbrido apresenta forte atratividade econômica.

Tabela 4.19 – Resultado ótimo obtido pelo algoritmo de otimização para o perfil sintético.

Resultado Ótimo para o perfil sintético			
Baterias em Serie	16	Supercapacitores em Serie	16
Baterias em Paralelo	4	Supercapacitores em Paralelo	3
Módulos de Baterias	28	Módulos de Supercapacitores	14
Tensão Nominal	1456 V	Tensão Nominal	672 V
Volume Total			1.401,34 L
Potência de Limiar			1600 kW
Valor Presente Líquido*			R\$ 9.751.224,62

Para esse perfil, que apresenta picos de energia de grande amplitude, o dimensionamento ótimo resultou em $N_{m,b} = 28$, $N_{p,b} = 4$, $N_{m,sc} = 14$ e $N_{p,sc} = 3$, indicando uma maior participação dos supercapacitores em comparação aos demais casos discutidos nesta seção. Os resultados obtidos para o perfil sintético reforçam que as características do perfil exercem influência direta no dimensionamento do sistema híbrido e corroboram a análise desenvolvida ao longo desta discussão.

5 Conclusões e Propostas de Trabalhos Futuros

5.1 Conclusões

Este trabalho investigou a viabilidade técnica e econômica da aplicação de sistemas híbridos de armazenamento de energia (HESS) em caminhões fora de estrada utilizados em operações de mineração, com foco no aproveitamento da energia regenerativa durante eventos de frenagem. Para isso, foi desenvolvido um modelo integrado capaz de representar o fluxo energético do veículo ao longo de perfis reais de operação, permitindo avaliar o potencial de recuperação da energia atualmente dissipada nas grades de frenagem.

A partir dessa modelagem, foi proposta uma arquitetura de controle hierárquico para o sistema híbrido de armazenamento de energia, estruturada em diferentes níveis funcionais responsáveis pela gestão energética do sistema, pela distribuição de potência entre os elementos armazenadores e pelo controle local das variáveis elétricas. Essa abordagem permite separar decisões estratégicas de gerenciamento energético das ações de controle de baixo nível, contribuindo para maior robustez e modularidade da solução proposta.

Com base nesse arcabouço, foi formulado um problema de otimização destinado ao dimensionamento do HESS, incluindo a determinação do número de módulos de bateria e supercapacitores, bem como do limiar de potência responsável pela divisão dinâmica da potência entre os elementos armazenadores. A solução desse problema foi obtida por meio de um algoritmo de otimização baseado em algoritmos genéticos, adequado para lidar com a natureza não linear da função objetivo e com as diversas restrições físicas do sistema.

Os resultados obtidos demonstraram que a aplicação de sistemas de armazenamento de energia em caminhões de mineração apresenta elevada atratividade econômica nas condições analisadas. Em todos os cenários avaliados, os valores de Valor Presente Líquido (VPL) foram significativamente positivos, refletindo a elevada geração de caixa associada à economia de combustível proporcionada pela recuperação de energia durante os eventos de frenagem. Esse resultado evidencia que uma parcela significativa da energia atualmente dissipada pode ser convertida em benefício econômico quando sistemas de armazenamento adequadamente dimensionados são empregados.

A análise de sensibilidade realizada ao longo do trabalho mostrou que o problema apresenta baixa sensibilidade a parâmetros diretamente associados ao investimento inicial, como os custos de aquisição de baterias, supercapacitores e conversores eletrônicos. Por outro lado, parâmetros que impactam diretamente o fluxo de caixa operacional, como o preço do diesel e o *C-rate* das baterias, apresentaram influência significativamente maior sobre o resultado econômico. O preço do diesel afeta diretamente o valor monetário da

energia regenerada, enquanto o *C-rate* determina a capacidade do sistema em absorver potência durante os eventos de frenagem, influenciando a fração de energia efetivamente recuperada.

Outro resultado importante observado nas simulações é que, para a maior parte dos cenários analisados, o algoritmo de otimização tende a selecionar configurações do HESS que utilizam praticamente todo o volume disponível no veículo para a instalação dos elementos armazenadores. Esse comportamento está diretamente relacionado ao elevado retorno econômico associado à recuperação de energia, que torna vantajosa a maximização da capacidade de armazenamento dentro das limitações físicas do caminhão.

No que se refere à composição do sistema híbrido, observou-se uma predominância do uso de baterias em relação aos supercapacitores. Esse comportamento está associado tanto às características das baterias modernas de química LFP, que apresentam valores relativamente elevados de *C-rate*, quanto às próprias características dos perfis operacionais das minas avaliadas. De modo geral, os ciclos de operação analisados são marcados por períodos relativamente longos de potência elevada durante os trechos de descida, nos quais ocorre a regeneração de energia de forma sustentada ao longo de vários segundos ou até minutos, ao invés de eventos extremamente rápidos e impulsivos de potência. Nesse contexto, dispositivos com maior densidade energética, como as baterias, tornam-se mais adequados para absorver a maior parte da energia regenerada. Ainda assim, os supercapacitores desempenham um papel complementar importante, principalmente na absorção de picos transitórios de potência durante eventos de frenagem mais abruptos ou em situações em que a potência regenerada excede momentaneamente a capacidade de absorção do banco de baterias.

De forma geral, os resultados obtidos reforçam o potencial da utilização de sistemas de armazenamento de energia em aplicações de mineração, evidenciando que o dimensionamento adequado do sistema, considerando as características específicas de cada mina e de cada perfil operacional, é fundamental para maximizar os benefícios técnicos e econômicos da solução.

5.2 Principais Contribuições

As principais contribuições deste trabalho podem ser sintetizadas nos seguintes pontos:

- Desenvolvimento de um modelo integrado para avaliação do potencial de recuperação de energia em caminhões fora de estrada utilizados em operações de mineração, baseado em perfis reais de operação.
- Proposição de uma arquitetura hierárquica de controle para sistemas híbridos de

armazenamento de energia aplicados a veículos de mineração, estruturada de forma a separar as camadas de gerenciamento energético, alocação de potência e controle local.

- Formulação de um problema de otimização para o dimensionamento do sistema híbrido de armazenamento de energia, considerando simultaneamente restrições energéticas, de potência e de volume disponíveis no veículo.
- Aplicação de um algoritmo de otimização baseado em algoritmos genéticos para determinação da configuração ótima do HESS, incluindo número de módulos de bateria, número de supercapacitores e limiar de divisão de potência.
- Avaliação econômica da solução proposta por meio do cálculo do Valor Presente Líquido (VPL), permitindo quantificar os benefícios financeiros associados à recuperação de energia.
- Realização de uma análise de sensibilidade abrangente, permitindo identificar os parâmetros de maior impacto sobre a viabilidade econômica do sistema.

5.3 Trabalhos Futuros

Embora os resultados obtidos demonstrem a viabilidade e o potencial da solução proposta, diversas oportunidades de aprofundamento e extensão deste trabalho podem ser exploradas em pesquisas futuras. Entre as principais direções possíveis, destacam-se:

- Aumentar a fidelidade dos modelos utilizados, incorporando modelos mais detalhados de degradação dos componentes armazenadores, especialmente das baterias, de modo a representar com maior precisão os efeitos do envelhecimento ao longo do horizonte de planejamento.
- Realizar estudos comparativos entre sistemas híbridos e sistemas compostos exclusivamente por baterias, avaliando em quais condições a inclusão de supercapacitores traz benefícios técnicos ou econômicos relevantes.
- Investigar estratégias alternativas para o controle terciário do sistema de armazenamento, considerando objetivos distintos da simples maximização da energia regenerada. Em particular, podem ser avaliadas abordagens orientadas à maximização da vida útil das baterias, à redução da degradação eletroquímica ou à otimização multiobjetivo entre desempenho energético e envelhecimento dos componentes, substituindo ou complementando a estratégia baseada em limiar de potência adotada neste trabalho.

- Investigar a aplicação de técnicas de otimização multiobjetivo no dimensionamento do HESS, considerando simultaneamente critérios econômicos e ambientais, como a maximização do VPL e a minimização das emissões de carbono associadas ao consumo de diesel. Essa abordagem permitiria avaliar os compromissos entre desempenho econômico, sustentabilidade e dimensionamento do sistema, por meio da obtenção de fronteiras de Pareto.
- Incluir na análise econômica o valor residual do sistema de armazenamento ao final do horizonte de planejamento, considerando a possibilidade de reutilização dos componentes ou sua aplicação em outras funções.
- Realizar análises paramétricas para identificar os valores críticos de parâmetros econômicos e tecnológicos, como preço do diesel, custo dos componentes e características das baterias, que levam o sistema à condição de *break-even*, permitindo estimar a margem de segurança associada ao investimento.
- Investigar com maior profundidade o projeto dos conversores eletrônicos de potência utilizados na interface entre o HESS e o sistema elétrico do veículo.
- Desenvolver e avaliar estratégias de controle primário para os elementos armazenadores, visando melhorar a eficiência energética, a estabilidade do sistema e a robustez da solução em condições reais de operação.

REFERÊNCIAS

- AKATSU, B. *et al.* Comparative analyses of li-ion battery models based degradation mechanism. In: . [S.l.: s.n.], 2025.
- BARELLI, L. *et al.* Dynamic analysis of a hybrid energy storage system (h-ess) coupled to a photovoltaic (pv) plant. **Energies**, v. 11, n. 2, 2018. ISSN 1996-1073. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/11/2/396>.
- BAZARAA, M. S.; JARVIS, J. J.; SHERALI, H. D. **Linear programming and network flows**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011.
- BAZARAA, M. S.; SHERALI, H. D.; SHETTY, C. M. **Nonlinear programming: theory and algorithms**. [S.l.]: John wiley & sons, 2006.
- BURKART, R.; KOLAR, J. W. Component cost models for multi-objective optimizations of switched-mode power converters. In: **2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition**. [S.l.: s.n.], 2013. p. 2139–2146.
- Caterpillar Inc. **794 AC Large Mining Truck**. 2016. Disponível em: <https://s7d2.scene7.com/is/content/Caterpillar/C10861635>. Acesso: 16/03/2025.
- Caterpillar Inc. **Caterpillar demonstra com sucesso o primeiro grande caminhão elétrico de mineração a bateria e investe em campo de testes sustentável**. 2022. Comunicado à imprensa. Disponível em: <https://www.caterpillar.com/pt/news/corporate-press-releases/h/caterpillar-succesfully-demonstrates-first-battery-electric-large-mining-truck.html>.
- CHO, J. Dependence of alpo4 coating thickness on overcharge behaviour of licoo2 cathode material at 1 and 2 c rates. **Journal of Power Sources**, v. 126, n. 1, p. 186–189, 2004. ISSN 0378-7753. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775303009285>.
- CUMMINS INC. **Engine Data Sheet & Performance Curve**. [S.l.], 2003. Rev. 13-Jan-2003.
- Cummins Inc. **K50–K2000E Engines**. 2026. <https://www.cummins.com/pt-br/engines/products/k50-k2000e>. Acesso em: jan. 2026.
- DEB, K. **Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2001.
- DEB, K. *et al.* A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: Nsga-ii. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, v. 6, n. 2, p. 182–197, 2002.
- DOMINGUES-OLAVARRÍA, G. *et al.* From chip to converter: A complete cost model for power electronics converters. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 32, n. 11, p. 8681–8692, 2017.
- DuBois Mining. **PC2175 Grid Box for Komatsu 930E-4**. 2026. <https://duboismining.com/product/pc2175-grid-box-for-komatsu-930e-4/>. Acesso em: jan. 2026.

Eco Power Group. **C7-LFP40W/N-6C**. 2025. Disponível em: <http://www.ecopowerpack.com/show.asp?id=176>. Acessado em: 16 de março de 2025.

FIA. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável [ODS]: o que são e importância**. 2020. <https://fia.com.br/blog/ods/>. Acesso: 25/02/2025.

Gambrenk Mining Engineering. **Haulpak 730E**. 2010. <https://gambrenk-miningengineering.blogspot.com/2010/09/haulpack-730e.html>. Acesso em: jan. 2026.

HARTENSTINE, N. **Electrical DC Trucks – Drivetrain**. 2003. Technical Presentation, Product Support, Komatsu Latin America. Apresentação técnica interna de treinamento, novembro de 2003.

HOLLAND, J. H. Genetic algorithms and adaptation. In: **Adaptive control of ill-defined systems**. [S.l.]: Springer, 1984. p. 317–333.

HOUACHE, M. S. E. *et al.* On the current and future outlook of battery chemistries for electric vehicles—mini review. **Batteries**, MDPI, v. 8, n. 7, p. 70, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2313-0105/8/7/70>.

IBRAM. **Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estufa do Setor Mineral – Ano-base 2022**. Brasília, 2024. Relatório técnico. Disponível em: <https://ibram.org.br/>.

IEA. **The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions**. Paris, 2021. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>.

Investing.com. **USD/BRL Historical Data**. 2026. Acesso em: 13 de fevereiro 2026. Disponível em: <https://br.investing.com/currencies/usd-brl-historical-data>.

IRO, Z. S.; SUBRAMANI, C.; DASH, S. A brief review on electrode materials for supercapacitor. **International Journal of Electrochemical Science**, v. 11, n. 12, p. 10628–10643, 2016. ISSN 1452-3981. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1452398123179211>.

KARTHIKEYAN, S. *et al.* Supercapacitor: Evolution and review. **Materials Today: Proceedings**, v. 46, p. 3984–3988, 2021. ISSN 2214-7853. International Conference on Materials, Manufacturing and Mechanical Engineering for Sustainable Developments-2020 (ICMSD 2020). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785321016679>.

KOMATSU. **Komatsu 730E Electric Drive Truck**. Vernon Hills, IL, USA, 2001. Disponível em: <https://www.komatsu.com.br/uploads/produtos/catalogo/3bf6ec73af.pdf>.

Komatsu Cummins Chile Ltda. **Estructura y Función - 830 DC - Sistema Eléctrico**. 2006. Presentacion Técnica, Departamento de Entrenamiento. Apresentação técnica interna de treinamento, outubro de 2006.

KOMATSU LTD. **Shop Manual – Komatsu 730E Off-Highway Truck**. [S.l.], 2000. Service and Maintenance Manual.

KUPAROWITZ, T. *et al.* Supercapacitor degradation and reliability. In: **Brno University of Technology CEITEC, EPCI e-Symposium**. [S.l.: s.n.], 2017.

LEE, K. Y.; EL-SHARKAWI, M. A. **Modern heuristic optimization techniques: theory and applications to power systems**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2008.

LIMA, T. D. S. de. Integração de supercapacitores ao sistema de armazenamento em baterias de um caminhão híbrido de mineração. In: **Simpósio Brasileiro de Sistemas Eletrônicos (SBSE)**. São João del Rey, Brasil: [s.n.], 2025.

LIU, W.; PLACKE, T.; CHAU, K. Overview of batteries and battery management for electric vehicles. **Energy Reports**, v. 8, p. 4058–4084, 2022. ISSN 2352-4847. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484722005716>.

Maxwell Technologies. **3.0V 3000F ULTRACAPACITOR CELL BCAP3000 P300 K04/05**. 2025. Disponível em: https://maxwell.com/wp-content/uploads/2022/11/3003483-EN.0_DS_3V-3000F-Cell-BCAP3000-P300.pdf. Acessado em: 16 de março de 2025.

MORAES, C. **DISSERTACAO - Análise e Concepção de um Sistema Híbrido de Armazenamento de Energia para Aplicação em Locomotivas Diesel-Elétricas**. 03 2020. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 03 2020.

Mott Equipment. **Komatsu 730E Truck (Unit 209)**. 2026. <http://www.motterequipment.com/equipment/type/truck/komatsu-730e-truck-%28unit-209%29>. Acesso em: jan. 2026.

OE. **Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG) – Relatório Anual**. [S.l.], 2025. Disponível em: <https://seeg.eco.br/>.

ORANGI, S. *et al.* Historical and prospective lithium-ion battery cost trajectories from a bottom-up production modeling perspective. **Journal of Energy Storage**, v. 76, p. 109800, 2024.

PESARAN, A. A. Lithium-ion battery technologies for electric vehicles: Progress and challenges. **IEEE Electrification Magazine**, v. 11, n. 2, p. 35–43, 2023.

PETRÓLEO, G. N. e. B. Agência Nacional do. **Série Histórica do Levantamento de Preços**. 2026. <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/precos-e-defesa-da-concorrenca/precos/precos-revenda-e-de-distribuicao-combustiveis/serie-historica-do-levantamento-de-precos>. Acesso em: 13 fev. 2026.

Poder360. **Mineração emitiu 13 milhões de toneladas de CO2 em 2022**. 2024. Publicado em 2 de junho de 2024. Dados do Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM). Disponível em: <https://www.poder360.com.br/poder-sustentavel/mineracao-emitiu-13-milhoes-de-toneladas-de-co2-em-2022/>.

ROY, P. *et al.* Cost investigation of battery-supercapacitor hybrid energy storage system for grid-connected hourly dispatching wave energy converter power. **Journal of Energy Storage**, Elsevier, v. 72, p. 108347, 2023.

SIRMANNE, D. C. U.; KULARATNA, N.; ARAWWAWALA, N. Electrical performance of current commercial supercapacitors and their future applications. **Electronics**, v. 12, n. 11, p. 2465, 2023.

SOUZA, V. A. **Desenvolvendo Um Contador Coulomb**. [S.l.]: Clube de Autores, 2014.

TICONA, W. G. C.; DELBÉM, A. C. B. Algoritmos evolutivos para otimização multi-objetivo. 2008.

TRAVASSOS, F.; SOARES, G.; CUPERTINO, A. Sistema de armazenamento de energia para reaproveitamento energético em um caminhão fora de estrada para mineração. In: . [S.l.: s.n.], 2024. v. 4.

UNIDAS, N. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**. 2015. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 07/10/2025.

VALE. **Vale é a primeira mineradora, entre as grandes do setor, a testar caminhões de 72 toneladas 100% elétricos**. 2022. Disponível em: <https://www.vale.com/pt/w/vale-is-the-first-mining-company-to-test-100-electric-72-ton-trucks>. Acesso em: 15/09/2025.

Wabtec Corporation. **Electric Drive Systems for Mining Applications**. 2024. <https://www.wabteccorp.com/mining/electric-drive-systems>. Acesso em novembro de 2025.

WANG, X. *et al.* Effects of altitude on the thermal efficiency of a heavy-duty diesel engine. **Energy**, v. 59, p. 543–548, 2013. ISSN 0360-5442. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544213005495>.

WANG, Z. *et al.* Topology analysis and review of three-port dc–dc converters. **IEEE Transactions on Power Electronics**, IEEE, v. 35, n. 11, p. 11783–11800, 2020.

WEI, Y. *et al.* A comprehensive study of degradation characteristics and mechanisms of commercial li(nimnco)o2 ev batteries under vehicle-to-grid (v2g) services. **Batteries**, v. 8, n. 10, 2022. ISSN 2313-0105. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2313-0105/8/10/188>.

ZHANG, J.; GU, M.; CHEN, X. Supercapacitors for renewable energy applications: A review. **Micro and Nano Engineering**, v. 21, p. 100229, 2023. ISSN 2590-0072. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S259000722300059X>.

ŞAHİN, M. E.; BLAABJERG, F.; SANGWONGWANICH, A. A comprehensive review on supercapacitor applications and developments. **Energies**, v. 15, n. 3, 2022. ISSN 1996-1073. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/3/674>.

A Projeto ótimo e resultados para os outros perfis

A.1 Mina de Araxá

Para o dimensionamento ótimo do banco de armazenamento híbrido para a Mina de Araxá, foi executado o algoritmo de simulação com foco na otimização do Valor Presente Líquido, considerando um horizonte de 60 meses (5 anos). A Tabela A.1 apresenta a evolução do algoritmo de otimização para esse cenário, em que **n_gen** representa o número da geração, **n_evals** o número de avaliações realizadas, **cv_min** as violações mínimas de restrição, **cv_avg** as violações médias, **n_nds** a quantidade de soluções de Pareto encontradas e **eps** a variação da solução ótima/fronreira de Pareto, isto é, o quanto o espaço de objetivos se desloca, sendo que valores mais distantes de zero indicam maior modificação. A coluna **indicator** informa se a solução encontrada representa valores ótimos (ideal) ou valores mais distantes (nadir).

Tabela A.1 – Tabela evolutiva do algoritmo de otimização para o perfil da Mina de Araxá.

n_gen	n_evals	n_nds	cv_min	cv_avg	eps	indicator
1	20	1	0.0	0.0	0.0	f
2	40	1	0.0	0.0	$1,03 \cdot 10^5$	ideal
3	60	1	0.0	0.0	$1,57 \cdot 10^5$	ideal
4	80	1	0.0	0.0	0.0	f
5	100	1	0.0	0.0	$1,97 \cdot 10^4$	ideal
6	120	1	0.0	0.0	$1,86 \cdot 10^5$	ideal
7	140	1	0.0	0.0	$0,47 \cdot 10^3$	ideal
8	160	3	0.0	0.0	0.0	f
9	180	7	0.0	0.0	0.0	f
10	200	14	0.0	0.0	0.0	f
11	220	20	0.0	0.0	0.0	f
12	240	1	0.0	0.0	$3,29 \cdot 10^3$	ideal
13	260	1	0.0	0.0	$0,86 \cdot 10^3$	ideal
14	280	4	0.0	0.0	0.0	f
15	300	1	0.0	0.0	$0,89 \cdot 10^3$	ideal
16	320	1	0.0	0.0	$4,47 \cdot 10^3$	ideal
17	340	4	0.0	0.0	0.0	f
18	360	1	0.0	0.0	$1,29 \cdot 10^5$	ideal
19	380	2	0.0	0.0	0.0	f
20	400	3	0.0	0.0	0.0	f
21	420	1	0.0	0.0	$1,80 \cdot 10^4$	ideal
22	440	1	0.0	0.0	0.0	f

Table A.1 continued from previous page

n_gen	n_evals	n_nds	cv_min	cv_avg	eps	indicator
23	460	1	0.0	0.0	0.0	f
24	480	1	0.0	0.0	$7,05 \cdot 10^3$	ideal
25	500	2	0.0	0.0	0.0	f
26	520	4	0.0	0.0	0.0	f
27	540	1	0.0	0.0	$3,71 \cdot 10^3$	ideal
28	560	5	0.0	0.0	0.0	f
29	580	1	0.0	0.0	$1,64 \cdot 10^4$	ideal
30	600	1	0.0	0.0	$4,58 \cdot 10^3$	ideal
31	620	1	0.0	0.0	$1,08 \cdot 10^4$	ideal
32	640	1	0.0	0.0	$2,99 \cdot 10^4$	ideal
33	660	3	0.0	0.0	0.0	f
34	680	7	0.0	0.0	0.0	f
35	700	18	0.0	0.0	0.0	f
36	720	20	0.0	0.0	0.0	f
37	740	20	0.0	0.0	0.0	f
38	760	1	0.0	0.0	$0,17 \cdot 10^3$	ideal
39	780	2	0.0	0.0	0.0	f
40	800	5	0.0	0.0	0.0	f
41	820	12	0.0	0.0	0.0	f
42	840	20	0.0	0.0	0.0	f
43	860	20	0.0	0.0	0.0	f
44	880	20	0.0	0.0	0.0	f
45	900	20	0.0	0.0	0.0	f
46	920	20	0.0	0.0	0.0	f
47	940	20	0.0	0.0	0.0	f
48	960	20	0.0	0.0	0.0	f
49	980	20	0.0	0.0	0.0	f
50	1000	20	0.0	0.0	0.0	f
51	1020	20	0.0	0.0	0.0	f
52	1040	20	0.0	0.0	0.0	f
53	1060	20	0.0	0.0	0.0	f
54	1080	20	0.0	0.0	0.0	f
55	1100	20	0.0	0.0	0.0	f
56	1120	20	0.0	0.0	0.0	f
57	1140	20	0.0	0.0	0.0	f
58	1160	20	0.0	0.0	0.0	f
59	1180	20	0.0	0.0	0.0	f

Table A.1 continued from previous page

n_gen	n_evals	n_nds	cv_min	cv_avg	eps	indicator
60	1200	20	0.0	0.0	0.0	f

Fonte: Elaborado pelo autor.

Foi encontrada uma única solução ótima, exposta na Tabela A.2. Para esse perfil de operação, foram obtidos como ponto ótimo o número 28 módulos de bateria, cada um contendo 16 células em série, e 4 *strings* de baterias em paralelo. Para o banco de supercapacitores, foram encontrados 21 módulo de supercapacitor com 16 supercapacitores em série, e 1 *string* de supercapacitor em paralelo. Totalizando, o volume ocupado foi de 1.234,69 L, abaixo do máximo possível de 1.415 L. A tensão de limiar ótima foi de 1375 kW.

Tabela A.2 – Resultado ótimo obtido pelo algoritmo de otimização para a Mina de Araxá.

Resultado Ótimo para a Mina de Araxá			
Baterias em Serie	16	Supercapacitores em Serie	16
Baterias em Paralelo	4	Supercapacitores em Paralelo	1
Módulos de Baterias	28	Módulos de Supercapacitores	21
Tensão Nominal	1456 V	Tensão Nominal	1008 V
Volume Total			1.234,69 L
Potência de Limiar			1375 kW
Valor Presente Líquido			R\$ 7.006.170,73

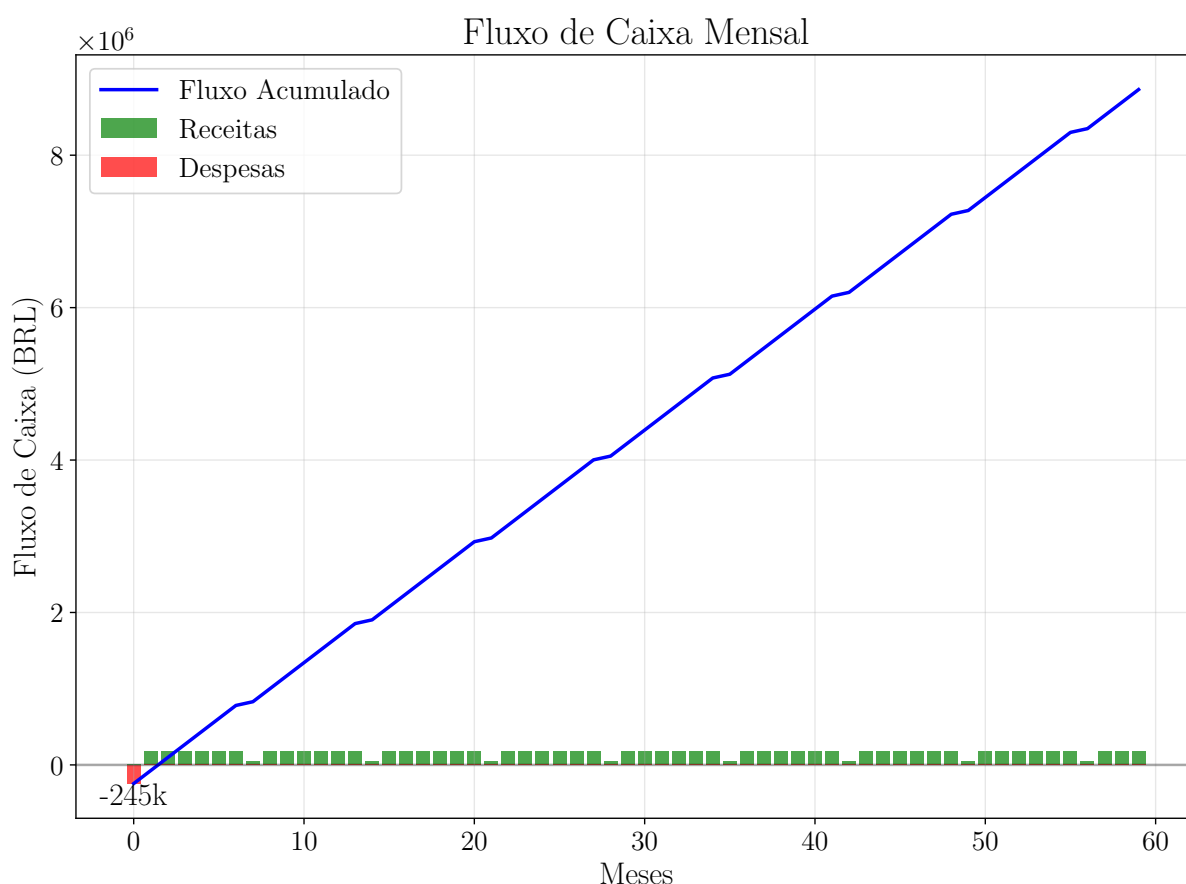
Vale lembrar, conforme explicitado na Seção 2.3, que o projeto é formado por *strings* compostas de $N_{s,b}$ baterias em série e $N_{m,b}$ módulos de bateria, sendo o número de baterias em paralelo o número de *strings* que devem ser paralelizadas. O mesmo vale para os supercapacitores. Para esse projeto, foi obtido um Valor Presente Líquido positivo de R\$ 7.006.170,73, mostrando-se extremamente lucrativo.

Na Figura A.1 é apresentado o fluxo de caixa mensal para a implementação do sistema de armazenamento para a Mina de Araxá. O fluxo de caixa demonstra um gasto inicial de aproximadamente R\$ -245.000,00 decorrente da aquisição dos elementos armazenadores e da compra da eletrônica de potência responsável pelo gerenciamento de potência. Nos meses subsequentes, devido à economia de diesel proporcionada pelo reaproveitamento da energia absorvida pela frenagem regenerativa, foi gerado um fluxo de caixa positivo de aproximadamente R\$ 172.000,00. Nos meses 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49 e 56, o fluxo de caixa foi de aproximadamente R\$ 49.000,00, decorrente da necessidade de troca das baterias devido ao fim do ciclo de vida. Devido à alta vida útil dos supercapacitores, para este exemplo, não foi necessária a realização da troca desses componentes ao longo do período analisado.

Conforme analisado na Seção 4.1, em comparação com a Mina de Conceição do Mato Dentro, o perfil apresentado para a Mina de Araxá possui características distintas,

especialmente na relação entre a potência dissipada e a potência consumida, que é de 51%. Esse fator resultou em diferenças no dimensionamento dos bancos de armazenamento e, principalmente, impactou o gráfico de fluxo de caixa e o valor presente líquido, uma vez que a economia de diesel decorrente da frenagem regenerativa foi menor. Dessa forma, conclui-se que perfis com menor relação entre potência dissipada e consumida tendem a apresentar menor vantagem na implementação de sistemas de armazenamento de energia, embora a adoção desses sistemas ainda se mostre financeiramente vantajosa.

Figura A.1 – Fluxo de caixa mensal para a Mina de Araxá.



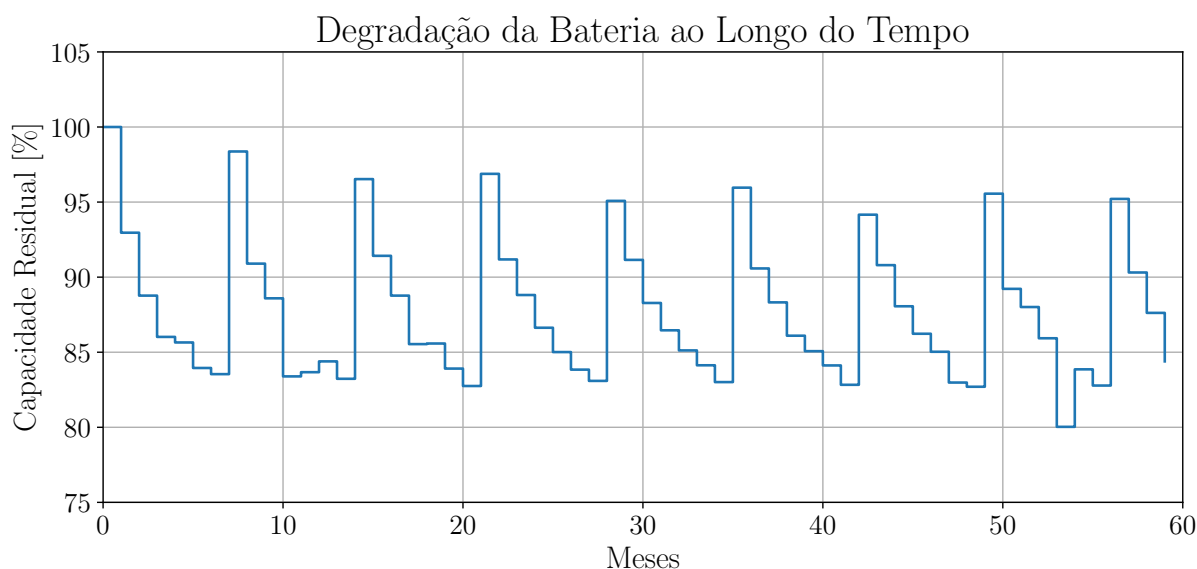
Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura A.2 é apresentada a curva de degradação da bateria ao longo do tempo de operação, em meses. Na curva, é possível perceber degraus positivos nos meses 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49 e 56, momentos em que a bateria ultrapassou a vida útil de 5300 ciclos (considerando o conceito de *Full Equivalent Cycle* apresentado anteriormente na Seção 2.3) e precisou ser trocada. Dessa forma, para o perfil de potência apresentado pela operação em Araxá, o banco de baterias necessitaria ser substituído a cada 7–8 meses, aproximadamente.

Em comparação com a operação na Mina de Conceição do Mato Dentro, foram necessárias mais substituições do banco de baterias, decorrentes da maior excursão do estado de carga, influenciada tanto pelo dimensionamento distinto do banco quanto pelo

perfil de potência da mina. Esse comportamento resultou em um número maior de Full Equivalent Cycles, levando a uma degradação mais acelerada do componente.

Figura A.2 – Curva de degradação da bateria para a simulação utilizando o perfil de Araxá.



Fonte: Elaborado pelo autor.

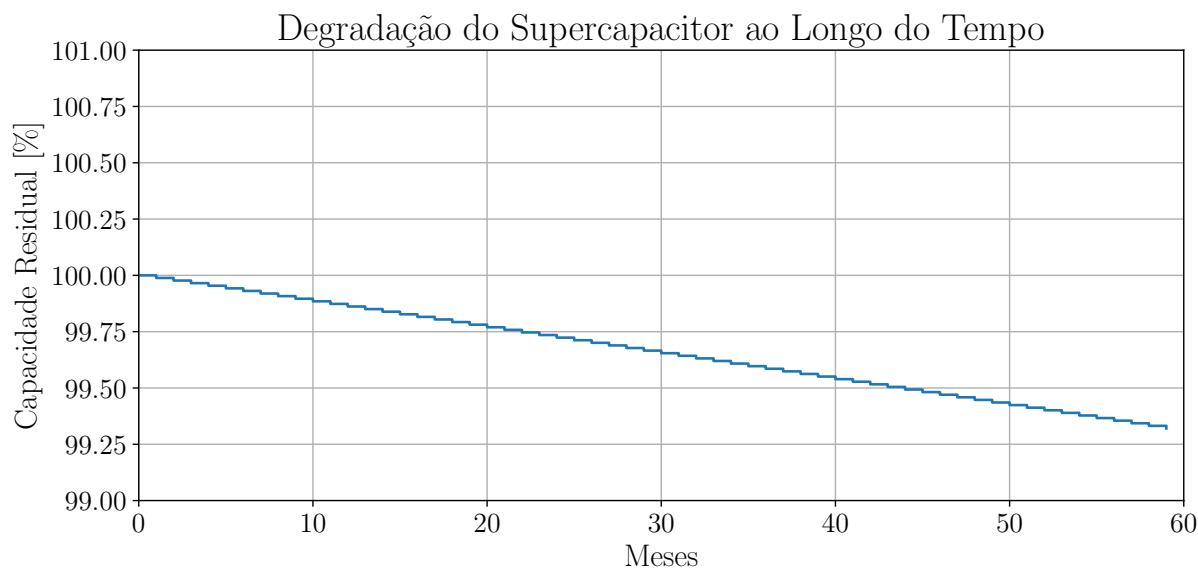
Na Figura A.3 é demonstrada a curva de degradação do banco de supercapacitores ao longo do tempo de operação, em meses. Essa curva evidencia uma das principais características dos supercapacitores: sua elevada vida útil. A partir dos resultados, observa-se que a vida útil dos supercapacitores, calculada em horas de operação, praticamente não se degradou, mantendo 99,32% da capacidade inicial. Apesar do diferente dimensionamento do banco de supercapacitores para esse perfil, a degradação do supercapacitor é baseada nas horas de utilização, sendo esse valor similar ao apresentado para a mina de Conceição do Mato Dentro.

Na Figura A.4 são demonstrados os gráficos de potência, corrente e potência rejeitada para os elementos armazenadores.

O gráfico de potência do banco de baterias demonstra que o banco foi capaz de gerenciar, com grande eficiência, praticamente toda a demanda energética solicitada ao longo do ciclo. Observa-se que o sistema conseguiu tanto entregar quanto absorver potência de forma praticamente integral durante a maior parte da operação, evidenciando que a configuração escolhida - composta por 8 módulos em serie de 16 baterias e 4 *strings* em paralelo - foi suficiente para atender às exigências dinâmicas do perfil de Conceição de Araxá.

O gráfico de potência do banco de supercapacitores demonstra a utilização desse elemento em momentos específicos do trajeto, correspondentes aos intervalos de maior densidade de potência (entre $t = 0\text{ s}$ e $t = 200\text{ s}$) e um pequeno picos em $t = 583\text{ s}$, conforme pode ser verificado na Figura A.4. Esse comportamento reflete exatamente

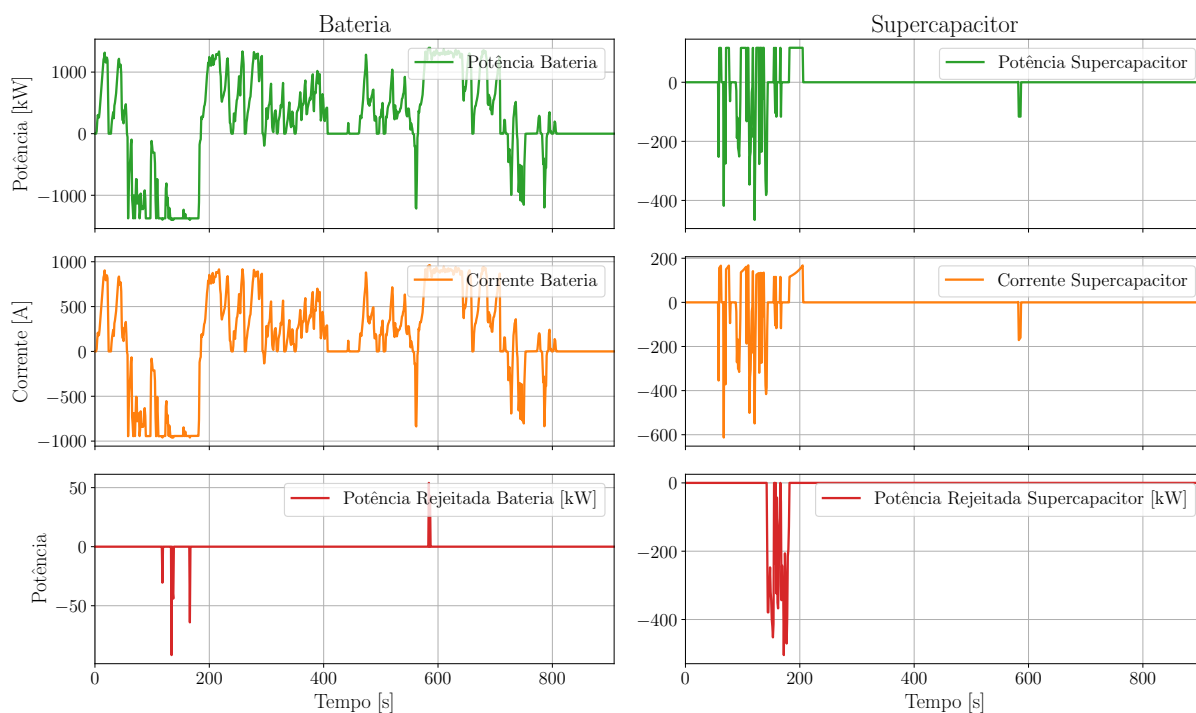
Figura A.3 – Curva de degradação do banco de supercapacitor para a simulação utilizando o perfil de Araxá.



Fonte: Elaborado pelo autor.

o esperado para os supercapacitores, que atuam de forma mais eficiente em situações caracterizadas por picos de potência ou por demandas que exigem elevada densidade de potência.

Figura A.4 – Gráficos de potência, corrente e potência rejeitada para os elementos armazenadores considerando a operação na Mina de Araxá.



Fonte: Elaborado pelo autor.

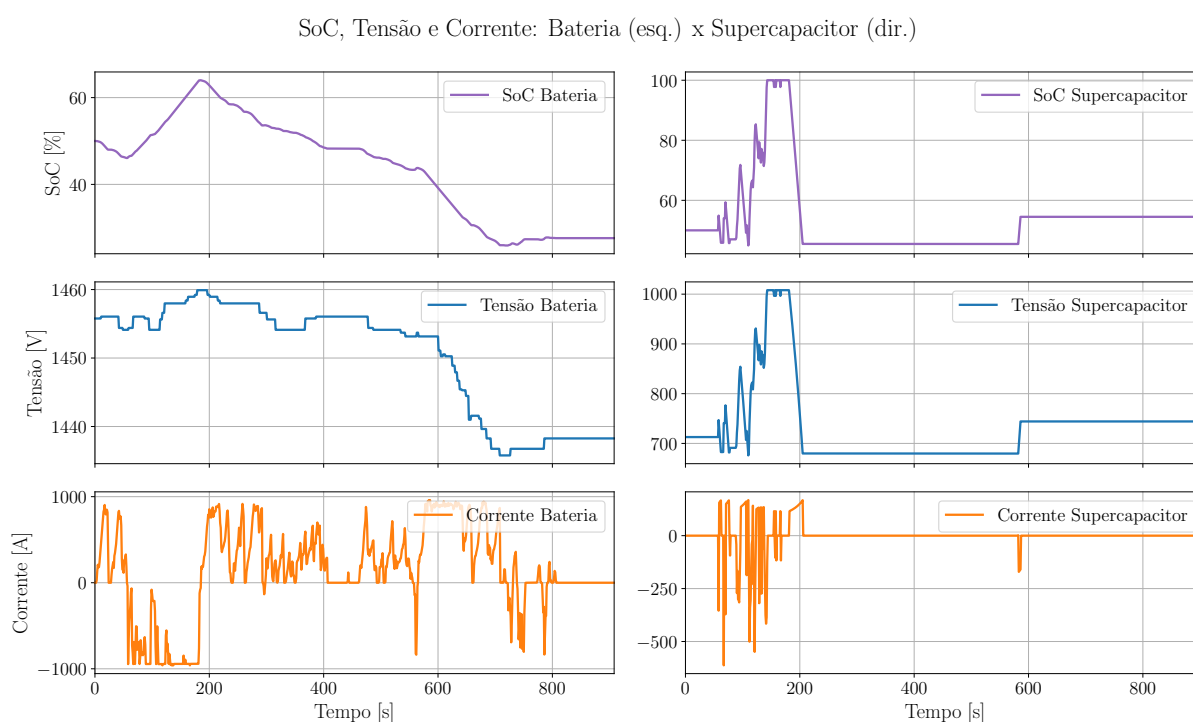
O gráfico de potência rejeitada evidencia que o sistema deixou de absorver energia entre $t = 0\text{ s}$ e $t = 200\text{ s}$ no banco de supercapacitores. Essa rejeição está associada

à capacidade de armazenamento do banco, uma vez que seu estado de carga atingiu o valor máximo, conforme ilustrado na Figura A.5. Observa-se também que durante e após o período de maior demanda energética entre $t = 0$ s e $t = 200$ s, o banco de supercapacitores passa a descarregar energia no banco de baterias, de modo a tentar restabelecer sua capacidade de resposta a picos de potência.

Na Figura A.5 são apresentadas as curvas de estado de carga, tensão e corrente para os elementos armazenadores de energia. O perfil de excursão do estado de carga demonstra que, para essa operação, diferentemente do observado para Conceição do Mato Dentro, não é possível recuperar de forma substancial toda energia gasta para a tração. Durante toda a operação, o estado de carga do banco de baterias excursionou começando em 50%, atingiu o máximo de 64% em $t = 185$ s e um mínimo de 25,92% em $t = 718$ s. Ao final do percurso, o banco de baterias terminou com estado de carga igual a 27,61%. A excursão de tensão do banco de baterias foi realizada por meio da curva de tensão por estado de carga demonstrada na Seção 2.3.

O perfil de excursão do sistema de armazenamento em supercapacitores apresenta um comportamento distinto daquele observado para as baterias, absorvendo energia nos instantes iniciais, quando ocorrem os maiores picos de densidade de potência. Após o período de maior absorção de energia, o banco de supercapacitores passa a se descarregar no banco de baterias, restabelecendo sua capacidade de receber energia e de atender a futuras demandas de potência.

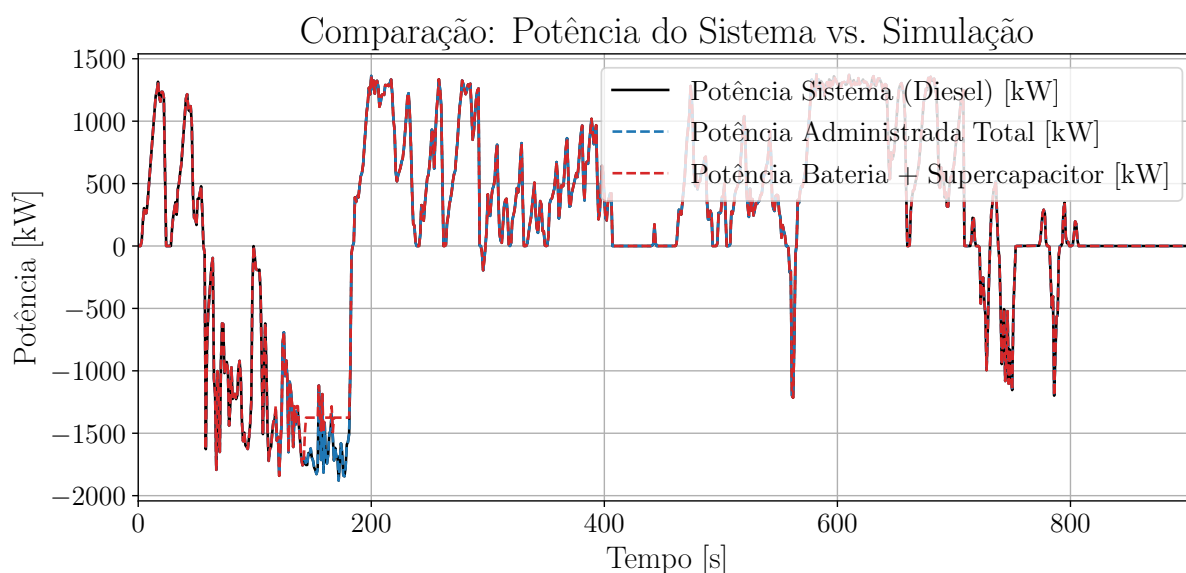
Figura A.5 – Gráficos de Estado de Carga, Tensão e corrente dos elementos armazenadores considerando a operação na Mina de Araxá.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura A.6 é ilustrada uma comparação entre a curva de potência demandada pelo sistema (em preto), a potência administrada total, isto é, a soma da potência gerenciada pela bateria, pelo supercapacitor e a potência rejeitada, em azul; e a soma das potências efetivamente gerenciadas pelo sistema de armazenamento em baterias e supercapacitores, em vermelho. A partir dessas curvas, é perceptível que o sistema de armazenamento híbrido conseguiu suprir a demanda energética durante todo o ciclo de operação, além de absorver a maior parte das potências associadas à frenagem regenerativa, rejeitando potência apenas nos períodos finais do período correspondente entre $t = 0$ s e $t = 200$ s.

Figura A.6 – Comparação entre as potencia demandadas, administradas e absorvidas ou fornecidas pelos sistema de armazenamento para o perfil de Mina de Araxá.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A.2 Mina de Riacho dos Machados

Para o dimensionamento ótimo do banco de armazenamento híbrido para a Mina de Riacho dos Machados, foi executado o algoritmo de simulação com foco na otimização do Valor Presente Líquido, considerando um horizonte de 60 meses (5 anos). A Tabela A.3 apresenta a evolução do algoritmo de otimização para esse cenário, em que **n_gen** representa o número da geração, **n_evals** o número de avaliações realizadas, **cv_min** as violações mínimas de restrição, **cv_avg** as violações médias, **n_nds** a quantidade de soluções de Pareto encontradas e **eps** a variação da solução ótima/fronreira de Pareto, isto é, o quanto o espaço de objetivos se desloca, sendo que valores mais distantes de zero indicam maior modificação. A coluna **indicator** informa se a solução encontrada representa valores ótimos (ideal) ou valores mais distantes (nadir).

Tabela A.3 – Tabela evolutiva do algoritmo de otimização para o perfil da Mina de Riacho dos Machados.

n_gen	n_evals	n_nds	cv_min	cv_avg	eps	indicator
1	20	1	0.0	0.0	0.0	f
2	40	1	0.0	0.0	0.0	f
3	60	1	0.0	0.0	$1,61 \cdot 10^3$	ideal
4	80	1	0.0	0.0	$1,44 \cdot 10^4$	ideal
5	100	1	0.0	0.0	$2,34 \cdot 10^5$	ideal
6	120	1	0.0	0.0	$7,29 \cdot 10^3$	ideal
7	140	2	0.0	0.0	0.0	f
8	160	2	0.0	0.0	$1,16 \cdot 10^4$	ideal
9	180	5	0.0	0.0	0.0	f
10	200	1	0.0	0.0	$2,28 \cdot 10^3$	ideal
11	220	1	0.0	0.0	$4,32 \cdot 10^3$	ideal
12	240	1	0.0	0.0	$3,79 \cdot 10^4$	ideal
13	260	1	0.0	0.0	0.0	f
14	280	1	0.0	0.0	$6,06 \cdot 10^3$	ideal
15	300	4	0.0	0.0	0.0	f
16	320	11	0.0	0.0	0.0	f
17	340	1	0.0	0.0	$0,65 \cdot 10^3$	ideal
18	360	1	0.0	0.0	$1,60 \cdot 10^5$	ideal
19	380	1	0.0	0.0	0.0	f
20	400	1	0.0	0.0	$6,34 \cdot 10^4$	ideal
21	420	1	0.0	0.0	0.0	f
22	440	1	0.0	0.0	$6,94 \cdot 10^4$	ideal
23	460	1	0.0	0.0	0.0	f
24	480	1	0.0	0.0	$0,12 \cdot 10^3$	ideal
25	500	1	0.0	0.0	$1,55 \cdot 10^5$	ideal
26	520	1	0.0	0.0	$5,10 \cdot 10^3$	ideal
27	540	3	0.0	0.0	0.0	f
28	560	7	0.0	0.0	0.0	f
29	580	16	0.0	0.0	0.0	f
30	600	1	0.0	0.0	$3,30 \cdot 10^3$	ideal

Foi encontrada uma única solução ótima, exposta na Tabela A.4. Para esse perfil de operação, foi obtido como ponto ótimo o número de 27 módulos de bateria, cada um contendo 16 células em série, e 5 *strings* de baterias em paralelo. Para o banco de supercapacitores, foram encontrados 11 módulos de supercapacitor com 16 supercapacitores em série, e 1 *string* de supercapacitor em paralelo. Totalizando, o volume ocupado foi de 1.374,66 L, abaixo do máximo possível de 1.415 L. A tensão de limiar ótima foi de 1525 kW.

Vale lembrar, conforme explicitado na Seção 2.3, que o projeto é formado por *strings* compostas de $N_{s,b}$ baterias em série e $N_{m,b}$ módulos de bateria, sendo o número de baterias em paralelo o número de *strings* que devem ser paralelizadas. O mesmo vale para os supercapacitores. Para esse projeto, foi obtido um Valor Presente Líquido positivo de

Tabela A.4 – Resultado ótimo obtido pelo algoritmo de otimização para a Mina de Riacho dos Machados.

Resultado Ótimo para a Mina de Riacho dos Machados			
Baterias em Serie	16	Supercapacitores em Serie	16
Baterias em Paralelo	5	Supercapacitores em Paralelo	1
Módulos de Baterias	27	Módulos de Supercapacitores	11
Tensão Nominal	1404 V	Tensão Nominal	528 V
Volume Total			1.374,66 L
Potência de Limiar			1525 kW
Valor Presente Líquido			R\$ 8.225.071,58

Fonte: Elaborado pelo autor.

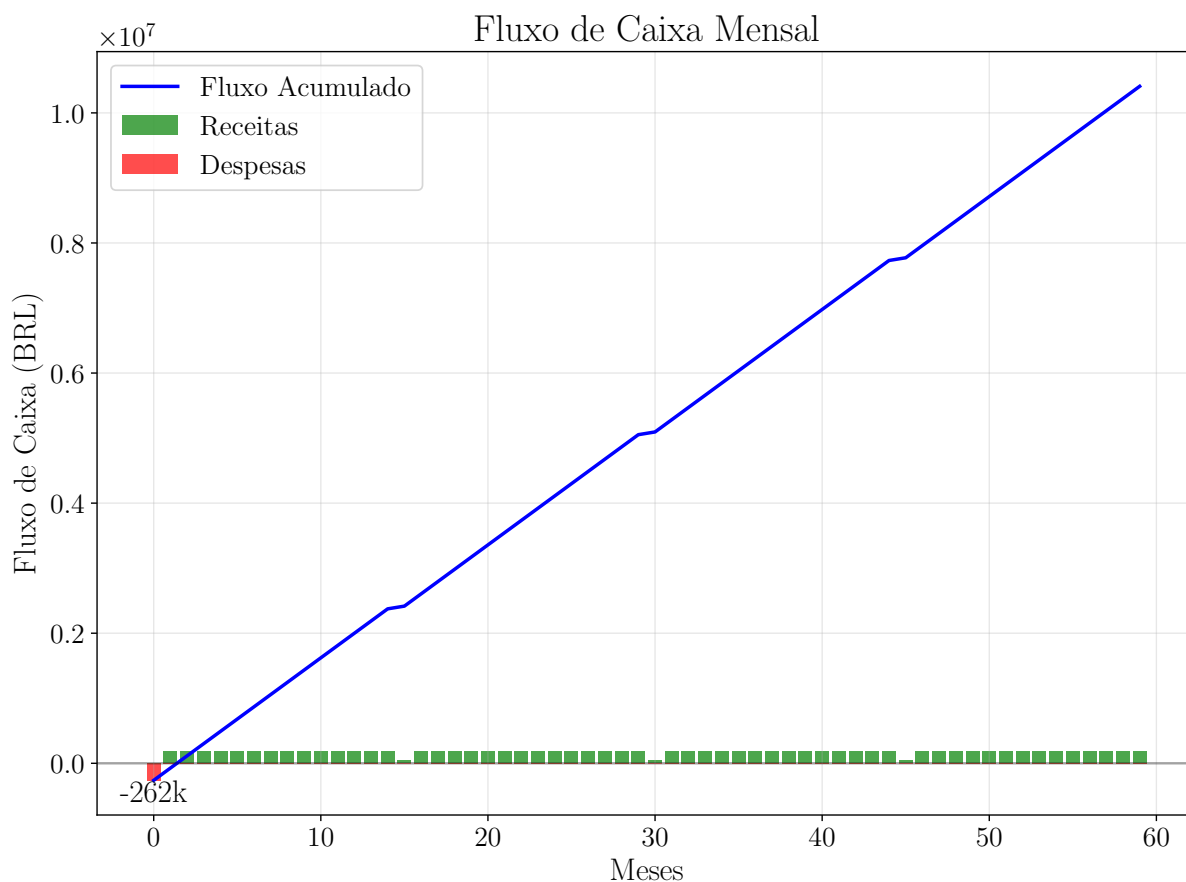
R\$ 8.225.071,58, mostrando-se extremamente lucrativo.

Na Figura A.7 é apresentado o fluxo de caixa mensal para a implementação do sistema de armazenamento para a Mina de Riacho dos Machado. O fluxo de caixa demonstra um gasto inicial de aproximadamente R\$ -262.000,00 decorrente da aquisição dos elementos armazenadores e da compra da eletrônica de potência responsável pelo gerenciamento de potência. Nos meses subsequentes, devido à economia de diesel proporcionada pelo reaproveitamento da energia absorvida pela frenagem regenerativa, foi gerado um fluxo de caixa positivo de aproximadamente R\$ 188.000,00. Nos meses 15, 30, e 45 o fluxo de caixa foi de aproximadamente R\$ 40.000,00, decorrente da necessidade de troca das baterias devido ao fim do ciclo de vida. Devido à alta vida útil dos supercapacitores, para este exemplo, não foi necessária a realização da troca desses componentes ao longo do período analisado.

Conforme analisado na Seção 4.1, em comparação com a Mina de Conceição do Mato Dentro, o perfil apresentado para a Mina de Riacho dos Machados possui características distintas e similares com a Mina de Araxá, especialmente na relação entre a potência dissipada e a potência consumida, que é de 45%. Esse fator resultou em um dimensionamento semelhante ao de Mina de Araxá, impactando o gráfico de fluxo de caixa e o valor presente líquido, uma vez que a economia de diesel decorrente da frenagem regenerativa foi menor. Dessa forma, conclui-se que perfis com menor relação entre potência dissipada e consumida tendem a apresentar menor vantagem na implementação de sistemas de armazenamento de energia, embora a adoção desses sistemas ainda se mostre financeiramente vantajosa.

Na Figura A.8 é apresentada a curva de degradação da bateria ao longo do tempo de operação, em meses. Observa-se a presença de degraus positivos nos meses 15, 30 e 45, correspondentes aos momentos em que a bateria ultrapassa sua vida útil de 5.300 ciclos, considerando o conceito de Full Equivalent Cycle discutido anteriormente na Seção 2.3, e, portanto, necessita ser substituída. Assim, para o perfil de potência associado à operação em Riacho dos Machados, o banco de baterias precisaria ser renovado aproximadamente

Figura A.7 – Fluxo de caixa mensal para a Mina de Riacho dos Machados.



Fonte: Elaborado pelo autor.

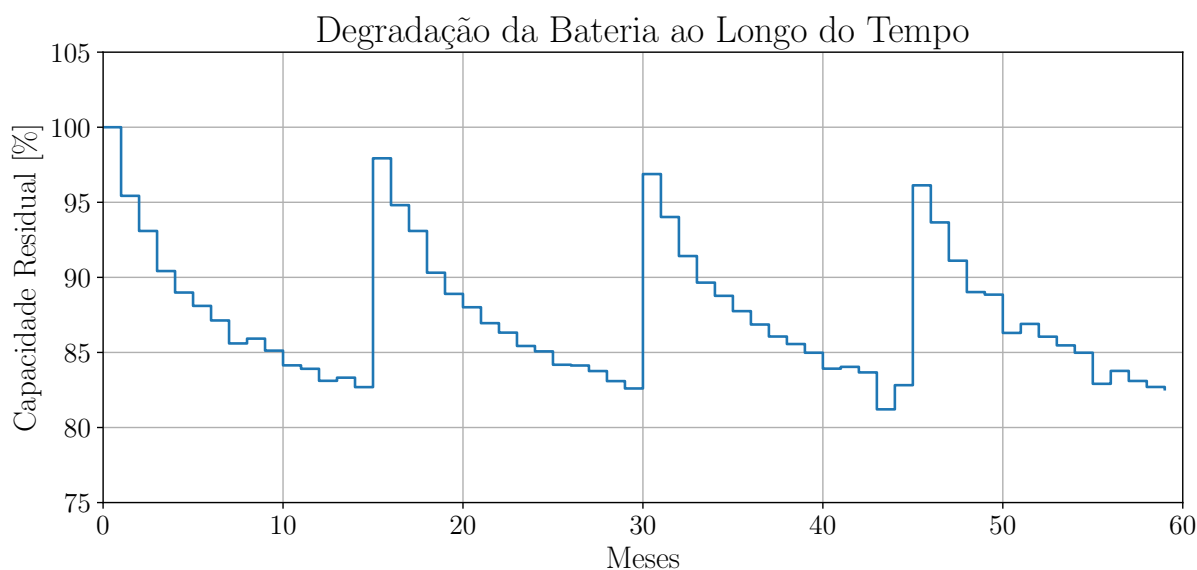
a cada 15–16 meses.

Em comparação com a operação na Mina de Conceição do Mato Dentro e Araxá, foram necessárias menos substituições do banco de baterias, decorrentes da menor excursão do estado de carga, influenciada tanto pelo dimensionamento distinto do banco quanto pelo perfil de potência da mina. Esse comportamento resultou em um número maior de Full Equivalent Cycles, levando a uma degradação mais lenta do componente.

Na Figura A.9 é demonstrada a curva de degradação do banco de supercapacitores ao longo do tempo de operação, em meses. Essa curva evidencia uma das principais características dos supercapacitores: sua elevada vida útil. A partir dos resultados, observa-se que a vida útil dos supercapacitores, calculada em horas de operação, praticamente não se degradou, mantendo 99,32% da capacidade inicial. Apesar do diferente dimensionamento do banco de supercapacitores para esse perfil, a degradação do supercapacitor é baseada nas horas de utilização, sendo esse valor similar ao apresentado para as minas de Conceição do Mato Dentro e Araxá.

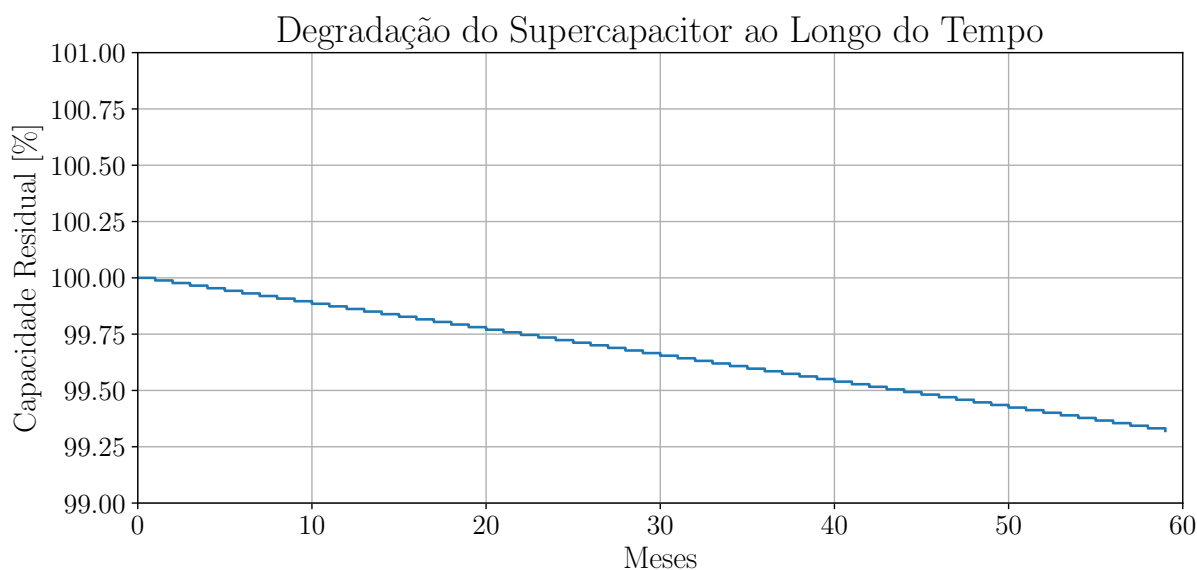
Na Figura A.10 são demonstrados os gráficos de potência, corrente e potência rejeitada para os elementos armazenadores.

Figura A.8 – Curva de degradação da bateria para a simulação utilizando o perfil de Riacho dos Machados.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura A.9 – Curva de degradação do banco de supercapacitor para a simulação utilizando o perfil de Araxá.



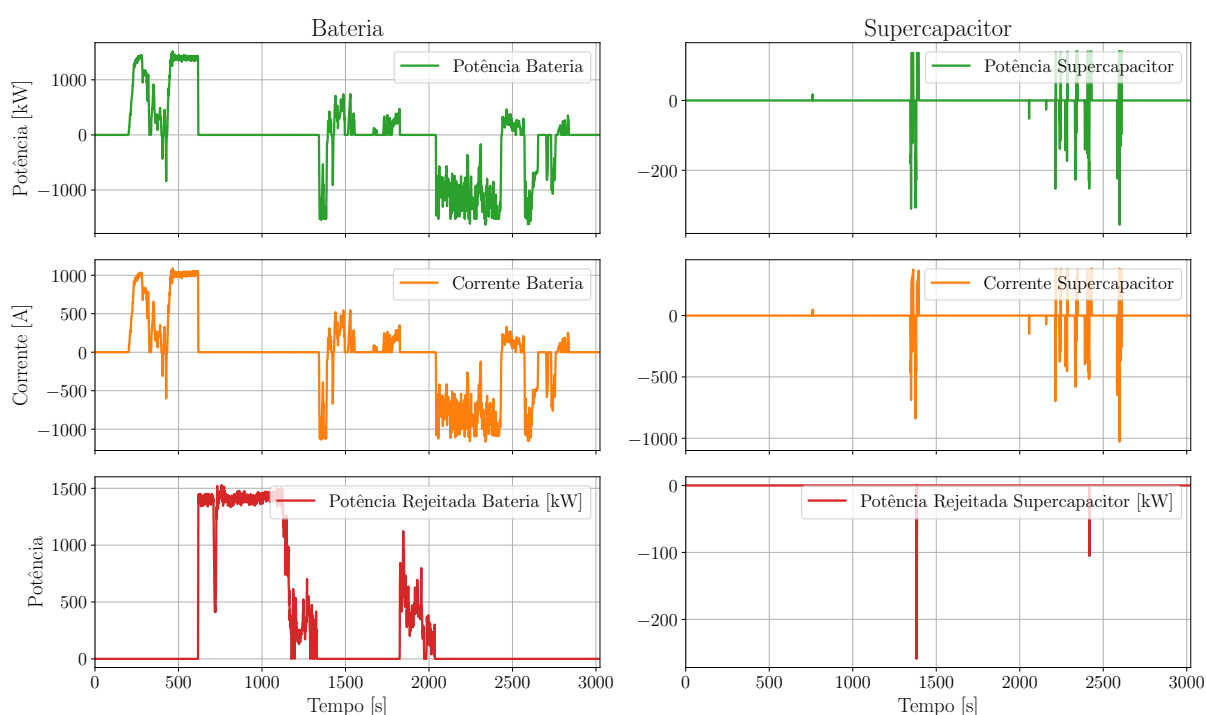
Fonte: Elaborado pelo autor.

O gráfico de potência da bateria demonstra que, para esse perfil, o banco dimensionado (27 módulos de baterias em série de 16 baterias, com 5 baterias em paralelo) não é capaz de fornecer integralmente a potência demandada durante todo o ciclo de operação. Em determinado instante, o banco de baterias atingiu o estado de carga mínimo de 10%, interrompendo o fornecimento de potência ao barramento.

O gráfico de potência do banco de supercapacitores demonstra a utilização desse elemento em momentos específicos do trajeto, correspondentes aos intervalos de maior densidade de potência (entre $t = 1350\text{ s}$ e $t = 1375\text{ s}$), conforme pode ser verificado na

Figura A.10. Esse comportamento reflete exatamente o esperado para os supercapacitores, que atuam de forma mais eficiente em situações caracterizadas por picos de potência ou por demandas que exigem elevada densidade de potência. Conforme observado nos demais perfis, há um gerenciamento de energia entre os bancos, de modo a manter o banco de supercapacitores sempre disponível para fornecer ou absorver potência conforme necessário.

Figura A.10 – Gráficos de potência, corrente e potência rejeitada para os elementos armazenadores considerando a operação na Mina de Riacho dos Machados.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O gráfico de rejeição de potência para o sistema de armazenamento em baterias demonstra um comportamento bastante distinto do esperado, diferindo significativamente do observado nos perfis de Conceição do Mato Dentro e Araxá. Para esse perfil, o sistema rejeitou integralmente o fornecimento de potência entre $t = 625\text{ s}$ e $t = 1330\text{ s}$. Essa rejeição ocorreu devido ao atingimento do estado de carga mínimo do banco de baterias, impossibilitando-o de continuar fornecendo potência ao barramento. Logo em seguida, o sistema conseguiu regenerar uma pequena quantidade de energia, que rapidamente se esgotou, resultando em nova rejeição de fornecimento entre $t = 1825\text{ s}$ e $t = 2035\text{ s}$.

O gráfico de potência rejeitada também evidencia que o sistema deixou de absorver energia nos instantes $t = 1381\text{ s}$ e $t = 2416\text{ s}$ no banco de supercapacitores. Essa rejeição está associada à capacidade de armazenamento do banco, uma vez que seu estado de carga atingiu o valor máximo, conforme ilustrado na Figura A.11. Trata-se de um pico pontual e, devido ao gerenciamento de potência entre os bancos, o supercapacitor rapidamente retornou ao valor de referência, mantendo-se apto a

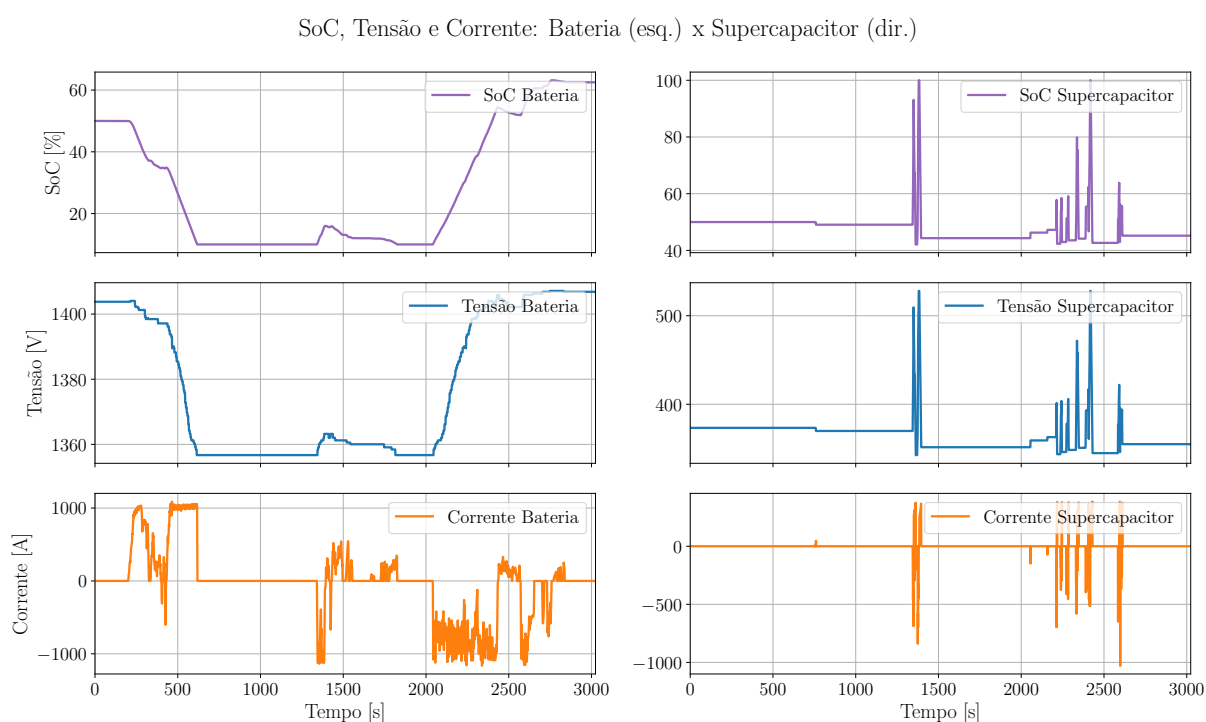
absorver ou fornecer potência normalmente.

Na Figura A.11 são apresentadas as curvas de estado de carga, tensão e corrente dos elementos armazenadores de energia. Para esse perfil, diferentemente do observado nos demais cenários, ocorreu uma rejeição significativa de potência. O perfil de excursão do estado de carga indica que, nessa operação, ao contrário do verificado em Conceição do Mato Dentro, não é possível recuperar de forma substancial a energia consumida na tração. Embora o banco de baterias tenha finalizado o ciclo com um estado de carga superior ao inicial (62,52% ao final, contra 50% no início), o sistema deixou de absorver potência durante grande parte do ciclo, entre $t = 619\text{ s}$ e $t = 1340\text{ s}$. Nesses intervalos, houve necessidade de utilização de diesel, resultando em menor economia de combustível para o ciclo de operação. A excursão de tensão do banco de baterias foi obtida a partir da curva tensão–estado de carga apresentada na Seção 2.3.

O perfil de excursão do sistema de armazenamento em supercapacitores apresenta um comportamento distinto daquele observado para as baterias, conseguindo gerenciar e absorver ou fornecer picos de potência em momentos específicos do período de operação. Ao final do ciclo, o banco de supercapacitores retorna ao valor de referência, conforme esperado.

Na Figura A.12 é apresentada uma comparação entre a curva de potência demandada pelo sistema (em preto), a potência total administrada, isto é, a soma da

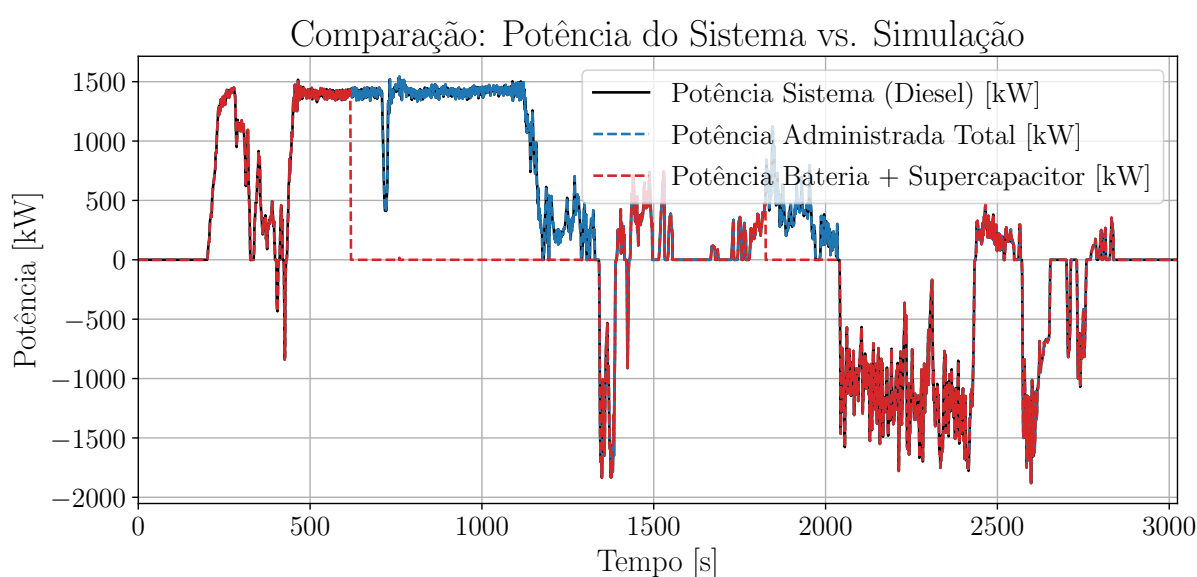
Figura A.11 – Gráficos de Estado de Carga, Tensão e corrente dos elementos armazenadores considerando a operação na Mina de Riacho dos Machados.



Fonte: Elaborado pelo autor.

potência gerenciada pela bateria, pelo supercapacitor e da potência rejeitada, em azul; e a soma das potências efetivamente processadas pelo sistema de armazenamento em baterias e supercapacitores, em vermelho. A partir dessas curvas, observa-se que o sistema híbrido de armazenamento, para esse perfil de operação, não conseguiu suprir integralmente a demanda energética ao longo do ciclo, exigindo uma atuação significativa do sistema diesel-elétrico do caminhão. Essa necessidade impactou de forma considerável o Valor Presente Líquido. Ainda assim, o uso do sistema híbrido de armazenamento de energia mostrou-se vantajoso para esse perfil de potência.

Figura A.12 – Comparação entre as potencia demandadas, administradas e absorvidas ou fornecidas pelos sistema de armazenamento para o perfil de Mina de Riacho dos Machados.



Fonte: Elaborado pelo autor.

B Análise de Sensibilidade para as outras minas

B.1 Mina de Araxá

Na Tabela B.1 está apresentado o resultado final do VPL considerando o banco de armazenamento ótimo obtido na Seção A.1, composto por $N_{m,b} = 28$, $N_{p,b} = 4$, $N_{m,sc} = 21$, $N_{p,sc} = 1$ e $P_{th} = 1375$ kW, variando de acordo com os parâmetros de sensibilidade definidos na Tabela 4.14. A primeira linha da tabela corresponde ao caso base, isto é, todos os parâmetros em seus valores de referência, enquanto as linhas subsequentes apresentam os resultados obtidos a partir da modificação individual de cada parâmetro avaliado. Em verde estão os parâmetros cujo valor absoluto foi aumentado em comparação com o caso base, e em vermelho aqueles cujo valor absoluto foi reduzido. Ao lado de cada valor, entre parênteses, encontra-se a porcentagem de variação em relação ao caso base. É importante destacar que nem todos os parâmetros influenciam o VPL de forma direta (isto é, nem sempre um aumento no valor absoluto do parâmetro implica aumento no VPL), havendo casos em que o efeito é inverso. A seguir, cada linha do resultado é detalhada individualmente.

Tabela B.1 – Análise de sensibilidade considerando alterações dos parâmetros para o dimensionamento base para a Mina de Araxá.

Cenário	Parâmetro Modificado	Alteração no Valor	VPL [R\$]	Sensibilidade
0	Caso base	-	7006170,727	-
1	Preço Diesel	3.69 (↓ 36.2%)	4108177.8686229074 (↓ 41.4%)	1.143
2	Preço Diesel	7.46 (↑ 29.1%)	9335657.809807047 (↑ 33.2%)	1.140
3	Cotação Dolar	4.58 (↓ 13.6%)	7143157.39965963 (↑ 2.0%)	-0.147
4	Cotação Dolar	6.31 (↑ 19.%)	6814008.867374374 (↓ 2.7%)	-0.142
5	Preço Razão Elepot	5.0 (↓ 50.0%)	7059170.727263453 (↑ 0.8%)	-0.016
6	Preço Razão Elepot	20.0 (↑ 100.0%)	6900170.7272634525 (↓ 1.5%)	-0.015
7	Preço Bat	6.4 (↓ 50.0%)	7448676.385388269 (↑ 6.3%)	-0.126
8	Preço Bat	34.688 (↑ 171.0%)	5492801.376476586 (↓ 21.6%)	-0.126
9	Preço SC	5.85 (↓ 40.0%)	7013115.8472634535 (↑ 0.1%)	-0.002
10	Preço SC	13.65 (↑ 40.0%)	6999225.607263453 (↓ 0.1%)	-0.002
11	C-rate	2.0 (↓ 66.7%)	2580410.8755011624 (↓ 63.2%)	0.947
12	C-rate	10.0 (↑ 66.7%)	7057457.689693095 (↑ 0.7%)	0.010

Fonte: Elaborado pelo autor.

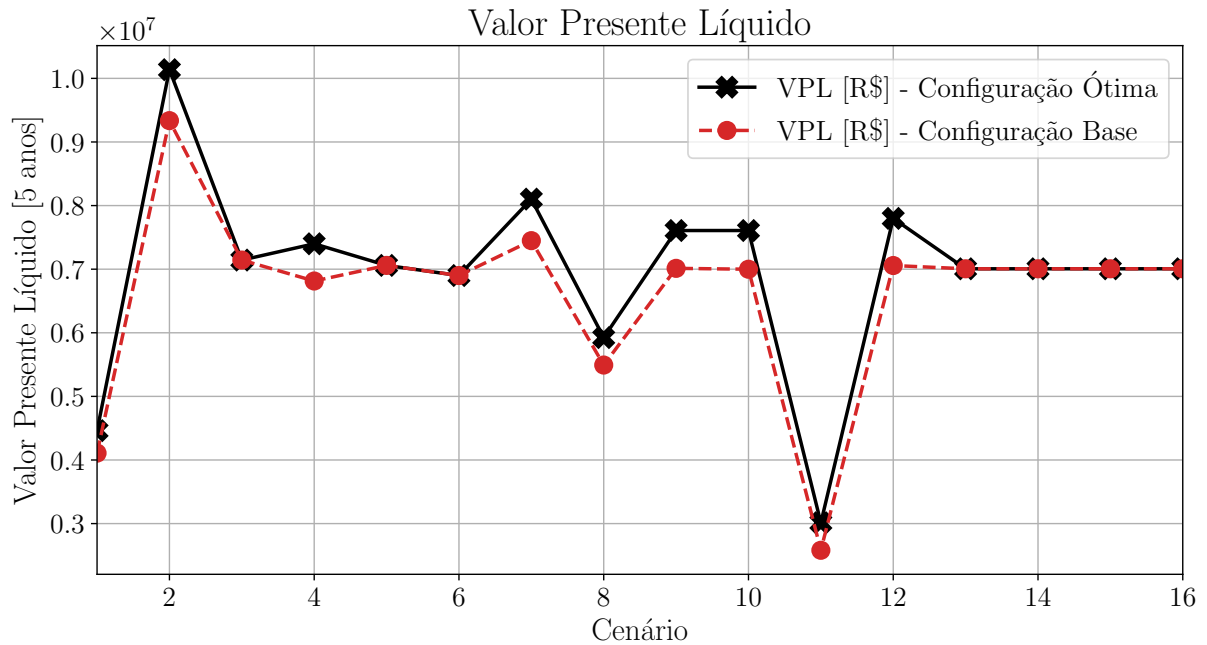
Como forma de comparar os resultados apresentados na Tabela B.1, o algoritmo de otimização foi executado novamente para cada cenário. A tabela completa com os dados da análise de sensibilidade para o perfil da Mina de Araxá encontra-se no Apêndice D. Ela apresenta as variações dos resultados de otimização obtidas a partir da alteração de parâmetros como o preço do diesel, a cotação do dólar, o custo da eletrônica de potência, o preço da bateria, o preço do supercapacitor, a Taxa C da bateria, o valor mínimo de módulos de bateria e o valor mínimo de módulos de supercapacitores. A modificação desses parâmetros afeta diretamente a capacidade do HESS de armazenar e absorver energia, influenciando, portanto, o Valor Presente Líquido, variável central do problema de otimização.

Sendo assim, para cada cenário apresentado na Tabela D.1, o algoritmo de otimização foi executado individualmente, resultando em diferentes configurações ótimas para os bancos de baterias e supercapacitores, bem como em distintos limiares ótimos de potência. A tabela apresentada em Tabela B.2 resume esses resultados de forma consolidada.

Tabela B.2 – Análise de sensibilidade considerando alterações dos parâmetros juntamente com o algoritmo de otimização para a Mina de Araxá.

Cenário	Parâmetro Modificado	Alteração no Valor	$N_{m,b}$	$N_{p,b}$	$N_{m,sc}$	$N_{p,sc}$	Pth [kW]	VPL [R\$]
0	Caso base		28	4	21	1	1375	7006170,727
1	Preço Diesel	3.69 (↓ 36.2%)	28	5.0 (↑ 25.0%)	11.0 (↓ 47.6%)	0.0 (↓ 100.0%)	1100.0 (↓ 20.0%)	4461322,51 (↓ 36.3%)
2	Preço Diesel	7.46 (↑ 29.1%)	28	5.0 (↑ 25.0%)	13.0 (↓ 38.1%)	0.0 (↓ 100.0%)	1425.0 (↑ 3.6%)	10136925,27 (↑ 44.7%)
3	Cotação Dolar	4.58 (↓ 13.6%)	28	4	21	1	1375	7143157,39 (↑ 2.0%)
4	Cotação Dolar	6.31 (↑ 19.1%)	28	5.0 (↑ 25.0%)	13.0 (↓ 38.1%)	0.0 (↓ 100.0%)	1225.0 (↓ 10.9%)	7399294,87 (↑ 5.6%)
5	Preço Razão Elepot	5.0 (↓ 50.0%)	28	4	21	1	1375	7059170,72 (↑ 0.8%)
6	Preço Razão Elepot	20.0 (↑ 100.0%)	28	4	21	1	1375	6900170,72 (↓ 1.5%)
7	Preço Bat	6.4 (↓ 50.0%)	28	5.0 (↑ 25.0%)	12.0 (↓ 42.9%)	0.0 (↓ 100.0%)	1625.0 (↑ 18.2%)	8101665,728 (↑ 15.6%)
8	Preço Bat	34.688 (↑ 171.0%)	27.0 (↓ 3.6%)	5.0 (↑ 25.0%)	16.0 (↓ 23.8%)	0.0 (↓ 100.0%)	1675.0 (↑ 21.8%)	5924488,80 (↓ 15.4%)
9	Preço SC	5.85 (↓ 40.0%)	28	5.0 (↑ 25.0%)	27.0 (↑ 28.6%)	0.0 (↓ 100.0%)	1125.0 (↓ 18.2%)	7607744,20 (↑ 8.6%)
10	Preço SC	13.65 (↑ 40.0%)	28	5.0 (↑ 25.0%)	12.0 (↓ 42.9%)	0.0 (↓ 100.0%)	1550.0 (↑ 12.7%)	7607744,20 (↑ 8.6%)
11	C-rate	2.0 (↓ 66.7%)	26.0 (↓ 7.1%)	5.0 (↑ 25.0%)	26.0 (↑ 23.8%)	0.0 (↓ 100.0%)	1025.0 (↓ 25.5%)	3012843,17 (↓ 57.0%)
12	C-rate	10.0 (↑ 66.7%)	28	3.0 (↓ 25.0%)	12.0 (↓ 42.9%)	0.0 (↓ 100.0%)	1950.0 (↑ 41.8%)	7798359,24 (↑ 11.3%)
13	Min $N_{m,b}$	8.0 (↓ 46.7%)	28	4	21	1	1375	7006170,727
14	Min $N_{m,b}$	22.0 (↑ 46.7%)	28	4	21	1	1375	7006170,727
15	Min $N_{m,sc}$	6.0 (↓ 45.5%)	28	4	21	1	1375	7006170,727
16	Min $N_{m,sc}$	18.0 (↑ 63.6%)	28	4	21	1	1375	7006170,727

Figura B.1 – Comparação entre o VPL considerando a configuração ótima e a configuração base para a Mina de Araxá.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela B.2 mostra que, ao variar determinados parâmetros, ocorreram modificações no dimensionamento do banco de armazenamento em alguns cenários. Isso indica que o caso base deixa de ser a solução ótima quando submetido a essas alterações, evidenciando a sensibilidade do sistema às condições econômicas e tecnológicas avaliadas. Para comparar o desempenho do caso base com o novo dimensionamento

ótimo obtido pelo algoritmo, foi elaborado o gráfico apresentado na Figura B.1, no qual são analisados os valores de VPL para cada cenário considerando ambas as configurações.

Apesar de a configuração base não ser ideal para todos os cenários, em todos os casos o projeto e a implementação de um banco de armazenamento híbrido mostraram-se lucrativos, considerando uma Taxa Interna de Retorno de 10% ao ano. No melhor cenário, essa configuração proporcionaria um lucro de R\$ 10.136.925,27, enquanto no pior cenário ainda resultaria em um lucro de R\$ 3.012.843,17, ambos considerando a mesma taxa interna de retorno. É importante destacar que esses valores referem-se ao retorno obtido por um único caminhão, sendo possível replicar a solução em diversos veículos do mesmo modelo, ampliando significativamente o lucro total e reduzindo ainda mais a pegada de carbono da operação.

B.2 Mina de Riacho dos Machados

Na Tabela B.3 está apresentado o resultado final do VPL considerando o banco de armazenamento ótimo obtido na Seção A.2, composto por $N_{m,b} = 27$, $N_{p,b} = 5$, $N_{m,sc} = 11$, $N_{p,sc} = 1$ e $P_{th} = 1525$ kW, variando de acordo com os parâmetros de sensibilidade definidos na Tabela 4.14. A primeira linha da tabela corresponde ao caso base, isto é, todos os parâmetros em seus valores de referência, enquanto as linhas subsequentes apresentam os resultados obtidos a partir da modificação individual de cada parâmetro avaliado. Em verde estão os parâmetros cujo valor absoluto foi aumentado em comparação com o caso base, e em vermelho aqueles cujo valor absoluto foi reduzido. Ao lado de cada valor, entre parênteses, encontra-se a porcentagem de variação em relação ao caso base. É importante destacar que nem todos os parâmetros influenciam o VPL de forma direta (isto é, nem sempre um aumento no valor absoluto do parâmetro implica aumento no VPL), havendo casos em que o efeito é inverso. A seguir, cada linha do resultado é detalhada

Tabela B.3 – Análise de sensibilidade considerando alterações dos parâmetros para o dimensionamento base para a Mina de Riacho dos Machados.

Cenário	Parametro Modificado	Alteração no Valor	VPL [R\$]	Sensibilidade
0	Caso base	-	8225071,583	-
1	Preco Diesel	3.69 (↓ 36.2%)	5030502.014483692 (↓ 38.8%)	1.071
2	Preco Diesel	7.46 (↑ 29.1%)	10792955.254596272 (↑ 31.2%)	1.072
3	Cotacao Dolar	4.58 (↓ 13.6%)	8307894.819695824 (↑ 1.0%)	-0.073
4	Cotacao Dolar	6.31 (↑ 19.1%)	8108888.986141818 (↓ 1.4%)	-0.073
5	Preco Razao Elepot	5.0 (↓ 50.0%)	8278071.5826097615 (↑ 0.6%)	-0.012
6	Preco Razao Elepot	20.0 (↑ 100.0%)	8119071.5826097615 (↓ 1.3%)	-0.013
7	Preco Bat	6.4 (↓ 50.0%)	8472359.70799596 (↑ 3.0%)	-0.060
8	Preco Bat	34.688 (↑ 171.0%)	7379346.193788972 (↓ 10.3%)	-0.060
9	Preco SC	5.85 (↓ 40.0%)	8228709.502609761 (↑ 0.0%)	0
10	Preco SC	13.65 (↑ 40.0%)	8221433.662609762 (↓ 0.0%)	0
11	C-rate	2.0 (↓ 66.7%)	3763351.2452997547 (↓ 54.2%)	0.812
12	C-rate	10.0 (↑ 66.7%)	8280266.355996675 (↑ 0.7%)	0.010

Fonte: Elaborado pelo autor.

individualmente.

Como forma de comparar os resultados apresentados na Tabela B.3, o algoritmo de otimização foi executado novamente para cada cenário. A tabela completa com os dados da análise de sensibilidade para o perfil da Mina de Riacho dos Machados encontra-se no Apêndice E. Ela apresenta as variações dos resultados de otimização obtidas a partir da alteração de parâmetros como o preço do diesel, a cotação do dólar, o custo da eletrônica de potência, o preço da bateria, o preço do supercapacitor, a Taxa C da bateria, o valor mínimo de módulos de bateria e o valor mínimo de módulos de supercapacitores. A modificação desses parâmetros afeta diretamente a capacidade do HESS de armazenar e absorver energia, influenciando, portanto, o Valor Presente Líquido, variável central do problema de otimização.

Sendo assim, para cada cenário apresentado na Tabela E.1, o algoritmo de otimização foi executado individualmente, resultando em diferentes configurações ótimas para os bancos de baterias e supercapacitores, bem como em distintos limites ótimos de potência. A tabela apresentada em Tabela B.4 resume esses resultados de forma consolidada.

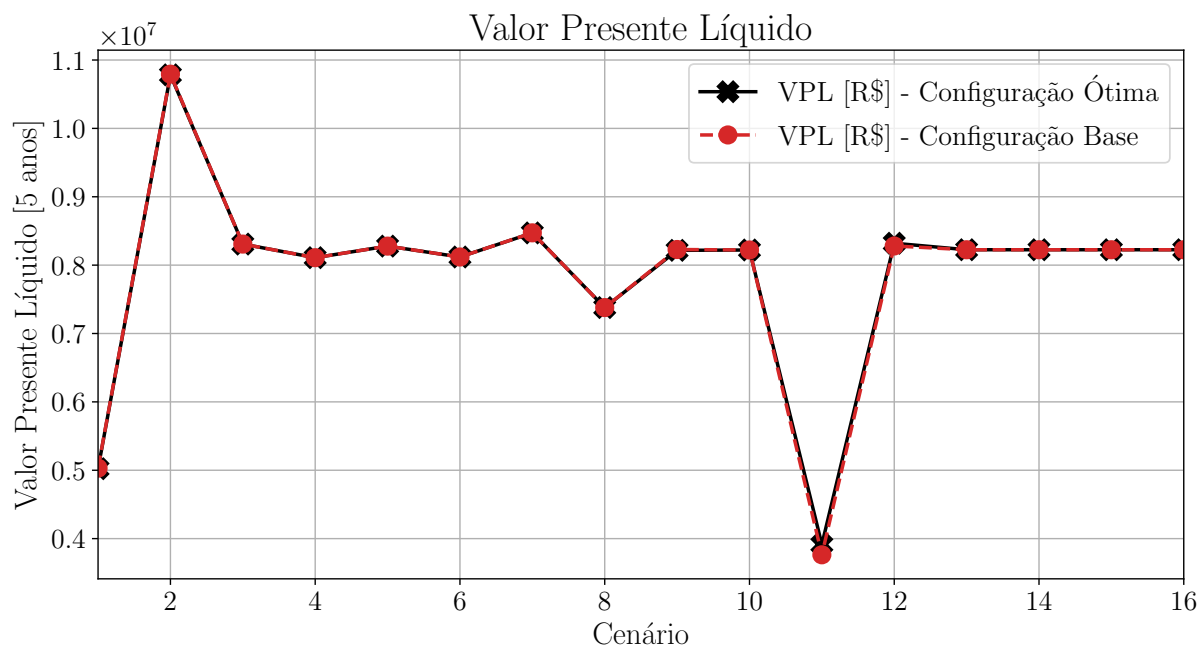
Tabela B.4 – Análise de sensibilidade considerando alterações dos parâmetros juntamente com o algoritmo de otimização para a Mina de Riacho dos Machados.

Cenário	Parâmetro Modificado	Alteração no Valor	$N_{m,b}$	$N_{p,b}$	$N_{m,sc}$	$N_{p,sc}$	Pth [kW]	VPL [R\$]
0	Caso base	-	27	5	11	1	1525	8225071,583
1	Preco Diesel	3.69 (↓ 36.2%)	28.0 (↑ 3.7%)	5	12.0 (↑ 9.1%)	0.0 (↓ 100.0%)	1150.0 (↓ 24.6%)	5022550.24 (↓ 38.9%)
2	Preco Diesel	7.46 (↑ 29.1%)	28.0 (↑ 3.7%)	5	18.0 (↑ 63.6%)	0.0 (↓ 100.0%)	1100.0 (↓ 27.9%)	10783384.85 (↑ 31.1%)
3	Cotacao Dolar	4.58 (↓ 13.6%)	27	5	11	1	1525	8307894.81 (↑ 1.0%)
4	Cotacao Dolar	6.31 (↑ 19.1%)	27	5	11	1	1525	8108888.98 (↓ 1.5%)
5	Preco Razao Elepot	5.0 (↓ 50.0%)	27	5	11	1	1525	8278071.58 (↑ 0.6%)
6	Preco Razao Elepot	20.0 (↑ 100.0%)	27	5	11	1	1525	8119071.58 (↓ 1.3%)
7	Preco Bat	6.4 (↓ 50.0%)	28.0 (↑ 3.7%)	5	15.0 (↑ 36.4%)	0.0 (↓ 100.0%)	1275.0 (↓ 16.4%)	8471241.74 (↑ 3.0%)
8	Preco Bat	34.688 (↑ 171.0%)	27	5	11	1	1525	7379346.19 (↓ 10.3%)
9	Preco SC	5.85 (↓ 40.0%)	28.0 (↑ 3.7%)	5	18.0 (↑ 63.6%)	0.0 (↓ 100.0%)	1100.0 (↓ 27.9%)	8216222.48 (↓ 0.1%)
10	Preco SC	13.65 (↑ 40.0%)	27	5	11	1	1525	8221433.66 (↓ 0.0%)
11	C-rate	2.0 (↓ 66.7%)	28.0 (↑ 3.7%)	5	12.0 (↑ 9.1%)	0.0 (↓ 100.0%)	1050.0 (↓ 31.1%)	3913775.47 (↓ 52.4%)
12	C-rate	10.0 (↑ 66.7%)	27	5	18.0 (↑ 63.6%)	0.0 (↓ 100.0%)	1400.0 (↓ 8.2%)	8320296.85 (↑ 1.2%)
13	Nm_b min	8.0 (↓ 46.7%)	27	5	11	1	1525	8225071,583
14	Nm_b min	22.0 (↑ 46.7%)	27	5	11	1	1525	8225071,583
15	Nm_uc min	6.0 (↓ 45.5%)	27	5	11	1	1525	8225071,583
16	Nm_uc min	18.0 (↑ 63.6%)	27	5	11	1	1525	8225071,583

A Tabela B.4 mostra que, ao variar determinados parâmetros, ocorreram modificações no dimensionamento do banco de armazenamento em alguns cenários. Isso indica que o caso base deixa de ser a solução ótima quando submetido a essas alterações, evidenciando a sensibilidade do sistema às condições econômicas e tecnológicas avaliadas. Para comparar o desempenho do caso base com o novo dimensionamento ótimo obtido pelo algoritmo, foi elaborado o gráfico apresentado na Figura B.2, no qual são analisados os valores de VPL para cada cenário considerando ambas as configurações.

Apesar de a configuração base não ser ideal para todos os cenários, em todos os casos o projeto e a implementação de um banco de armazenamento híbrido mostraram-se

Figura B.2 – Comparação entre o VPL considerando a configuração ótima e a configuração base para a Mina de Riacho dos Machados.



Fonte: Elaborado pelo autor.

lucrativos, considerando uma Taxa Interna de Retorno de 10% ao ano. No melhor cenário, essa configuração proporcionaria um lucro de R\$ 10.783.384,85, enquanto no pior cenário ainda resultaria em um lucro de R\$ 3.913.775,47, ambos considerando a mesma taxa interna de retorno. É importante destacar que esses valores referem-se ao retorno obtido por um único caminhão, sendo possível replicar a solução em diversos veículos do mesmo modelo, ampliando significativamente o lucro total e reduzindo ainda mais a pegada de carbono da operação.

Tabela de Sensibilidade para a Mina de Conceição do Mato Dentro

Tabela C.1 – Tabela de análise de sensibilidade para a Mina de Conceição do Mato Dentro.

Parametro variado	Preco Diesel [R\$]	Cotacao Dolar	Preco Elapot [USD/kWh]	Preco Elapot [R\$/kWh]	Bat [USD]	Bat [R\$]	UC [USD]	UC [R\$]	C-rate	Min Nm_b	Min Nm_uc	Nm_b	Np_b	Nm_uc	Np_uc	Volume Total [L]	Energia Bat. [kWh]	Energia U.C. [kWh]	Energia Total [kWh]	Pth [kW]	VPL [R\$]
0 Ciso base	5,78	5,3	10	53	12,8	67,84	9,75	51,675	6	15	11	28	4	14	3	1401,344	229,376	2,6208	231,9968	1600	12217613,51
1 Preco Diesel	3,69	5,3	10	53	12,8	67,84	9,75	51,675	6	15	11	28	5	13	0	1335,04	286,72	0	286,72	1500	8450773,838
2 Preco Diesel	7,40	5,3	10	53	12,8	67,84	9,75	51,675	6	15	11	28	5	14	0	1335,04	286,72	0	286,72	1275	17942054,37
3 Cotacao Dolar	5,78	4,58	10	45,8	12,8	58,024	9,75	44,655	6	15	11	28	5	14	0	1335,04	286,72	0	286,72	1275	13825009,19
4 Cotacao Dolar	5,78	6,31	10	63,1	12,8	80,768	9,75	61,9226	6	15	11	28	5	13	0	1335,04	286,72	0	286,72	1500	13552014,22
5 Preco Ramo Elapot	5,78	5,3	5	26,5	12,8	67,84	9,75	51,675	6	15	11	28	4	14	3	1401,344	229,376	2,6208	231,9968	1600	12217613,51
6 Preco Ramo Elapot	5,78	5,3	20	106	12,8	67,84	9,75	51,675	6	15	11	28	4	14	3	1401,344	229,376	2,6208	231,9968	1600	12217613,51
7 Preco Bat	5,78	5,3	10	53	6,4	33,92	9,75	51,675	6	15	11	28	4	14	3	1401,344	229,376	2,6208	231,9968	1600	12217613,51
8 Preco Bat	5,78	5,3	10	53	34,088	183,8464	9,75	51,675	6	15	11	28	4	14	2	1401,344	229,376	2,6208	231,9968	1600	12217613,51
9 Preco UC	5,78	5,3	10	53	12,8	67,84	5,85	31,005	6	15	11	28	4	14	3	1401,344	229,376	2,6208	231,9968	1600	12217613,51
10 Preco UC	5,78	5,3	10	53	12,8	67,84	13,65	72,345	6	15	11	28	5	13	0	1335,04	286,72	0	286,72	1500	13712518,22
11 C-rate	5,78	5,3	10	53	12,8	67,84	9,75	51,675	2	15	11	27	5	16	1	1414,336	276,48	0,9984	277,4784	1600	6002769,071
12 Nm_b min	5,78	5,3	10	53	12,8	67,84	9,75	51,675	10	15	11	27	4	20	0	1029,888	221,184	0	221,184	1175	14192890,33
13 Nm_b min	5,78	5,3	10	53	12,8	67,84	9,75	51,675	6	8	11	28	4	14	3	1401,344	229,376	2,6208	231,9968	1600	12217613,51
14 Nm_uc min	5,78	5,3	10	53	12,8	67,84	9,75	51,675	6	22	11	28	4	14	3	1401,344	229,376	2,6208	231,9968	1600	12217613,51
15 Nm_uc min	5,78	5,3	10	53	12,8	67,84	9,75	51,675	6	15	6	28	4	14	3	1401,344	229,376	2,6208	231,9968	1600	12217613,51
16 Nm_uc min	5,78	5,3	10	53	12,8	67,84	9,75	51,675	6	15	18	28	4	14	3	1401,344	229,376	2,6208	231,9968	1600	12217613,51

Tabela C.2 – Simulação do perfil base para todos os cenários da análise de sensibilidade - Mina de Conceição do Mato Dentro.

Parametro variado	Preco Diesel [R\$]	Cotacao Dolar	Preco Elapot [USD/kWh]	Preco Elapot [R\$/kWh]	Bat [USD]	Bat [R\$]	UC [USD]	UC [R\$]	C-rate	Min Nm_b	Min Nm_uc	Nm_b	Np_b	Nm_uc	Np_uc	Volume Total [L]	Energia Bat. [kWh]	Energia U.C. [kWh]	Energia Total [kWh]	Pth [kW]	VPL [R\$]
Preco Diesel	3,69	5,3	10	53	12,8	67,84	9,75	51,675	6	15	11	28	4	14	3	1401,344	229,376	2,6208	231,9968	1600	7534572,495
Preco Diesel	7,40	5,3	10	53	12,8	67,84	9,75	51,675	6	15	11	28	4	14	3	1401,344	229,376	2,6208	231,9968	1600	15981971,03
Cotacao Dolar	5,78	4,58	10	45,8	12,8	58,024	9,75	44,655	6	15	11	28	4	14	3	1401,344	229,376	2,6208	231,9968	1600	12917266,15
Cotacao Dolar	5,78	6,31	10	63,1	12,8	80,768	9,75	61,9226	6	15	11	28	4	14	3	1401,344	229,376	2,6208	231,9968	1600	12077820,18
Preco Ramo Elapot	5,78	5,3	5	26,5	12,8	67,84	9,75	51,675	6	15	11	28	4	14	3	1401,344	229,376	2,6208	231,9968	1600	12111613,51
Preco Bat	5,78	5,3	20	106	12,8	67,84	9,75	51,675	6	15	11	28	4	14	3	1401,344	229,376	2,6208	231,9968	1600	12111613,51
Preco Bat	5,78	5,3	10	53	6,4	33,92	9,75	51,675	6	15	11	28	4	14	3	1401,344	229,376	2,6208	231,9968	1600	12514035,17
Preco UC	5,78	5,3	10	53	34,088	183,8464	9,75	51,675	6	15	11	28	4	14	3	1401,344	229,376	2,6208	231,9968	1600	11203851,43
Preco UC	5,78	5,3	10	53	12,8	67,84	5,85	31,005	6	15	11	28	4	14	3	1401,344	229,376	2,6208	231,9968	1600	12231003,75
Preco UC	5,78	5,3	10	53	12,8	67,84	13,65	72,345	6	15	11	28	4	14	3	1401,344	229,376	2,6208	231,9968	1600	12203723,27
C-rate	5,78	5,3	10	53	12,8	67,84	9,75	51,675	2	15	11	28	4	14	3	1401,344	229,376	2,6208	231,9968	1600	1089392,037
C-rate	5,78	5,3	10	53	12,8	67,84	9,75	51,675	10	15	11	28	4	14	3	1401,344	229,376	2,6208	231,9968	1600	13759833,52
Nm_b min	5,78	5,3	10	53	12,8	67,84	9,75	51,675	6	8	11	28	4	14	3	1401,344	229,376	2,6208	231,9968	1600	12217613,51
Nm_b min	5,78	5,3	10	53	12,8	67,84	9,75	51,675	6	22	11	28	4	14	3	1401,344	229,376	2,6208	231,9968	1600	12217613,51
Nm_uc min	5,78	5,3	10	53	12,8	67,84	9,75	51,675	6	15	6	28	4	14	3	1401,344	229,376	2,6208	231,9968	1600	12217613,51
Nm_uc min	5,78	5,3	10	53	12,8	67,84	9,75	51,675	6	15	18	28	4	14	3	1401,344	229,376	2,6208	231,9968	1600	12217613,51

Tabela de Sensibilidade para a Mina de Araxá

Tabela D.1 – Tabela de análise de sensibilidade para a Mina de Araxá.

Id.	Parâmetro variado	Preço Diesel [R\$]	Cotação Dólar	Preço Elepot [USD/kW]	Preço Elepot [R\$/kW]	Bat [USD]	Bat [R\$]	UC [USD]	UC [R\$]	C-rate	Min Nm,b	Min Nm,ue	Nm,b	Np,b	Nm,ue	Np,ue	Volume Total [L]	Energia Bat. [kWh]	Energia UC. [kWh]	Energia Total [kWh]	Pth [kW]	VPL [R\$]
0		3,69	5,3	10	53	12,8	67,84	9,75	51,675	6	15	11	28	5	12	0	1335,04	286,72	0	286,72	1150	4461322,319
1	Preço Diesel	7,46	5,3	10	53	12,8	67,84	9,75	51,675	6	15	11	27	5	13	1	1309,328	276,48	0,8112	277,2912	1400	9460600,556
2	Cotação Dólar	5,78	4,58	10	45,8	12,8	58,624	9,75	44,655	6	15	11	28	4	21	1	1234,688	229,376	1,3104	230,6864	1375	7143157,4
3	Preço Elepot	5,78	6,31	10	63,1	12,8	86,768	9,75	61,3225	6	15	11	28	5	13	0	1335,04	286,72	0	286,72	1225	7392944,872
4	Preço Elepot	5,78	5,3	5	25,5	12,8	67,84	9,75	51,675	6	15	11	28	4	24	1	1258,496	229,376	1,4976	230,8736	1425	7018334,275
5	Preço Elepot	5,78	5,3	2	12,2	12,8	67,84	9,75	51,675	6	15	11	28	4	24	1	1258,496	229,376	1,4976	230,8736	1425	6965234,275
6	Preço Bat	5,78	5,3	10	53	14,4	39,92	9,75	51,675	6	15	11	28	5	14	0	1335,04	286,72	0	286,72	1625	8101655,729
7	Preço Bat	5,78	5,3	10	53	34,688	183,8464	9,75	51,675	6	15	11	27	5	15	0	1287,36	276,48	0	276,48	1550	5924488,803
8	Preço UC	5,78	5,3	10	53	12,8	67,84	5,85	31,005	6	15	11	28	5	25	0	1335,04	286,72	0	286,72	1375	7607744,307
9	Preço UC	5,78	5,3	10	53	12,8	67,84	13,65	72,345	6	15	11	28	5	13	0	1335,04	212,992	3,2448	216,2368	1025	2601760,557
10	C-rate	5,78	5,3	10	53	12,8	67,84	9,75	51,675	2	15	11	26	4	26	2	1404,416	172,032	0	172,032	1950	7798359,346
11	C-rate	5,78	5,3	10	53	12,8	67,84	9,75	51,675	10	15	11	28	3	13	0	801,024	229,376	1,4976	230,8736	1425	6965234,275
12	Nm,b min	5,78	5,3	10	53	12,8	67,84	9,75	51,675	6	8	11	28	4	24	1	1258,496	229,376	1,4976	230,8736	1425	6965234,275
13	Nm,b min	5,78	5,3	10	53	12,8	67,84	9,75	51,675	6	22	11	28	4	24	1	1258,496	229,376	1,4976	230,8736	1425	6965234,275
14	Nm,ue min	5,78	5,3	10	53	12,8	67,84	9,75	51,675	6	15	6	28	4	24	1	1258,496	229,376	1,4976	230,8736	1425	6965234,275
15	Nm,ue min	5,78	5,3	10	53	12,8	67,84	9,75	51,675	6	15	18	28	4	24	1	1258,496	229,376	1,4976	230,8736	1425	6965234,275

Tabela de Sensibilidade para a Mina de Riacho dos Machados

Tabela E.1 – Tabela de análise de sensibilidade para a Mina de Riacho dos Machados.

Id.	Parâmetro variado	Preço Diesel [R\$]	Cotação Dólar	Preço Elepot [USD/kW]	Preço Elepot [R\$/kW]	Bat [USD]	Bat [R\$]	UC [USD]	UC [R\$]	C-rate	Min Nm.b	Min Nm.uc	Nm.b	Np.b	Nm.uc	Np.uc	Volume Total [L]	Energia Bat. [kWh]	Energia UC. [kWh]	Energia Total [kWh]	Pch [kW]	VPL [R\$]
0		3,69	5,3	10	53	12,8	67,84	9,75	51,675	6	15	11	28	5	13	0	1335,04	286,72	0	286,72	1050	5025071,583
1	Preço Diesel	7,46	5,3	10	53	12,8	67,84	9,75	51,675	6	15	11	28	5	26	0	1335,04	286,72	0	286,72	1050	10783384,85
2	Cotação Dólar	5,78	4,58	10	45,8	12,8	58,624	9,75	44,655	6	15	11	27	5	11	1	1374,656	276,48	0,6864	277,1664	1325	8307894,82
3	Preço Elepot	5,78	6,31	10	63,1	12,8	86,768	9,75	61,5225	6	15	11	28	4	12	1	1363,654	229,376	0,7488	230,1248	1325	7651920,106
4	Preço Bat	5,78	5,3	5	25,5	12,8	67,84	9,75	51,675	6	15	11	27	5	11	1	1374,656	276,48	0,6864	277,1664	1325	8278071,583
5	Preço Bat	5,78	5,3	2	12,8	12,8	67,84	9,75	51,675	6	15	11	27	5	11	1	1374,656	276,48	0,6864	277,1664	1325	8471241,349
6	Preço Bat	5,78	5,3	10	53	14,4	39,92	9,75	51,675	6	15	11	28	5	14	0	1335,04	286,72	0,8112	287,5912	1325	7376041,349
7	Preço Bat	5,78	5,3	10	53	34,688	183,8464	9,75	51,675	6	15	11	27	5	13	1	1390,528	286,72	0	286,72	1000	8216222,482
8	Preço UC	5,78	5,3	10	53	12,8	67,84	5,85	31,005	6	15	11	28	5	26	0	1335,04	286,72	0	286,72	1000	8216222,482
9	Preço UC	5,78	5,3	10	53	12,8	67,84	13,65	72,345	6	15	11	27	5	15	1	1406,4	276,48	0,936	277,416	1225	7951958,047
10	C-rate	5,78	5,3	10	53	12,8	67,84	9,75	51,675	2	15	11	28	5	13	0	1335,04	286,72	0	286,72	1000	3913775,475
11	C-rate	5,78	5,3	10	53	12,8	67,84	9,75	51,675	10	15	11	28	5	14	0	1335,04	286,72	0	286,72	1000	8304834,473
12	Nm.b min	5,78	5,3	10	53	12,8	67,84	9,75	51,675	6	8	11	27	5	11	1	1374,656	276,48	0,6864	277,1664	1525	8225071,583
13	Nm.b min	5,78	5,3	10	53	12,8	67,84	9,75	51,675	6	22	11	27	5	11	1	1374,656	276,48	0,6864	277,1664	1525	8225071,583
14	Nm.uc min	5,78	5,3	10	53	12,8	67,84	9,75	51,675	6	15	6	27	5	11	1	1374,656	276,48	0,6864	277,1664	1525	8225071,583
15	Nm.uc min	5,78	5,3	10	53	12,8	67,84	9,75	51,675	6	15	18	27	5	11	1	1374,656	276,48	0,6864	277,1664	1525	8225071,583