

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA FERROVIÁRIA E METROVIÁRIA

DANIEL CHAMPOSKI

ANÁLISE DO POTENCIAL DE REGENERAÇÃO DE ENERGIA ATRAVÉS DO
FREIO DINÂMICO EM LOCOMOTIVAS DIESEL-ELÉTRICAS

Joinville

2024

DANIEL CHAMPOSKI

ANÁLISE DO POTENCIAL DE REGENERAÇÃO DE ENERGIA ATRAVÉS DO
FREIO DINÂMICO EM LOCOMOTIVAS DIESEL-ELÉTRICAS

Trabalho apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ferroviária e Metroviária do Centro Tecnológico de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador(a): Dr. Milton Evangelista de Oliveira Filho.

Joinville

2024

DANIEL CHAMPOSKI

ANÁLISE DO POTENCIAL DE REGENERAÇÃO DE ENERGIA ATRAVÉS DO
FREIO DINÂMICO EM LOCOMOTIVAS DIESEL-ELÉTRICAS

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ferroviária e Metroviária, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 27 de junho de 2024.

Banca Examinadora:

Dr. Milton Evangelista de Oliveira Filho
Orientador/Presidente
Universidade Federal de Santa Catarina

Dr. Alexandre Mikowski
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

Eng. Vinícius dos Santos Sanches
Membro
Rumo Logística

Champoski, Daniel

Análise do Potencial de Regeneração de Energia Através do Freio Dinâmico em Locomotivas Diesel-Elétricas / Daniel Champoski ; orientador, Milton Evangelista de Oliveira Filho, 2024.

115 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville, Graduação em Engenharia Ferroviária e Metroviária, Joinville, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia Ferroviária e Metroviária. 2. Locomotiva híbrida. 3. Regeneração de energia. 4. Frenagem regenerativa. 5. Freio dinâmico. I. Oliveira Filho, Milton Evangelista de. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Ferroviária e Metroviária. III. Título.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, à toda minha família. Em especial a meus pais, Ana Rita e Dorival, e minhas irmãs Adriana e Daniela, que sempre instigaram minha curiosidade sobre os mais diversos assuntos e me auxiliaram a chegar neste momento desde muito antes de eu sequer saber que gostaria de ingressar neste curso.

Aos membros desta banca e professores Milton Evangelista, Alexandre Mikowski, Yesid Ernesto Asaff Mendoza, Wagner Maurício Pachecoski, Marcus Vinicius Volponi Mortean, Felipe Zimann, Filipe Dutra da Silva e tantos outros que fizeram parte desta jornada e me motivaram a me aprofundar nos assuntos relacionados ao curso.

Em especial, ao professor Claudimir Antonio Carminatti, que me abriu as portas para a pesquisa e acompanhou boa parte da minha graduação com conselhos, ensinamentos, e suporte sempre que precisei.

Ao pessoal da Rumo Logística, Nayara Siementkowski, Vinícius Sanches, Victor Pereira, Felipe Medes e tantos outros que sempre foram solícitos e receptivos ao longo de toda a graduação e, em especial, durante a construção deste trabalho.

Por último, mas não menos importante, a todos os amigos de dentro e fora da UFSC que fiz ao longo desses anos. Sei que levarei a amizade de vocês para a vida.

RESUMO

A necessidade de redução de consumo de combustíveis fósseis, agravada pelas mudanças climáticas, e à busca por redução de custo operacional demonstram a necessidade de busca de alternativas menos poluentes. Diante dessas premissas, este trabalho apresenta um estudo do potencial de utilização da energia gerada pelo freio dinâmico em locomotivas. A partir de dados do registrador de eventos, buscou-se valorar o potencial regenerativo de locomotivas, com método definido a partir da adaptação de diversos trabalhos realizados acerca deste tema nos últimos anos. Após avaliar as características da operação ferroviária em sentido importação e exportação no trecho entre Rondonópolis – MT e Santos – SP, utilizou-se dos dados de operação de 9 locomotivas em posições distintas ao longo do trecho e avaliou-se a utilização da energia dissipada para alimentação do circuito auxiliar, dos motores de tração e de ambos os sistemas. Após a definição de tamanho ideal de banco de baterias para cada posição, e de definição de avaliação de baterias de tecnologia LTO (Titanato de Lítio), NMC (Níquel-manganês-cobalto) e LiFePO₄ (Lítio-Ferro-Fosfato) encontradas a preço de mercado, valorou-se o potencial de economia financeira e de combustível. A tecnologia LiFePO₄ demonstrou ser mais promissora para o setor ferroviário, apresentando vantagens dimensionais e menor investimento inicial. Sugere-se aplicação via motor de tração, alimentando em paralelo ao sistema de geração de energia via motor diesel. O sistema demonstrou potencial de economia de combustível de 2,90% via circuito auxiliar, 12,50% via motor de tração e 13,44% no modo combinado, e economia financeira de 2,16% via circuito auxiliar, 11,91% via motor de tração e 12,84% no modo combinado. Os resultados deste estudo demonstram que o sistema de tração híbrido com energia regenerada a partir do freio dinâmico apresenta potencial de redução de emissões e custos, otimizando a operação ferroviária.

Palavras-chave: Locomotiva diesel-elétrica. Locomotiva híbrida. Freio dinâmico. Regeneração de energia. Frenagem regenerativa.

ABSTRACT

The need to reduce the consumption of fossil fuels, aggravated by climate change, and the search for operating cost reductions demonstrate the need to look for less polluting alternatives. Given these premises, this work presents a study of the promising use of the energy generated by the dynamic braking in locomotives. Using data from the event recorder, it is used a method defined by adapting various studies carried out on this subject in recent years. After evaluating the characteristics of railway operations in the import and export direction on the railway between Rondonópolis - MT and Santos - SP, operating data from 9 locomotives in different positions along the railway was used to evaluate the amount of dissipated energy during the braking process in order to regenerate it to power the auxiliaries, the traction motors and both systems. After defining the ideal battery bank size for each position, and checking out the LTO, NMC and LiFePO₄ technology batteries found at market prices, the probable financial and fuel savings were evaluated. LiFePO₄ technology proved to be more promising for the railway sector, presenting advantages in terms of dimensions and lower initial investment. It is suggested to be applied via a traction motor, feeding in parallel to the power generation system via diesel engine. The system demonstrated possible fuel savings of 2,90% via the auxiliaries, 12,50% via the traction motor and 13,44% in combined mode, and financial savings of 2,16% via the auxiliaries, 11,91% via the traction motor and 12,84% in combined mode. The results of this study show that the hybrid traction system with energy regenerated from the dynamic brake has the potential to reduce emissions and costs, optimizing rail operations.

Keywords: Diesel-Electric Locomotive. Hybrid Locomotive. Dynamic Braking. Energy Regeneration. Regenerative Braking.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Cadeia de transmissão de energia em locomotiva diesel-elétrica.....	19
Figura 2: Motor Diesel ferroviário EMD 1010 T4	22
Figura 3: Topologia de uma locomotiva CA-CA	24
Figura 4: Gerador principal e excitatriz.....	25
Figura 5: Esquema básico do circuito do estator do gerador (esquerda) e da ponte retificadora (direita)	27
Figura 6: Retificador ferroviário	28
Figura 7: Circuito de um inversor trifásico em ponte	29
Figura 8: Circuito elevador de tensão.....	30
Figura 9: Motor de tração de uma locomotiva	32
Figura 10 - Pinhão e engrenagem utilizados no motor de tração e rodeiro	34
Figura 11 - Modelo de banco de resistores.	37
Figura 12: Curva de esforço x velocidade no freio dinâmico CC faixa ampliada.....	38
Figura 13: Curva de esforço x velocidade no freio dinâmico CA.	39
Figura 14: Diagrama simplificado de arquitetura híbrida em locomotivas	41
Figura 15: Locomotiva Híbrida GT38H.....	42
Figura 16: Protótipo de sistema de captação de energia a partir da vibração do trilho.	43
Figura 17: Vagão com painéis fotovoltaicos.....	44
Figura 18: Diagrama esquemático de uma bateria.....	45
Figura 19: Diagrama esquemático de um capacitor de dupla camada.....	50
Figura 20: Diagrama esquemático de um <i>flywheel</i>	52
Figura 21: dados do registrador de eventos apresentados em uma planilha do Excel.	55
Figura 22: Trechos percorridos pelos trens avaliados neste trabalho	56
Figura 23: Variação de potência dissipada de acordo com a porcentagem de utilização do freio dinâmico	59
Figura 24: Utilização de cada ponto de marcha para todas as locomotivas no trecho exportação.....	63
Figura 25: Utilização de cada ponto de marcha para a locomotiva Helper	64

Figura 26: Utilização de cada ponto de marcha para o trecho ZPT-ZAR	65
Figura 27: Utilização de cada ponto de marcha para o trecho ZAR-TRO	66
Figura 28: Ocorrência de cada modo dos motores de tração nos dados analisados	70
Figura 29: Aplicação do freio dinâmico no trecho exportação	70
Figura 30: Faixas de velocidade da utilização do freio dinâmico no sentido exportação.....	71
Figura 31: Potência de aplicação do freio dinâmico pela locomotiva Helper.....	72
Figura 32: Faixas de velocidade da utilização do freio dinâmico no trecho ZPT-ZAR	73
Figura 33: Potência de aplicação do freio dinâmico no trecho ZPT-ZAR	73
Figura 34: Faixas de velocidade da utilização do freio dinâmico no trecho ZAR-TRO	74
Figura 35: Potência de aplicação do freio dinâmico no trecho ZAR-TRO	74
Figura 36: Fluxo de energia no sistema de tração, com as eficiências relacionadas	77
Figura 37: progressão do total percentual regenerado via motor de tração para as referências.....	88
Figura 38: progressão do total percentual regenerado no modo combinado para as referências.....	92
Figura 39: Comparação de comportamento de recarga entre as referências 1 (A), 3 (B), 6 (C) e 2-7-9 (D)	94
Figura 40: informação da taxa de carga da bateria LTO	96
Figura 41: informação da taxa de carga da bateria NMC	96
Figura 42: informação da taxa de carga da bateria LiFePO4	97
Figura 43: Posição aproximada do banco de baterias na locomotiva	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Dados sobre os trens analisados.	57
Tabela 2: Dados de consumo da locomotiva AC44i.....	58
Tabela 3: Dados de potência auxiliar durante uso do freio dinâmico da AC44i.....	58
Tabela 4: Valores de teste de potência em uma locomotiva ES44ACi.....	60
Tabela 5: Energia relacionada ao esforço trator e consumo de cada locomotiva	67
Tabela 6: Dados relacionados à eficiência do ciclo de tração.	69
Tabela 7: Energia dissipada pelo freio dinâmico nas locomotivas analisadas	76
Tabela 8: Conversão de valores da energia dissipada [MJ], Volume [L] e custo [R\$]	79
Tabela 9: Dados de consumo do circuito auxiliar para as locomotivas analisadas ...	80
Tabela 10: Energia dissipada nos resistores vs. energia consumida no circuito auxiliar.....	81
Tabela 11: Energia dissipada nos resistores vs. energia consumida para cada posição.....	82
Tabela 12: Resultado da aplicação da equação 19 nas referências	83
Tabela 13: Resultados de regeneração para cada veículo	84
Tabela 14: comparação entre energia dissipada e energia do esforço trator.....	86
Tabela 15: Valores do eixo das abscissas para a Figura 37, em kWh.....	88
Tabela 16: Linha de tendência e R^2 da regeneração para as referências	89
Tabela 17: comparação entre energia dissipada e energia do esforço trator.....	90
Tabela 18: Linha de tendência e R^2 da regeneração no modo combinado para as referências.....	93
Tabela 19: tamanho dos bancos avaliados e reserva necessária.	93
Tabela 20: Dados das baterias utilizadas no estudo	95
Tabela 21: Tamanhos considerados para cada caso.	98
Tabela 22: Porcentagem de absorção de pico de energia	99
Tabela 23: Quantidade de células necessárias para cumprir o requisito energético.	99
Tabela 24: comprimento do banco, baseado na dimensão disponível.....	100
Tabela 25: Peso equivalente do banco de baterias (em kg).	100
Tabela 26: Custo de aquisição das baterias para cada caso, em reais.	101

Tabela 27: Valores de economia via circuito auxiliar, para os bancos da Tabela 20.	101
Tabela 28: Dados relacionados à vida útil das baterias, consumo via circuito auxiliar.	102
Tabela 29: Valores de economia via motor de tração, para os bancos da Tabela 21.	103
Tabela 30: Dados relacionados à vida útil das baterias, consumo via motor de tração.	104
Tabela 31: Valores de economia no modo combinado, para os bancos da Tabela 20.	104
Tabela 32: Dados relacionados à vida útil das baterias, consumo combinado.	105
Tabela 33: Dados utilizados para o cálculo das porcentagens.....	106
Tabela 34: Resumo de economia estimada via circuito auxiliar.	107
Tabela 35: Resumo de economia estimada via motor de tração.....	108
Tabela 36: Resumo de economia estimada via modo combinado.	109

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANTT – Agência Nacional de Transportes Terrestres

CA – Corrente Alternada

CC – Corrente Contínua

CPTM – Companhia Paulista de Trens Metropolitanos

CTCN – Climate Technology Centre and Network

DB – Dynamic Brake

Hz – Hertz

IGBT – Insulated-Gate Bipolar Transistor

MATE – Motors for Added Tractive Effort

MOSFET – Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor

MT – Motor de Tração

ONU – Organização das Nações Unidas

PWM – Pulse Width Modulation

RMN – Rumo Malha Norte

RMP – Rumo Malha Paulista

RPM – Rotações por Minuto

TE – Tractive Effort

TRO – Terminal de Rondonópolis

VMA – Velocidade Máxima Autorizada

VSI – Voltage Source Inverter

ZAR – Pátio de Araraquara

ZEV – Pátio de Evangelista de Souza

ZPT – Zona Portuária de Santos

LISTA DE SÍMBOLOS

A_c	Área do cilindro de freio
Ah	Ampère-hora
C	Fator C
C/V	Ciclos por viagem
c_b	Capacitância da bateria
Diesel _s	Economia de combustível
E_{bat}	Capacidade de armazenamento da bateria
E_b	Energia na bateria
E_{CA}	Energia consumida no circuito auxiliar
E_{FD}	Energia gerada pelo freio dinâmico
E_{MT}	Energia consumida no motor de tração
E_R	Energia regenerada
E_s	Economia de energia
E_0	Carga inicial mínima
I_b	Corrente limite de carga
I_{FD}	Corrente sobre a grade do freio dinâmico
LiFePO ₄	Lítio-Ferro-Fosfato
LTO	Titanato de Lítio
NaNiCl ₂	Cloreto de sódio-níquel
N_b	Número de baterias necessárias
NMC	Níquel-manganês-cobalto
NaS	Sódio-Enxofre
P_{FD}	Potência atuando sobre a grade do freio dinâmico
P_i	Potência gerada no instante i
R_{FD}	Resistência de grade do freio dinâmico
SoC	Estado de carga
V	Volume
V_{eq}	Volume equivalente
V_b	Tensão da bateria
η_c	Eficiência do circuito de conversão
η_{MT}	Eficiência do motor de tração

η_T Eficiência do ciclo de tração
 η_{TL} Eficiência do circuito de transformação

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1. OBJETIVOS	17
1.1.1. Objetivo Geral	17
1.1.2. Objetivos Específicos	17
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1. LOCOMOTIVAS	18
2.1.1. Evolução energética	18
2.1.2. Tipos de serviço	20
2.1.3. Motor diesel ferroviário	21
2.2. SISTEMA DE TRAÇÃO ELÉTRICA	23
2.2.1. Geradores	24
2.2.2. Retificador	27
2.2.3. Inversor	29
2.2.3. Conversor CC-CC	29
2.3. MOTOR DE TRAÇÃO ELÉTRICA.....	30
2.4. MECÂNICA DO MOVIMENTO DE LOCOMOTIVAS	34
2.5. FREIO DINÂMICO	36
2.6. SISTEMAS DE REGENERAÇÃO DE ENERGIA	39
2.6.1. Regeneração de Energia Através do Freio Dinâmico	40
2.6.2. Outros Sistemas de Regeneração de Energia	42
2.7. SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA	44
2.7.1. Baterias	45
2.7.2. Supercapacitores	49
2.7.3 Flywheels	51
3. METODOLOGIA	53
3.1. PESQUISA	53
3.2. DADOS UTILIZADOS.....	54
3.3. INFORMAÇÕES TÉCNICAS DA LOCOMOTIVA GE AC44I.....	57
3.3. CONSIDERAÇÕES SOBRE O SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA	59

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	61
4.1. AVALIAÇÃO DA OPERAÇÃO NO TRECHO	61
4.1.1. Filtragem de Dados Úteis Para a Avaliação	61
4.1.2. Características da Operação no Trecho Exportação	62
4.1.3. Características da Operação no Trecho Importação	64
4.1.4. Utilização em Tração e Consumo	66
4.1.5. Utilização do Freio Dinâmico	69
4.2. ESTIMATIVA IDEAL DA ECONOMIA GERADA PELA ENERGIA REGENERADA	75
4.3. MODOS DE CONSUMO A SEREM CONSIDERADOS	79
4.3.1. Modo de Consumo Via Circuito Auxiliar	80
4.3.2. Modo de Consumo Via Motor de Tração	86
4.3.3. Modo de Consumo Combinado	90
4.4. AVALIAÇÃO DE BATERIAS E POTENCIAL ECONÔMICO	95
5. CONCLUSÃO	111
REFERÊNCIAS	113

1. INTRODUÇÃO

Com a expansão de consumo de energia, além dos transportes consumirem cerca de 30% da energia global, sendo a maior parte oriunda de fontes de combustível fóssil, se faz necessário o desenvolvimento de tecnologias que possam auxiliar na redução de emissão de dióxido de carbono, um dos principais responsáveis por mudanças climáticas. Visando este objetivo, uma das alternativas para a otimização energética de transportes é a regeneração de energia, cuja implementação pode auxiliar na redução de emissões, redução de consumo de combustível e suprir consumo de energia de outros sistemas (Pan *et al*, 2021).

O desenvolvimento tecnológico de componentes mecânicos de veículos ferroviários é considerado bem consolidado, com alguns sistemas não tendo mudanças significativas em décadas. Com isso, a busca por economia e redução em emissão de gases poluentes passa pela otimização de sistemas elétricos, podendo melhorar a eficiência do sistema como um todo ou de componentes internos que, embora individualmente não representam grandes valores de recuperação energética ou economia, quando somados podem representar parcela significativa do sistema.

A regeneração de energia através de frenagem dinâmica é tida como uma modalidade com grande potencial para auxiliar redução de emissões de gases poluentes nos próximos anos. Segundo a CTCN (Climate Technology Centre and Network), órgão da ONU (Organização das Nações Unidas) que oferece consultoria técnica e *network* em tecnologias de mitigação de impactos ambientais para países em desenvolvimento, há grande potencial em veículos de passageiros em áreas urbanas, com áreas densamente povoadas, como a região de Délhi, na Índia, apresentando redução de emissão de CO₂ em 30%. O desenvolvimento deste modelo em veículos de carga é mais recente, devido às características do sistema, como menor uso de frenagem para paradas em estações e maior necessidade de sistema interno de armazenamento de energia (CTCN, 2023).

Em veículos ferroviários de carga, a regeneração através do freio dinâmico apresenta alguns desafios, como o fato de que na maioria dos casos não estarem conectados à rede de distribuição de energia, necessitando de um sistema interno de armazenamento de energia. Na maioria dos casos, a energia gerada pelo motor

de tração durante a frenagem dinâmica é dissipada na forma de calor no banco de resistores. Entretanto, estudos apontam que a energia dissipada exclusivamente no banco de resistores das locomotivas representa entre 10 e 30% do consumo energético total do veículo. Além disso, pode-se obter economia entre 15 e 25% no consumo de combustível em locomotivas com sistema híbrido entre motor diesel e baterias (Moraes *et al.*, 2021).

Atualmente, alguns veículos ferroviários contam com esse sistema, principalmente veículos metroviários conectados à catenária. Algumas iniciativas utilizam parcial ou totalmente de energia proveniente de baterias para tração, como a GT38H, da Progress Rail, com sistema híbrido, e a FLXDrive, da Wabtec. Isso permite a reutilização de parte da energia dissipada pelo freio dinâmico, que antes seria dissipada via banco de resistores.

Dentro desse contexto, este trabalho busca avaliar o potencial de regeneração de energia através do freio dinâmico em locomotivas diesel-elétricas, a partir de dados de operação de locomotivas AC44i. Com os dados do registrador de eventos e informações técnicas do veículo, é possível estimar as características de operação, utilização, consumo e dissipação de energia para estes veículos e, a partir destes dados, estimar o tamanho necessário para um banco de baterias armazenar essa energia e redistribuir entre os motores de tração e/ou o circuito auxiliar.

Este trabalho apresenta um breve resumo sobre a operação de locomotivas, os principais componentes que participam do ciclo de tração, como motor diesel, geradores e motor de tração, a frenagem dinâmica, através do motor de tração e a dissipação de energia. Também apresenta os principais métodos de armazenamento que podem ser utilizados, além de suas vantagens e desvantagens.

A partir disso, avalia-se as condições de operação a partir de dados de 9 operações de locomotivas pela Rumo nas malhas Norte e Paulista nos anos de 2021 e 2022 para estimar o tamanho de um banco de baterias. Define-se diferentes métodos de reutilização de energia, calcula-se o estado do banco de baterias ao longo da operação, avalia-se a quantidade de energia utilizada e dissipada e, após estimar um tamanho padrão de banco de baterias, aplica-se a uma viagem completa como locomotiva comandante e comandada, além de avaliar utilização em locomotivas Helper e remotas. Com isso, pode-se estimar custos de implementação e potencial de economia do sistema de tração híbrido.

1.1. OBJETIVOS

Para estimar o potencial regenerativo da frenagem dinâmica em locomotivas, propõe-se:

1.1.1. Objetivo Geral

Avaliar o potencial de regeneração de energia através do freio dinâmico de uma locomotiva diesel-elétrica a partir de dados de campo.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Explorar métodos utilizados na bibliografia disponível e atuais aplicações de sistemas regenerativos em veículos ferroviários;
- Analisar o potencial regenerativo a partir de dados do registrador de eventos de locomotivas em uma rota completa;
- Dimensionar banco de baterias para armazenamento da energia regenerada;
- Avaliar a viabilidade de aplicação prática do sistema, dentro do escopo definido.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para se situar melhor em sistemas regenerativos e de armazenamento de energia, este capítulo traz alguns tópicos relevantes para o trabalho. Inicia-se com breve explicação do ciclo de geração de energia de uma locomotiva, trata-se do freio dinâmico e seu funcionamento, faz-se uma breve revisão de sistemas de regeneração de energia voltado para o âmbito ferroviário, e, por fim, descreve sistemas de armazenamento de energia.

2.1. LOCOMOTIVAS

Locomotivas são os principais veículos de tração no setor ferroviário de carga, sendo quem efetivamente movimenta a composição. Neste capítulo, trata-se de um breve histórico da evolução ao longo do tempo, seus principais sistemas e componentes no ciclo de tração relevantes para este estudo e um breve resumo de seu funcionamento.

2.1.1. Evolução energética

As locomotivas eram inicialmente movidas a vapor a partir da queima de carvão, com as primeiras linhas operacionais surgindo nos anos 1830 e continuando como principal tipo de locomotiva utilizada até o fim dos anos 1940. Devido a sua baixa eficiência energética (usualmente 6% da energia da combustão do carvão efetivamente era convertida em tração), dificuldade operacional, custo elevado de manutenção, entre outros fatores, acabou perdendo espaço para locomotivas a diesel ao longo do século XX (Profillidis, 2006).

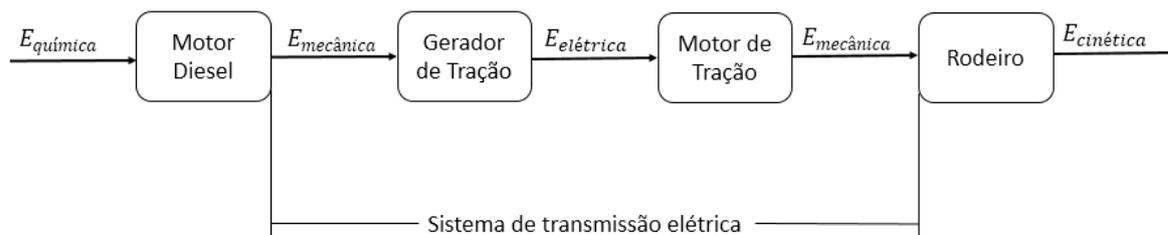
A partir dos anos 1930, locomotivas a diesel ganharam espaço no setor ferroviário, uma vez que o motor diesel se apresenta com maior eficiência energética (30%) frente ao ciclo a vapor, além de ter outras vantagens como menor custo de manutenção, por exemplo. A efetiva transição de locomotivas a vapor para locomotivas a diesel se deu nos anos 1940, com produções em larga escala inicialmente nos EUA, com posterior inserção na Europa e Ásia, naquele momento ainda se recuperando da Segunda Guerra Mundial. A produção de locomotivas a diesel, com maior necessidade de tecnologia industrial, incluindo processos como

montagem e instalação ocorrendo em plantas separadas, representou uma evolução significativa na indústria ferroviária global (Spiryagin *et al.*, 2014).

Os principais tipos de transmissão são mecânica, hidráulica e elétrica. Na transmissão mecânica, a potência do motor é transmitida para as rodas através de uma série de engrenagens e eixos. Já na transmissão hidráulica, a potência é transmitida por meio de fluidos pressurizados que movem pistões e válvulas para controlar a transmissão da força do motor para as rodas. Na transmissão elétrica, o motor a diesel aciona um gerador elétrico, que converte a energia mecânica em energia elétrica, que é transmitida para os motores elétricos, que estão acoplados aos eixos e movimentam as rodas da locomotiva. Além de locomotivas a diesel, locomotivas puramente elétricas também são utilizadas atualmente, com sua alimentação sendo através de bancos de baterias ou por sistemas de eletrificação da via, como catenária e terceiro trilho (Profillidis, 2006).

Atualmente, as locomotivas diesel-elétricas são o tipo mais utilizado no Brasil, e esse sistema é o alvo de estudo neste trabalho. Nesse tipo de veículo de tração, o motor diesel funciona como um gerador elétrico que alimenta o motor de tração, uma vez que motores elétricos têm melhor controle de tração que sistemas puramente mecânicos, além de que o motor diesel pode operar na maior parte do tempo na proximidade de seu ponto ótimo, gerando melhor eficiência do sistema como um todo. O motor de tração é quem efetivamente movimenta o rodeiro, através de um sistema de pinhão e engrenagem que liga o motor ao eixo (Borba, 2011). O ciclo de tração de locomotivas diesel-elétricas pode ser resumido no diagrama a seguir.

Figura 1: Cadeia de transmissão de energia em locomotiva diesel-elétrica



Adaptado de Borba (2011, p. 323).

2.1.2. Tipos de serviço

Os veículos ferroviários de tração e suas configurações de operação podem variar consideravelmente em função de diversos fatores, como o tipo de serviço no qual está sendo aplicado, perfil da ferrovia, necessidade de tração extra, entre outros. Em um cenário ideal, cada locomotiva utilizada seria projetada para uma ferrovia específica e para uma aplicação específica, mas essa configuração elevaria consideravelmente os custos de fabricação e superaria os ganhos em eficiência proporcionados. Assim, no Brasil, usualmente locomotivas mais antigas são direcionadas a serviços de pátio, como montagem de composições e direcionamento de vagões para manutenção, enquanto a efetiva operação de transporte é feita por veículos mais novos (Borba, 2009).

Em manobras de pátio, o uso de locomotivas de alta potência não é requisitado, uma vez que a montagem de composições costuma ser por partes, com um ou poucos vagões sendo conectados por vez, mesmo se estiverem carregados. Além disso, a montagem é um serviço de baixa velocidade, o que diminui a eficiência de veículos de tração mais elevada. Nesse caso, uma opção são locomotivas elétricas, com tração totalmente alimentada por baterias, que além de vantagens energéticas, como melhor eficiência, menor emissão e menor ruído no geral, possui melhor visibilidade devido a sua configuração usual ter uma estrutura menor do que de locomotivas com motor, o que ajuda em operações de pátio (Borba, 2009; Spiriyagin, 2014).

Em operação, muitas vezes a tração de apenas uma locomotiva não é suficiente, sendo usual que as composições tenham mais de um veículo motriz, principalmente veículos com geração própria nos casos em que a composição movimentava grande número de vagões. Esse sistema é conhecido por operação de tração múltipla, onde as locomotivas podem estar ou na cabeceira da composição ou distribuídos. O maquinista controla uma das locomotivas, chamada de comandante, enquanto as demais, chamadas de comandada ou remotas, são controladas a partir da comandante. As locomotivas comandadas são acionadas com maior potência fornecida uma por vez, em efeito cascata, e somente quando a locomotiva comandante não consegue manter a velocidade requerida por conta própria (Borba, 2009; Spiriyagin, 2014).

O sistema de tração *Slug*, também chamado de MATE (Motors for Added Tractive Effort, motores para adição de esforço trator, em tradução livre) é construído como um sistema auxiliar à tração de uma locomotiva (ou conjunto de locomotivas). Nesse sistema, há unidades geradoras que fornecem energia para um veículo ferroviário sem sistema de geração próprio, chamada de unidade lastreada, com o objetivo de aumentar o esforço trator disponível para uso. As principais vantagens desse sistema, além do esforço trator extra, é a possibilidade de armazenar combustível no carro extra, gerando maior autonomia, menor custo de manutenção do que uma locomotiva tradicional, e menor investimento inicial, uma vez que esse sistema pode ser construído a partir de veículos tratores sucateados (Borba, 2009).

Para a efetiva implementação desse modelo, se deve considerar alguns fatores, como a existência de veículos não operacionais, atual tecnologia da frota e perfil do trecho cogitado. Vale ressaltar que há uma diminuição da velocidade total do sistema, se considerando o mesmo nível de potência fornecida do motor diesel para os motores de tração, redução compensada com um considerável aumento na tração. Além disso, deve-se considerar que a locomotiva lastreada também deve ter configuração de locomotiva rebocada morta, isto é, sem esforço trator, especialmente em condições onde ocorra aumento de características como a tensão do gerador e impedância do motor de tração, o que pode ocasionar comprometimento da isolação elétrica (Borba, 2009).

2.1.3. Motor diesel ferroviário

O motor diesel é um dos motores de combustão interna mais amplamente utilizados em diversos setores, como em veículos marítimos, terrestres e também em indústrias. Desde o surgimento desse tipo de motor, se buscou utilizá-lo no setor ferroviário, mas os primeiros sucessos aconteceram a partir de 1925, e já nos anos 1930, motores robustos na faixa de 3500 hp estavam disponíveis. A utilização de motores a diesel, em detrimento a outros combustíveis motores a combustão como a gasolina, se dá pelo seu baixo custo de manutenção, eficiência energética superior, maior torque em baixas rotações, menor consumo e maior durabilidade. Mas também existem desvantagens, como maior emissão de poluentes e o alto custo de manutenção, sendo indicados para veículos pesados e geradores (Borba, 2011; Spiriyagin *et al.*, 2017).

Figura 2: Motor Diesel ferroviário EMD 1010 T4



Fonte: Progress Rail (2023).

Seu funcionamento ocorre em um ciclo de quatro tempos: admissão, compressão, combustão e escape. O ciclo se inicia com a admissão do ar e segue com sua compressão para elevar a temperatura do sistema, com a combustão ocorrendo pela temperatura atingir um ponto em que ocorre a autoignição do combustível ao ser injetado. O combustível mais utilizado para motores do ciclo diesel é o óleo diesel, mas outros produtos podem ser utilizados, como óleo vegetal, nafta, e também combustíveis sólidos, como o carvão (Borba, 2011; Martins, 2013).

No setor ferroviário, o uso de motores diesel é impulsionado pelos altos níveis de torque e potência requisitados, atuando como sistema motriz ao gerador que alimenta o motor de tração. Os motores que costumam ser empregados em locomotivas para transporte de carga (Figura 2) geralmente são de rotação média, potência entre 700 e 6500 hp, podendo ser de dois ou quatro tempos e contendo entre 8 e 16 cilindros, usualmente inclinados lateralmente, apresentando duas fileiras, com disposição em V (Borba, 2011).

A decisão pela utilização do motor diesel em veículos ferroviários ao invés de alimentação a partir de fontes estacionárias depende de diversos fatores. Um deles é a parte econômica, já que a operação movida a catenária ou terceiro trilho necessita de maior investimento na instalação de rede para distribuição da energia previamente gerada, e é mais indicado em operações onde há paradas frequentes, como em áreas urbanas. O uso do motor diesel é mais indicado em cargas,

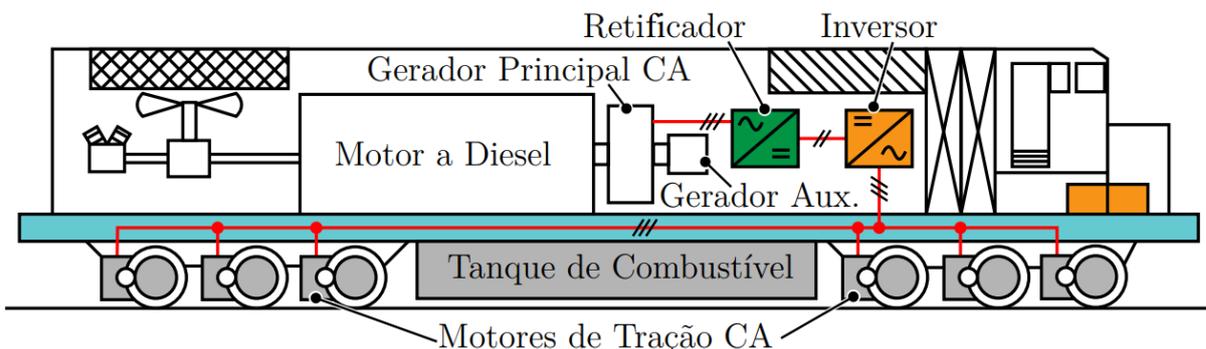
especialmente de longa distância, onde permite capacidade de operar em locais remotos. Em contrapartida, a alimentação através de redes de distribuição também permite que a energia seja fornecida de fontes mais limpas, mas a eficiência do motor diesel ferroviário é semelhante à de geradores a diesel (Pires, 2013; Spiryagin *et al.*, 2017).

2.2. SISTEMA DE TRAÇÃO ELÉTRICA

O sistema de tração elétrica ganhou destaque no setor ferroviário com sua evolução tecnológica. É um sistema mais eficiente de tração, permitindo melhor controle de torque e de velocidade operacional quando comparados com os outros sistemas citados anteriormente. Nos primeiros sistemas de tração elétrica para variar o torque de motores, se utilizava um reostato e posteriormente circuitos valvulados, mas sua implementação no setor ferroviário se tornou mais ampla apenas com o surgimento de transistores e controladores eletrônicos, que otimizaram o controle de tração e o consumo de energia do sistema (Borba, 2011).

A conversão da energia mecânica do motor diesel para energia elétrica que aciona o motor de tração é feita através de geradores, que posteriormente entregam essa energia ao motor de tração (principal), além de alimentar iluminação, controle e demais sistemas (auxiliar). Em veículos ferroviários que utilizam o sistema diesel-elétrico, o sistema de conversão corresponde por um gerador de tração ligado ao virabrequim do motor diesel, que acaba produzindo eletricidade a partir do movimento do motor durante sua operação. Segundo Borba (2011), locomotivas diesel-elétricas podem ser classificadas conforme o tipo de corrente do gerador e do motor de tração, sendo CC-CC para ambos utilizando corrente contínua, CA-CC para o gerador em corrente alternada e o motor em corrente contínua, e CA-CA (Figura 3), com ambos em corrente alternada.

Figura 3: Topologia de uma locomotiva CA-CA



Fonte: Moraes (2020, p. 25).

Originalmente, as locomotivas eram do modelo CC-CC, e com o desenvolvimento da eletrônica, se passou a utilizar geradores em corrente alternada com conversão através de ponte de diodos, o que representou uma melhora notável na confiabilidade e eliminou comutadores e escovas, reduzindo custos de manutenção. Com a otimização e desenvolvimento de circuitos eletrônicos de controle e condutores de alta potência, ocorre a utilização de motores de corrente alternada, com controle através de inversores, proporcionando maior precisão no controle da aceleração. Entretanto, com o fato dessa tecnologia ainda ser recente, aliado a custos elevados para aquisição e manutenção dos sistemas embarcados, faz a topologia CA-CC ainda ser a mais utilizada no Brasil, especialmente em bitola métrica (Moraes, 2020).

2.2.1. Geradores

Os geradores de eletricidade ferroviários funcionam como a maioria dos geradores elétricos convencionais, a partir de um sistema contendo rotor e estator, onde usualmente há o gerador principal, uma excitatriz e um gerador auxiliar que alimenta circuitos de controle, iluminação e carrega as baterias (Figura 4). O estator é a parte estacionária do sistema e é feito por um conjunto de bobinas de fio de cobre enroladas, distribuídas ao longo do estator, com ligação em estrela. O rotor é a parte rotativa que efetivamente recebe o movimento do motor diesel, e é composto de bobinas em série, com polos laminados enrolados. Conforme gira, o rotor cria um campo magnético rotativo que gera uma força eletromotriz nas bobinas do estator, o que induz uma tensão elétrica trifásica que é direcionada para os retificadores e,

posteriormente, aos motores de tração CC (Fitzgerald, Kingsley, Umans, 2006; Borba, 2011; Amorim, 2020).

O gerador principal tem como principais objetivos o fornecimento de energia elétrica aos motores de tração e servir como motor de arranque e volante ao motor diesel. Geradores CC usualmente contém comutadores, e além disso costumam ser caros, precisam de mais manutenção e usualmente impõem limitações significativas de tensão. Nas topologias mais modernas, se gera corrente alternada trifásica através de máquinas síncronas, e recebe o nome de alternador. Um alternador ferroviário costuma operar em faixas de 600-1800 RPM, 25-60 Hz trifásico e eficiência usualmente superior a 95% (Borba, 2011; Spiryagin *et al.*, 2022).

Figura 4: Gerador principal e excitatriz



Fonte: Borba (2011, p. 342).

Durante a operação do trem, há diversos níveis de potência requisitados, tanto na tração quanto na frenagem (uma vez que o controle da força de frenagem reostática depende da corrente, como é mostrado adiante), e sua variação é feita através de controladores, que em locomotivas diesel-elétricas desempenham um papel fundamental no controle e regulação da operação de uma locomotiva. Além de monitoramento de pontos cruciais através de sensores, como temperatura do motor, por exemplo, são responsáveis por controlar a potência do motor diesel, a transmissão de energia para os motores elétricos das rodas, a frenagem e a aceleração da locomotiva, bem como outras funções operacionais importantes (Borba, 2011; Amorim, 2020).

No caso da geração, esse controle é feito pelo governador, um equipamento eletro-hidráulico que regula a potência gerada pelo motor diesel dependendo da necessidade específica da aplicação do veículo ou do trecho, a partir de volantes e válvulas. Ele permite o controle do funcionamento do motor entre os (usualmente) 8 pontos de aceleração disponíveis, além de configurações conhecidas como *idle*, de baixa rotação, quando a locomotiva não está em tração. Essa espécie de esquema de marchas controla a geração do motor através da rotação e geração de potência, onde rotações e ciclos de potência mais baixos tendem a rendimento menor no motor (Borba, 2011; Amorim, 2020).

Além disso, também há o circuito de controle de excitação e potência, com o objetivo de controlar a necessidade energética do veículo e manter geração constante de potência, dentro da limitação do motor. Quando o maquinista muda o ponto de operação da locomotiva, um sinal é enviado ao governador para energizar os solenoides, que através da cremalheira controla a quantidade de combustível disponibilizada ao motor diesel para que seja compatível com o ponto de operação atual. O circuito também recebe sinal de excesso de esforço dos motores de tração quando em modo de velocidade constante, onde situações como rampa ascendente exigem mais do motor diesel, que por sua vez recebe mais combustível para movimentar o gerador (Borba, 2011).

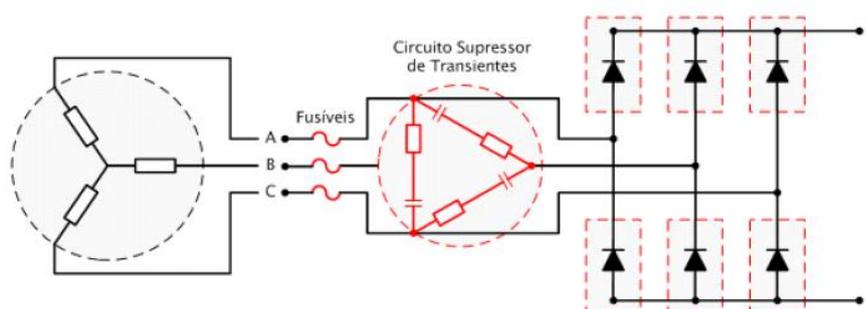
Algumas configurações de locomotivas contam com uma excitatriz, um dispositivo que gera corrente elétrica para a criação do campo magnético do rotor. A excitatriz atua em conjunto com o circuito de controle de excitação e potência para suprir as demandas do motor de tração, que requisita alta corrente e baixa tensão na partida, e alta tensão e baixa corrente em velocidades elevadas. A inserção da excitatriz no sistema provoca respostas mais rápidas em comparação com sistemas que contam somente com o gerador, permitindo aumento de cerca de 21% na aderência (Fitzgerald *et al.*, 2006; Borba, 2011).

Em locomotivas modernas, a geração de energia a partir do motor diesel é feita através de um alternador síncrono. Nesse tipo de alternador, uma corrente CA trifásica flui ao longo do enrolamento de armadura do motor, localizado no estator, enquanto uma corrente CC inserida através de escovas percorre o enrolamento de campo, que está no rotor. A máquina síncrona recebe esse nome por que o rotor gira em sincronismo com o campo girante, produzido pelo estator, resultando em um conjugado constante (Fitzgerald *et al.*, 2006).

2.2.2. Retificador

Os retificadores são os componentes responsáveis pela conversão da tensão trifásica vinda do alternador em tensão contínua, que posteriormente é enviada aos motores de tração, além de serem responsáveis pela excitação do campo do motor de tração durante a aplicação do freio dinâmico. É constituído de diodos de silício dispostos em paralelo, com capacidade para alta tensão e corrente, que constituem uma ponte trifásica de onda completa (Figura 5). Também contém sistemas de proteção, como ventilação a partir de um soprador, utilizado para arrefecimento do calor gerado pela passagem de corrente no circuito, fusíveis de proteção contra sobrecarga dos diodos, e um circuito supressor de transientes formado por capacitores e resistores, utilizado para proteger o circuito de picos de tensão (Nogueira Neto, 2010; Borba, 2011).

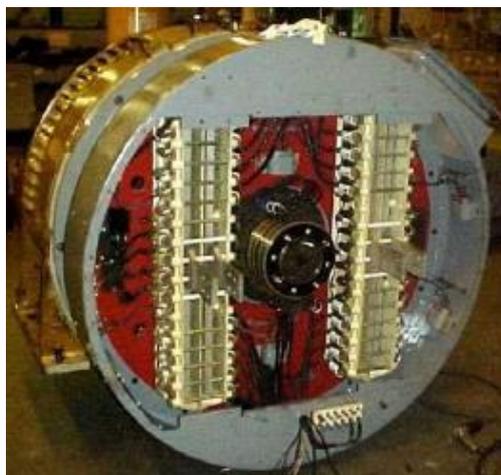
Figura 5: Esquema básico do circuito do estator do gerador (esquerda) e da ponte retificadora (direita)



Fonte: Borba (2011, p. 352).

Por questões econômicas, geralmente são não-controlados, ou seja, são compostos de diodos de silício, altamente eficientes e com capacidade de lidar com as altas correntes e tensões requisitadas no sistema. Por ser trifásico, é constituído de 6 grupos de diodos, com cada par de grupos conduzindo em uma fase, enquanto os demais não conduzem, permitindo a passagem de corrente em uma única direção. Dessa maneira, pode-se obter tensão CC nos terminais de saída do retificador (Fitzgerald *et al.*, 2006, Pires, 2013). Um exemplo de retificador ferroviário é apresentado na Figura 6.

Figura 6: Retificador ferroviário



Fonte: Borba (2011, p. 354).

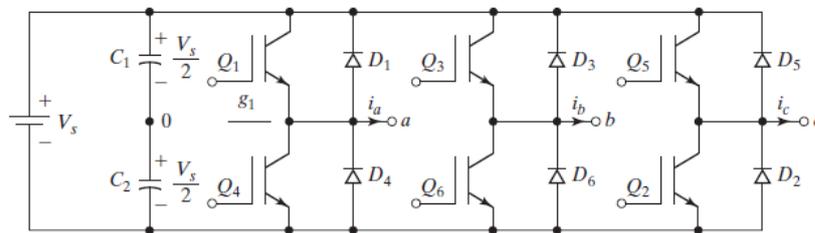
Vale ressaltar que os retificadores podem ser constituídos de conjuntos de diodos (que podem ser vistos no lado direito do circuito da Figura 5), para aumento de capacidade, e com objetivo semelhante, os alternadores contém diversos enrolamentos, com saídas em paralelo ou em série. Esses grupos de enrolamentos podem produzir correntes mais elevadas quando em paralelo, ideais para maior torque em baixa velocidade, ou tensões mais altas quando em série, possibilitando tráfego em velocidades maiores. A transição entre o tipo de ligação na saída pode ser feita por chaveamento, o que em locomotivas mais modernas é feito por microprocessamento (Borba, 2011).

Em topologias híbridas, pode ocorrer a utilização de retificadores controlados com o uso de tiristores ou transistores IGBTs no lugar do diodo. Os tiristores são um tipo de diodo controlável, onde pode ocorrer a passagem de corrente elétrica a depender do sentido da corrente e de um disparo de sinal de acionamento que aciona um gatilho. Já com emprego de transistores IGBTs, que podem ser ligados e desligados por meio de um circuito de comando, é possível o emprego de técnicas de controle mais sofisticadas como a técnica PWM (*Pulse Width Modulation*), que utiliza de disparos de ondas quadradas para controlar o ciclo de trabalho de transistores, permitindo um controle de tensão mais preciso, maior eficiência na transferência de energia e menor ruído (Ferreira, Merwe, 2014; Rashid, 2014; Spiriyagin *et al.*, 2022).

2.2.3. Inversor

Os inversores são conversores de potência que convertem a tensão CC na sua entrada em tensão CA simétrica na sua saída, e são empregados no setor ferroviário em locomotivas que utilizam motores de tração de corrente alternada. Através de modulação PWM, obtemos uma tensão de amplitude e frequência variáveis, condição necessária para o controle de torque e velocidade de motores de tensão alternada (Rashid, 2014).

Figura 7: Circuito de um inversor trifásico em ponte



Fonte: Rashid (2014, p. 254).

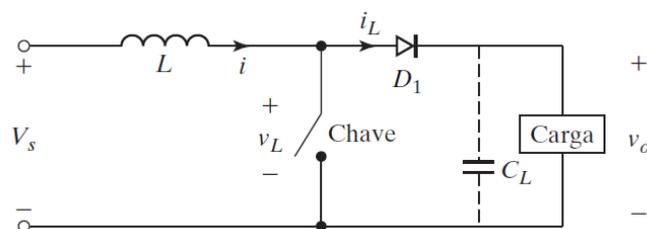
Para correntes alternadas trifásicas de alta potência, utiliza-se de três inversores trifásicos, de meia ponte ou ponte completa (Figura 7), com sinais de acionamento com 120° de diferença para se obter tensões equilibradas. Em topologias híbridas, a utilização de VSI (*Voltage Source Inverter*) é recomendada, e contém seis transistores IGBTs em sua configuração básica, permitindo operação como abaixador (*buck*), quando a corrente flui do barramento CC para o CA, e também como elevador (*boost*), caso a energia do sistema esteja fluindo do barramento CA para o CC. Sua condução pode ser em 180° , a mais utilizada, onde três transistores estão ativos por vez e com cada modo durando 60° , ou ser em 120° onde apenas dois transistores estão ativos por vez (Rashid, 2014; Moraes, 2020).

2.2.3. Conversor CC-CC

Os conversores CC-CC são conversores que trabalham com tensões e correntes contínuas tanto na entrada quanto na saída, e são utilizados para elevar ou reduzir os valores de tensão de saída em relação à tensão de entrada. Usualmente, se considera que um conversor CC-CC é o equivalente em corrente

contínua aos transformadores em corrente alternada. Sua construção usual consiste de uma fonte de tensão, uma chave (também conhecido como *chopper* e que pode ser um MOSFET ou IGBT), resistor e indutor, e diodo, com a definição entre aumentar ou diminuir a corrente a depender dos seus posicionamentos no circuito, como pode ser visto na Figura 8 (Rashid, 2014).

Figura 8: Circuito elevador de tensão.



Fonte: Rashid (2014, p. 191).

Em sistemas híbridos com motor de tração de corrente contínua, um conversor é requerido para ajustar os valores de corrente vindos do freio dinâmico e adaptá-los para níveis que sejam suportados pelo sistema de regeneração de energia. Em veículos com sistema de regeneração e alimentação por rede elétrica, é comum a utilização de conversores CC-CC em reguladores de tensão, atuando em conjunto com indutores para gerar corrente CC para inversores, que devolvem a energia para a rede. Conversores CC-CC também são utilizados em controle de tração em carros elétricos, guindastes portuários, transporte de mineração, entre outros (Rashid, 2014; Moraes, 2020).

2.3. MOTOR DE TRAÇÃO ELÉTRICA

Os motores de tração são efetivamente quem movimentam os rodízios ao converter a energia elétrica em energia mecânica, e também regula a velocidade e aceleração de locomotivas. A evolução da tração elétrica em locomotivas se deu em conjunto da própria evolução geral de sistemas elétricos, e as primeiras aplicações de motores elétricos em locomotivas com alimentação própria para transporte de carga são dos anos 1920. Durante o século XX, a tração elétrica se tornou o principal meio de propulsão no setor ferroviário, especialmente pelo seu controle

superior em comparação a outros sistemas de tração e eficiência energética elevada (Borba, 2011; Spiriyagin *et al.*, 2014).

Os motores de tração em locomotivas podem ser em corrente contínua ou alternada. Além disso, podem ser classificados como conectados em série, com queda de tensão nos terminais sendo proporcional ao número de motores, em paralelo, utilizado para se obter máxima velocidade e tensão nos terminais, e série para paralelo, onde os motores são conectados em série, mas dentro de grupos, que por sua vez estão conectados em paralelo. Apesar das locomotivas terem definições a partir de suas topologias como visto anteriormente, é comum que sejam chamadas apenas de CC ou CA, dependendo do tipo de motor de tração (Spiriyagin *et al.*, 2014).

Os motores CC foram os primeiros a serem desenvolvidos, e atualmente ocupam cerca de 40% do mercado ferroviário (Spiriyagin *et al.*, 2014). Dentre suas vantagens, pode-se destacar o controle de velocidade, que é feito pelo controle da tensão de armadura e pelo fluxo do enrolamento de campo. Além disso, esse tipo de motor pode facilmente entrar no modo de frenagem dinâmica, e a construção de seus comutadores é simplificada em relação a motores CA. Suas desvantagens são o consumo excessivo de metais não-ferrosos, projetos complexos, a limitação de tensão do sistema de comutação, vulnerabilidade a falhas no modo de frenagem e alta necessidade de manutenção (Spiriyagin *et al.*, 2014; Brenna *et al.*, 2018).

Os motores CA (Figura 9), também chamados de motores de indução, requerem maior controle eletrônico, com seu desenvolvimento ocorrendo principalmente a partir dos anos 70, e na grande maioria dos casos corresponde a motores trifásicos. O controle do motor CA deve ser realizado por meio de tensões de alimentação com amplitude e frequências variáveis obtidas através de inversores controlados por PWM. Suas principais vantagens são o modelo de construção simplificado, sem escovas ou comutador, o que o faz requerer menos manutenção, além de alta confiabilidade, durabilidade e menor volume. Algumas desvantagens são o sistema de conversão de energia para o motor ser mais complexo, o que leva para topologias mais caras, e menor torque na partida.

Além do transporte de cargas, os motores de tração são amplamente utilizados no transporte de passageiros, uma vez que a qualidade no controle de tração é ideal para operações onde se necessita de diversas paradas durante o trajeto, como em sistemas metroviários, por exemplo. Locomotivas modernas têm

motores de tração com sistemas de controle que permitem a operação com diversos tipos de corrente e várias faixas de tensão, permitindo operações de carga com tensão de até 10000 kW por unidade, além de operações de transporte de passageiros em alta velocidade até 350 km/h, mesmo utilizando a tecnologia com contato roda-trilho (Spiryagin *et al.*, 2014).

Figura 9: Motor de tração de uma locomotiva



Fonte: Wabtec (2023).

Os motores de tração estão dispostos nas locomotivas, um em cada eixo, e idealmente devem permitir a frenagem dinâmica, possuir rendimento elevado, regulação motora variável, além de possuir conjugado de partida elevado, ideal para movimentar cargas elevadas como as composições ferroviárias, desde que a corrente não atinja valores excessivos e danifique o motor. Seu principal objetivo é a regulação do esforço motor e também da velocidade da composição, feita de maneira diferente dependendo do tipo de máquina. Em máquinas assíncronas, a regulação é feita através da variação da tensão trifásica e da frequência de alimentação, enquanto em máquinas síncronas, além destes, também se varia a tensão de excitação (Borba, 2011; Pires, 2013).

Outra característica importante para motores de tração são que precisam ser compactos e otimizados, uma vez que o espaço físico onde estão localizados costuma ser limitado. Sua vida útil costuma não ser longa como outros componentes ferroviários devido às altas cargas impostas pelos veículos ferroviários tanto na aceleração quanto na frenagem, e está diretamente ligada com a solicitação do operador devido às características da via. Fundamentalmente, são compostos por um estator e um rotor, e o detalhamento destes componentes ocorrerá na

sequência. A transmissão é efetuada por um pinhão, fixado na extremidade do eixo do rotor do motor, e por uma engrenagem, fixada no eixo do rodeiro, conforme a Figura 10 (Borba, 2011).

O estator é a parte estática do motor, e é formado por diversos componentes. Os polos de excitação são responsáveis por gerar o fluxo magnético ao serem alimentados pelo sistema de transmissão e são constituídos de enrolamento de fios de cobre sobre um núcleo de aço laminado que formam uma bobina, e são usualmente chamados de enrolamento de campo. Além destes, possuem os polos de comutação, responsáveis por garantir a manutenção da direção do campo e amenizar os efeitos da inversão de direção da corrente, reduzindo o centelhamento, e as escovas, que usualmente são de carvão e estão em contato com o comutador, permitindo fluxo de corrente no rotor. Contém molas, que a mantém pressionadas contra a superfície conforme sofrem desgaste, e são pontos de atenção em inspeções de manutenção (Fitzgerald *et al.*, 2008; Borba, 2011).

O rotor de um motor é a parte central, em forma de tambor, e contém eixo, enrolamento e comutador. O eixo é quem efetivamente transfere a energia mecânica que o motor desenvolve para um elemento externo ao motor, neste caso representado pelo pinhão da sua extremidade, conectado com a coroa fixada no rodeiro. O enrolamento do rotor é uma única bobina em torno do mesmo, e também é chamado de enrolamento de armadura. Os comutadores fornecem contato entre a armadura e as escovas através de lâminas de cobre em forma de cunha, transmitindo energia para a mesma, além de atuarem como chave de reversão e de guiarem a direção da corrente por todas as bobinas. Por sofrerem contato, também sofrem desgaste, embora em menor grau que as escovas (Fitzgerald *et al.*, 2008; Borba, 2011).

Figura 10 - Pinhão e engrenagem utilizados no motor de tração e rodeiro



Fonte: Borba (2011, p. 378).

O motor de tração ainda contém um sistema de refrigeração, usualmente composto de um soprador que induz passagem forçada de ar, e a carcaça, muitas vezes considerada parte do estator por não se mover. Essa carcaça usualmente é feita de ferro fundido e sua principal finalidade é de suportar todo o conjunto de tração, preferencialmente de modo compacto e otimizado, geralmente tendo contorno interno ortogonal. A carcaça contém janelas apropriadas para inspeção e manutenção do motor de tração, especialmente nos componentes que sofrem maior desgaste durante a operação, como as escovas e comutadores, assim otimizando o tempo de parada do veículo (Borba, 2011).

2.4. MECÂNICA DO MOVIMENTO DE LOCOMOTIVAS

A tração e frenagem em sistemas ferroviários passa por um ponto crucial para o bom funcionamento e máxima conservação do material rodante: a aderência. Este é um ponto de especial atenção para diversos subsistemas, mas principalmente para a tração, uma vez que o contato roda-trilho é contato metal-metal e a existência de atrito entre as superfícies é necessária para a transmissão do torque do motor de tração para a roda sem que esta patine no trilho, o que impede a locomoção do veículo e diminui a vida útil dos componentes (Borba, 2011; Hungria, 2018).

Uma vez que a roda é um elemento cônico, e a pista de rolamento da roda é cônica, a área de contato entre o trilho e a roda inicialmente tende a ser uma linha. Entretanto, conforme cargas são aplicadas, essa área se torna uma elipse, conforme

explica a Teoria de Contato de *Hertz*. Com o aumento do peso no veículo de tração, cada roda precisa suportar mais carga, e ocorre deformação elástica na superfície, exposta na forma de achatamento, o que aumenta a área de contato com o trilho e proporciona maior aderência ao sistema, efetivamente causando o movimento (Borba, 2009).

Diversos fatores influenciam na aderência do veículo. Além do peso do veículo de tração, citado anteriormente, também pode-se destacar como pontos cruciais na aderência o estado de conservação tanto do material rodante quanto da via permanente, montagem correta do rodeiro, equivalência de diâmetro entre rodas do mesmo rodeiro, velocidade, trecho onde a composição está transitando (uma vez que a mecânica de curvatura causa alterações significativas na aderência, incluindo efeitos de escorregamento), oscilações de tração, entre outros. Vale destacar que a aderência pode ser aumentada com a adição de areia no trilho através dos areeiros, o que é utilizado principalmente na arrancada da composição e em operações abaixo de 20 km/h (Borba, 2009; Hungria, 2018).

Quando se fala em potência da locomotiva, é importante ressaltar que se refere à potência efetivamente disponível para tração, já descontada a alimentação de sistemas auxiliares da potência gerada pelo motor diesel. A potência do motor, até chegar efetivamente no eixo, sofre perdas em seus subsistemas (para mais detalhes, ver Figura 1), como as perdas no gerador, no sistema de transmissão e no motor de tração, uma vez que os equipamentos elétricos, apesar do alto rendimento, têm rendimento inferior a 100%, assim como qualquer sistema não-teórico. O rendimento do sistema de transmissão em uma locomotiva diesel-elétrica dependerá do tipo de aplicação na qual está sendo empregada, mas usualmente fica entre 80 e 86% (Borba, 2009).

O movimento longitudinal de uma composição ferroviária, isto é, no sentido do trilho, pode ser dividido de diversas formas. As principais influências na modelagem matemática de um veículo ferroviário, além da tração, aderência e peso, anteriormente citados, são a velocidade de deslocamento e a rampa. Considerando estes dois fatores, define-se como regime permanente quando a velocidade for constante, e regime transiente quando a velocidade estiver variando, podendo ser durante a partida do trem, aceleração quando em movimento (aumento da velocidade), frenagem quando em movimento (diminuição da velocidade) e frenagem para parar o veículo (Hungria, 2018).

A resistência rampa pode ser definida como o fator que influencia o veículo devido ao relevo no qual está transitando. A rampa é definida em porcentagem, representada pela alteração de altitude da ferrovia em 100 metros, e é considerada em nível quando a altitude permanece constante ($i = 0\%$), em subida quando há variação positiva na altitude ($i > 0\%$) e em descida quando há variação negativa na altitude ($i < 0\%$). A rampa é um fator importante que influencia em diversos fatores da operação ferroviária, desde carga no freio pneumático até a velocidade de operação de determinado local (Borba, 2009; Hungria, 2018).

2.5. FREIO DINÂMICO

Em composições ferroviárias, o principal sistema de frenagem é o freio pneumático, que consiste em um sistema composto por cilindros de armazenamento de ar comprimido dispostos em cada vagão. Quando o freio é acionado, o ar é direcionado aos cilindros de freio, que acionam as sapatas de freio e fazem estas entrarem em contato com as rodas, reduzindo a velocidade através da fricção com o material de atrito e eventualmente parando a composição, caso necessário. Sistemas modernos de frenagem contém sistemas eletrônicos que acionam cada vagão separadamente, reduzindo consideravelmente o tempo de resposta do sistema de freio após acionado (Spiryagin *et al.*, 2017).

O freio dinâmico funciona como um sistema auxiliar ao sistema de freio pneumático, controlando a velocidade através da atuação do motor de tração e atuando como um freio eletromagnético ou reostático. Sua atuação ocorre com o princípio de reversibilidade de máquinas elétricas, ou seja, ao invés do estator criar um campo para movimentar o rotor através do eixo, é o eixo quem movimenta o rotor e gera um campo que excita o estator, assim convertendo o motor em gerador. Assim, parte da energia de movimento da composição é convertida em energia elétrica nos motores, reduzindo a velocidade da composição (Spiryagin *et al.*, 2014).

Figura 11 - Modelo de banco de resistores.



Fonte: Borba (2011).

A energia gerada durante a aplicação do freio dinâmico pode tanto ser dissipada quanto reaproveitada. Em locomotivas diesel-elétricas, o usual é que essa energia seja dissipada em forma de calor através do efeito Joule em um banco de resistências (Figura 11) presente na locomotiva. Conforme a energia atravessa os resistores, sofre efeito da resistência interna destes, que acabam aquecendo e convertendo a energia elétrica em calor. Nos bancos de resistores, usualmente conhecidos por grade ou grelha, há sopradores que são acionados pela própria energia gerada no freio, que emitem um jato de resfriamento para dissipar o calor gerado (Borba, 2011). A energia dissipada no banco de resistores segue a seguinte fórmula:

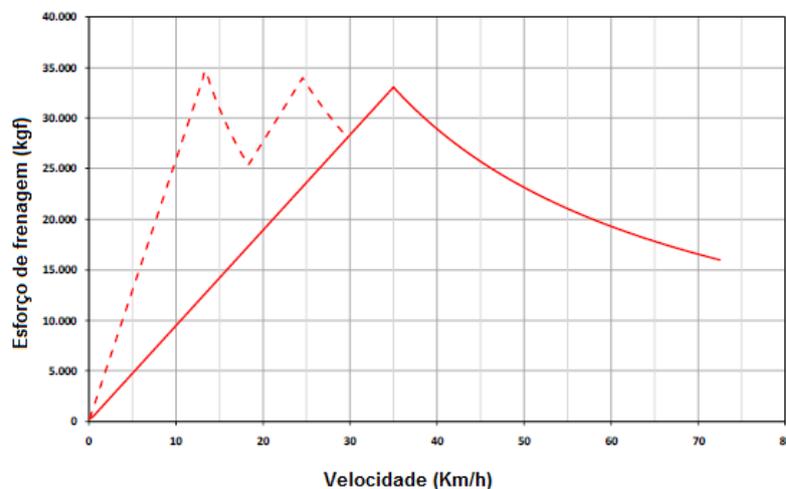
$$P_{FD} = R_{FD} I_{FD}^2 [W] \quad (1)$$

Onde P_{Fd} é a potência atuando sobre a grade do freio dinâmico, R_{FD} é a resistência de grade do freio dinâmico, e I_{FD} é a corrente sobre a grade.

Em motores de tração, a curva de esforço que o freio dinâmico exerce é diretamente relacionada com a velocidade do veículo no momento. Em corrente contínua em baixa velocidade, o esforço é limitado pela corrente máxima suportada pelo circuito, enquanto em velocidades mais altas é limitada pelos limites de operação do comutador e pelo limite de tensão no motor. Com isso, a curva característica da frenagem dinâmica apresenta um pico, gerando uma curva que deixa evidente os pontos limitadores do motor CC. Alguns tipos de motores apresentam o freio dinâmico faixa ampliada, onde as resistências internas do motor

são adaptadas para que o freio apresente mais força em uma faixa maior de velocidade, como pode ser visto na Figura 12 (Borba, 2011; Ahmad, 2013).

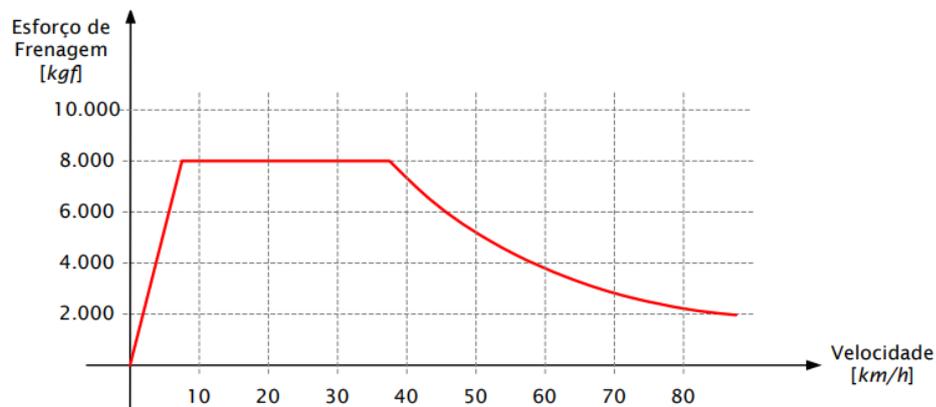
Figura 12: Curva de esforço x velocidade no freio dinâmico CC faixa ampliada



Fonte: adaptado de Borba (2011, p. 421).

No caso de motores de tração em corrente alternada, a tensão do motor é quem limita o esforço em baixa velocidade, enquanto para velocidades maiores, quem limita é a potência do motor. A curva característica do esforço do motor em frenagem dinâmica apresenta uma força constante em velocidades mais baixas, com a tensão constante do motor, enquanto a partir de determinado ponto passa a ser influenciada pela potência do motor, onde pela definição de que potência é igual a força multiplicada pela velocidade, observa-se que ocorre queda da força para aumento de velocidade. Para motores em CA, o tipo mais comum são motores de indução (Ahmad, 2013; Borba, 2018).

Figura 13: Curva de esforço x velocidade no freio dinâmico CA.



Fonte: Borba (2011, p. 490).

Quando a energia é reaproveitada para o movimento do veículo, o freio dinâmico costuma ser chamado de freio regenerativo, e é um sistema comum em veículos ferroviários mais leves e que utilizam alimentação por catenária ou terceiro trilho, como metrô, por exemplo. Nesse sistema, a energia gerada pelo motor de tração no modo gerador é devolvida à rede elétrica ou armazenada em sistemas internos, como baterias e capacitores. Esse tipo de sistema usualmente requer um investimento a mais para implementação, tanto em armazenamento quanto em tratamento da energia regenerada (Borba, 2011; Spiryagin *et al.*, 2014).

2.6. SISTEMAS DE REGENERAÇÃO DE ENERGIA

Sistemas de regeneração de energia têm sido desenvolvidos nas últimas décadas, especialmente para veículos terrestres. Tecnologias como a geração de energia através de vibração em estradas e ferrovias estão sendo desenvolvidas, com aplicações em alguns países como Alemanha e Reino Unido, por exemplo. Em veículos, alguns sistemas como a regeneração de energia de freios reostáticos e vibração de suspensão também têm sido desenvolvidos, inclusive no setor ferroviário (Pan *et al.*, 2021). O freio regenerativo, alvo de estudo neste trabalho, já é aplicado em veículos de passageiros e carga, e tende a ser mais amplamente utilizado com o desenvolvimento das tecnologias de armazenamento de energia.

2.6.1. Regeneração de Energia Através do Freio Dinâmico

Topologias de veículos onde há uma fonte de alimentação principal e uma secundária são chamados de híbridos. Nesse tipo de sistema, é importante que haja conhecimento do modo de operação do veículo, uma vez que o sistema será muito mais eficiente quando houver frenagem com certa frequência. A frenagem costuma ser mais comum em sistemas metroviários, mas em veículos de carga se torna mais útil em trechos com grande variação de altitude, como em serras, e em trechos onde seja necessária a redução de velocidade, como ao atravessar zonas urbanas ou sessões de bloqueios (Spiryagin *et al.*, 2022).

A regeneração pela frenagem é mais aplicada em veículos de transporte de passageiros do que em veículos de carga com alimentação própria, como é o caso de locomotivas diesel-elétricas. Isso acontece porque sistemas com alimentação externa podem ser adaptados para a reutilização de energia sem a limitação de espaço que ocorre em veículos automotores, que acaba sendo limitado principalmente pela atual tecnologia disponível, com baterias e capacitores. Assim, sistemas para geração de energia reutilizável em transporte de carga através de locomotivas autoalimentadas tendem a requisitar um vagão exclusivo para baterias, de maneira semelhante às *slugs* (Wang, Palazollo, Park, 2012; Spiryagin *et al.*, 2014).

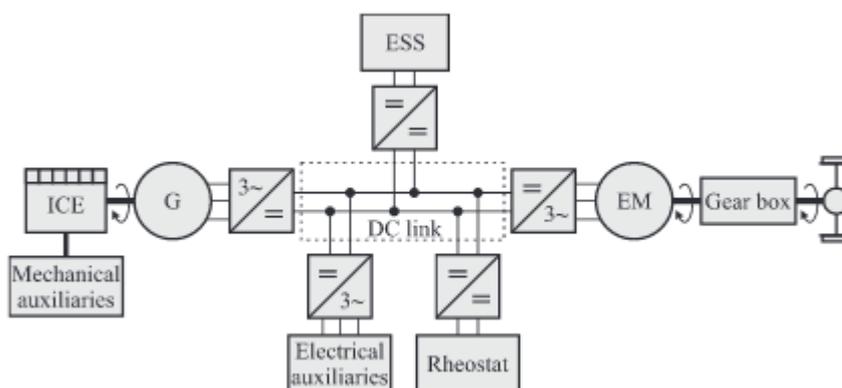
Para sistemas metroviários, é comum que a energia regenerada seja armazenada na própria estrutura da via, ou seja, devolvida para a rede, quando estas têm capacidade de absorver a energia em subestações, além de estudos pela sincronização de diferentes composições, ou seja, enquanto uma composição freia e gera energia, a outra está acelerando e consumindo. Redes metroviárias modernas já utilizam regeneração de energia, inclusive no Brasil, onde a CPTM reportou redução de consumo de energia em 12% entre 2015 e 2018 com a utilização desse tipo de sistema (Lobo, 2019; Ramsey *et al.*, 2021).

A topologia usual de veículos ferroviários com regeneração de energia pelo freio dinâmico pode ser vista na Figura 14 e apresenta o motor diesel como fonte principal de alimentação, conectado a um gerador CA, que por sua vez é conectado ao motor de tração através de retificador e inversor. Durante a frenagem, o motor de tração atua como gerador, e é ligado em um inversor CC/CA. Após, o circuito interno

conecta o inversor a um conversor, que direciona a energia para as baterias ou para ser dissipada no banco de resistores. (Kapetanović *et al.*, 2021).

Durante a frenagem, o motor diesel costuma ser utilizado para alimentar o circuito auxiliar, que em veículos metroviários engloba a iluminação, bombas hidráulicas, resfriamento dos motores de tração e ar condicionado, enquanto as baterias carregam (Kapetanović *et al.*, 2021). Este circuito atua de forma semelhante em locomotivas, onde engloba toda a utilização energética de baixa potência, como ar-condicionado, sopradores, ventilador do radiador e compressor de ar, por exemplo.

Figura 14: Diagrama simplificado de arquitetura híbrida em locomotivas



Fonte: Kapetanović *et al.* (2021, p. 4).

Atualmente, alguns modelos de locomotivas de carga híbridas, com motor diesel e baterias, já estão disponíveis no mercado. Alguns exemplos são a série HD300 da Toshiba, atualmente operada pela JR Freight para manobras de pátio no Japão, a HXN6 da CRRC Ziyang, primeira fabricante chinesa a desenvolver locomotivas híbridas, com capacidade de até 2200 kW, e a GT38H (Figura 15), da Progress Rail, que tem operação no Brasil ocorrendo na Ferroeste, no Paraná, através da Rumo Logística. A expectativa do setor é que mais locomotivas com essa configuração sejam adicionadas ao mercado nos próximos anos (CRRC, 2022; Norman, 2022; AEN, 2023; Toshiba, 2023).

Figura 15: Locomotiva Híbrida GT38H.



Fonte: Norman (2022).

Como visto, os sistemas de armazenamento de energia podem ser divididos em três partes: dispositivos de armazenamento, conversores e controladores. Este trabalho apenas entra no escopo de avaliação do dimensionamento dos dispositivos de armazenamento de energia, entretanto é importante estar ciente de que para a aplicação de projeto de construção do sistema híbrido ou adaptação de locomotiva existente, também haverá a necessidade de se avaliar e dimensionar componentes para o controle e conversão da energia reaproveitada para armazenamento nas baterias e utilização nos motores de tração.

2.6.2. Outros Sistemas de Regeneração de Energia

A busca de novos sistemas de regeneração e captação de energia de diferentes maneiras continua sendo alvo de estudo, já que cada sistema que recupere ou produza energia para o veículo gera economia de combustível, o que leva para redução de custos e de emissões de poluentes. No caso do sistema ferroviário, o estudo e aplicação de regeneração se refere a sistemas voltados a sistemas de amortecimento do veículo, energia pela movimentação da via durante a passagem de veículos e energia solar (veículo e via). Este último item já costuma ser empregado em alguns sistemas, como em *waysides* (sistema situado na via para

monitoramento de integridade de componentes do veículo através de sensores, como vibração e som), por exemplo.

Um dos sistemas estudados é de recuperação de energia a partir das vibrações causadas por veículos ferroviários. Durante o trânsito de veículos sobre trilhos, é natural que ocorra a vibração ao longo da via, devido ao peso dos veículos, como trens e vagões. Essas vibrações podem ser convertidas em energia elétrica principalmente através de interação eletromagnética com ímãs permanentes, geralmente utilizando transmissão mecânica entre a via e um gerador elétrico, e através de materiais com efeito piezoelétrico, que geram carga a partir de força mecânica. Apesar de ser um sistema relativamente novo, com a rápida evolução tecnológica e mais investimento em pesquisas em coleta de energia, apresenta potencial para aplicações em grande quantidade ao longo de ferrovias (Qi *et al.*, 2022).

Figura 16: Protótipo de sistema de captação de energia a partir da vibração do trilho.



Fonte: Zhang *et al.* (2016, p. 290).

Sistemas de captação de energia solar no veículo já são utilizados em alguns locais, e costumam ser aplicados no suporte à alimentação de sistemas auxiliares em veículos de passageiros, como a iluminação do vagão, por exemplo. Na Índia, a primeira operação de trens com painéis fotovoltaicos iniciou em 2017, através da estatal Indian Railways, em modelo diesel-elétrico com previsão de economia de 21 mil litros de óleo Diesel por ano (Figura 17). Os principais problemas

enfrentados por esse sistema são o armazenamento da energia, feita no próprio veículo, e o ângulo de inclinação do painel, uma vez que este precisa estar preso ao teto, sem a inclinação de 30° característica de sistemas fotovoltaicos, o que representa redução na conversão de energia em torno de 19% (Blewitt, 2017; Ruscelli, Cecchetti, Castoldi, 2017).

Figura 17: Vagão com painéis fotovoltaicos



Fonte: Blewitt (2017).

Outro sistema com potencial de utilização é o reaproveitamento de energia a partir do comportamento da suspensão de um vagão. Pan *et al.* (2019) projeta um sistema com engrenagem e cremalheira, onde a engrenagem é fixa na travessa lateral do truque, enquanto a cremalheira é fixa na travessa central, que é quem efetivamente suporta o peso do vagão. A engrenagem, através de um retificador mecânico (que faz o movimento ter sempre o mesmo sentido) gira um pequeno gerador CA que pode ser conectado a um sistema de armazenamento. Em testes de campo a 30 km/h, se obteve média de geração de 1,3 W em um dispositivo, com picos de 73,2 W, que podem ser utilizados em sistemas auxiliares, usualmente alimentados pelo motor diesel.

2.7. SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

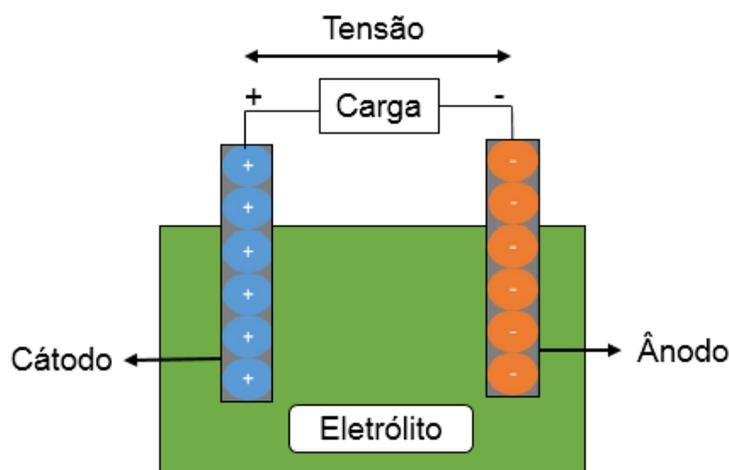
Locomotivas com regeneração de energia também são consideradas locomotivas híbridas, as quais são veículos com ao menos duas fontes distintas de alimentação (no caso considerado neste trabalho, o motor diesel e a energia regenerada). Como mostrado anteriormente, o armazenamento ainda é um limitador

para o uso deste tipo de tecnologia para transporte de carga, e a escolha para tipos de armazenamento dependerão de fatores diversos, como a topologia da ferrovia em que serão utilizadas, aplicação e características da própria tecnologia de armazenamento (Moraes, 2020). Os principais tipos de armazenamento utilizados em testes e considerados como possível solução para pela literatura são baterias, capacitores e flywheels, que serão detalhadas a seguir.

2.7.1. Baterias

Baterias são um dos tipos de armazenamento de energia mais utilizados atualmente, com diversas aplicações diferentes e são capazes de armazenar energia química em células. Em sua configuração básica, uma célula de bateria contém três componentes: um ânodo, um cátodo e um eletrólito. Durante a descarga, o ânodo sofre oxidação, o cátodo sofre redução, e há migração de íons através do eletrólito, em uma reação reversível, que ocorre durante a carga. Seus principais tipos são baterias Chumbo-Ácido, baterias a base de níquel, baterias a base de sódio e baterias a base de lítio, sendo essa última a mais utilizada no setor ferroviário (Liu, Li, 2020; Moraes, 2020).

Figura 18: Diagrama esquemático de uma bateria



Fonte: Servatian (2021, p. 26), adaptado pelo autor.

A classificação de baterias usualmente é feita em tensão nominal (V) e ampère-hora (Ah), onde a primeira aponta a tensão total que a bateria é capaz de

produzir, e a segunda indica a corrente que a bateria completamente carregada pode fornecer em uma hora. Também podem ser classificadas de acordo com sua aplicação, tipo e se são recarregáveis ou não. A avaliação de tipo de bateria a ser utilizada em determinado sistema depende de uma série de fatores, entre eles a densidade de energia (capacidade de armazenamento de carga por peso), custo, vida útil (números de ciclos que a bateria suporta antes de ser descartada), tensão, impacto ambiental, entre outros (Moraes, 2020; Servatian, 2021).

As primeiras aplicações de baterias recarregáveis comercialmente viáveis são as do tipo chumbo-ácido, sendo inventadas em 1859. Consistem em uma solução eletrolítica de ácido sulfúrico e duas placas de chumbo: uma positiva e outra negativa. Durante o carregamento, a corrente elétrica flui da placa positiva para a negativa, convertendo o ácido sulfúrico em água e chumbo peroxidado na placa positiva e chumbo esponjoso na placa negativa. Durante a descarga, a corrente flui da placa negativa para a positiva, convertendo o chumbo peroxidado em chumbo esponjoso e o ácido sulfúrico em água e sulfato de chumbo. Apesar de serem relativamente baratas e facilmente recarregáveis, têm baixa densidade de energia em comparação com outros tipos de bateria, são propensas a corrosão, têm vida útil limitada, peso elevado e utilizam materiais perigosos (Liu, Li, 2020).

As baterias de níquel-cádmio surgiram a partir de 1899, e tiveram grande destaque até a utilização do lítio. São compostas por um ânodo de cádmio, um cátodo de hidróxido de níquel e um eletrólito de hidróxido de potássio. Já as baterias de hidreto metálico de níquel substituem o cádmio por uma mistura de hidretos metálicos, tornando-as mais ambientalmente amigáveis. Ambos os tipos de bateria funcionam por meio de uma reação eletroquímica em que os elétrons fluem do ânodo para o cátodo durante a descarga e do cátodo para o ânodo durante a carga. Dentre suas vantagens, pode-se observar sua vida útil longa, ampla faixa de temperatura de operação e alta corrente de carga e descarga. Entretanto, são mais sensíveis a sobrecargas, mais caras, menor densidade de energia e o “efeito memória”, que reduz sua capacidade se não recarregada totalmente (Liu, Li, 2020).

Baterias de sódio são um desenvolvimento relativamente recente, e se busca resolver algumas limitações das baterias de lítio. Usualmente, seu eletrodo negativo é feito de sódio fundido, enquanto o eletrodo positivo usualmente é de sódio-enxofre (NaS), ou de cloreto de sódio-níquel ($NaNiCl_2$), e o eletrólito é feito de beta-alumina, sendo este um eletrólito cerâmico. Também funcionam com a carga

de elétrons no ânodo, e fornecimento de energia através de diferença de potencial, como as demais baterias recarregáveis. Esse tipo de bateria tem maior densidade de energia, menor descarga própria quanto outras baterias e baixo custo, uma vez que sódio é um elemento abundante. Entretanto, são relativamente pesadas e volumosas, além de operarem em temperatura elevada, na faixa dos 300-350 °C (Liu, Li, 2020).

As baterias de íons lítio são uma tecnologia relativamente nova que tem ganhado popularidade nas últimas décadas, e são amplamente utilizadas em diversos dispositivos eletrônicos, desde telefones celulares até veículos elétricos e sistemas de armazenamento de energia em grande escala. Funciona a partir da reação química entre o lítio e o material do eletrodo, e de maneira semelhante às demais, com os íons de lítio armazenados no ânodo e liberados no cátodo quando carregada, ocorrendo deslocamento do cátodo para o ânodo durante a descarga, com fluxo inverso durante a carga (Liu, Li, 2020, Moraes, 2020).

Diversos tipos de baterias de lítio existem atualmente, com diversos componentes nos eletrodos, como óxido de cobalto, manganês fosfato de ferro, alumínio, e ligas entre esses materiais, enquanto o eletrólito é usualmente feito de solução de sais de lítio. Dentre suas principais vantagens está o seu peso, por ser leve e compacta, além de maior densidade de energia que as de chumbo e níquel e maior taxa de descarga. Em contrapartida, sua produção é mais cara, e também podem ocorrer reações exotérmicas e vazamento de gases tóxicos em caso de superaquecimento, o que pode levar a incêndios e explosão (Liu, Li, 2020; Conzen *et al.*; 2023).

Independentemente do tipo da bateria a ser utilizado, a definição da capacidade de armazenamento da bateria segue a (2), onde E_b é a capacidade de armazenamento de energia da bateria em kWh (quilowatt-hora), V_b é a tensão da bateria e C_b é a capacitância da bateria em Ah.

$$E_b = V_b C_b \text{ [kWh]} \quad (2)$$

Com objetivo de prolongar a vida útil e evitar estresse do banco de baterias, geralmente não se utiliza a capacidade total de uma bateria na prática. Moraes

(2020) aponta que em sistemas de regeneração de energia em veículos, as características do sistema fazem com que naturalmente não haja essa descarga total, e usualmente o sistema opera na faixa de 30-80%, que é o considerado como ideal para baterias novas. Para baterias usadas, essa faixa é alterada para 20-90%, e para baterias próximas do fim de sua vida útil, a faixa indicada é entre 10-100%. Essa progressão impacta diretamente na capacidade efetiva de armazenamento de energia, e quanto mais velha a bateria, maior faixa de carga é necessária para se manter a mesma quantidade de energia (Buchmann, 2019).

Esse valor também é chamado de estado de carga (SoC, state of charge), e apresenta a porcentagem da real capacidade máxima de uma bateria que efetivamente pode ser utilizada. Para considerar o SoC, pode-se multiplicar a porcentagem da faixa de uso da bateria pelo valor da sua capacidade de armazenamento. Dessa forma, a capacidade de armazenamento de uma bateria é:

$$E_b = V_b C_b \text{ SoC}_b \text{ [kWh]} \quad (3)$$

Para se obter o número de baterias necessárias para um sistema exclusivamente de baterias, basta dividir a quantidade de energia total requisitada pela quantidade de energia que uma bateria consegue armazenar.

$$Nb = \frac{E_{tot}}{E_b} \quad (4)$$

Além disso, é importante avaliar o peso e volume do sistema de armazenamento, uma vez que em um sistema físico, pode haver limitações de espaço e peso que se pode adicionar sem comprometer o sistema ou tornar o dimensionamento encontrado fisicamente inviável. Assim, peso e volume do banco de baterias podem ser obtidos por, respectivamente:

$$\text{Peso}_{\text{tot}} = N_b \text{ Peso}_{\text{bat}} [\text{kg}] \quad (5)$$

$$\text{Vol}_{\text{tot}} = N_b \text{ Vol}_{\text{bat}} [\text{m}^3] \quad (6)$$

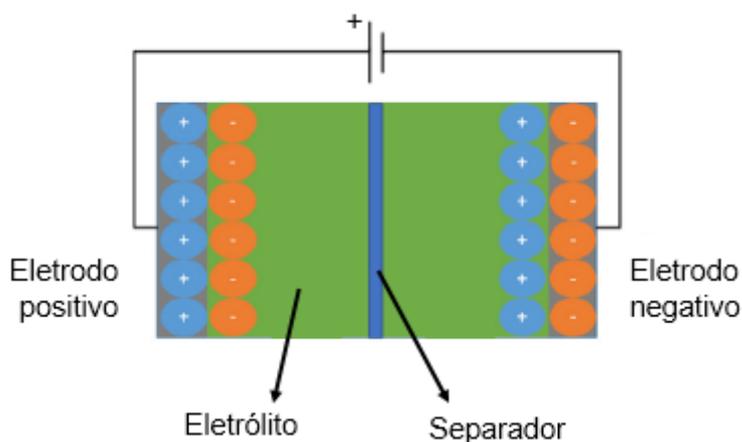
Além disso, há um limite de valor de corrente (I_b) máximo que deve ser usada durante a carga da bateria. Multiplicando essa corrente pela Equação 2, se obtém o máximo de energia que a bateria é capaz de absorver em uma hora sem comprometer seu funcionamento:

$$E_{bH} = V_b C_b I_b [\text{kWh}] \quad (7)$$

2.7.2. Supercapacitores

Os supercapacitores são dispositivos que armazenam energia em uma dupla camada de íons elétricos na superfície dos eletrodos. Os capacitores de dupla camada elétrica são os mais comuns do mercado, e compostos por dois eletrodos imersos em eletrólito, geralmente líquido ou gel, além de um separador, que impede curto circuito, mas permite a circulação de íons, e a carga é armazenada na superfície entre o eletrodo e os eletrólitos. Durante a carga, os elétrons se movem na direção do eletrodo negativo através do circuito de carga, enquanto os cátions e ânions do eletrólito são atraídos para os eletrodos negativo e positivo, respectivamente. Na descarga, os elétrons seguem pelo circuito para o eletrodo positivo, enquanto os ânions e cátions voltam a se misturar no eletrólito (Liu, Li, 2020; Moraes, 2020).

Figura 19: Diagrama esquemático de um capacitor de dupla camada



Fonte: Liu, Li (2020, p. 185), adaptado pelo autor.

Os eletrodos de supercapacitores são normalmente feitos de materiais a base de carbono, uma vez que tem desempenho satisfatório, disponibilidade alta e baixo custo, em comparação com outros materiais. Carvão ativado costuma ser a opção mais barata, com a vantagem de ter alta área superficial, algo essencial para capacitores, uma vez que como os íons ficam próximos da superfície, sua capacidade de carga está diretamente ligada à área superficial, com a limitação da falta de controle de porosidade em sua produção. Carbonetos também são altamente considerados, uma vez que a porosidade pode ser melhor controlada, assim como o grafeno, que também tem vantagens como melhor performance, maior capacidade de ciclos, flexibilidade e estabilidade térmica (Liu, Li, 2020).

Dentre as vantagens de supercapacitores, quando comparados a outros métodos de armazenamento de energia, a principal é sua alta densidade de potência, o que permite que recebam cargas elevadas em pouco tempo, além de lidar melhor com picos de energia, o que também permite recargas mais rápidas quando comparado com baterias. Outras vantagens são a sua longa vida útil, com pequena degradação, e baixa perda devido ao calor. Entre suas desvantagens, destaca-se a baixa densidade de energia, usualmente menor que baterias, tensão limitada, o que para aplicações como locomotivas requer uma ampla série de capacitores para atingir a tensão requisitada, além do custo elevado (Servatian, 2021).

De maneira semelhante às baterias, pode-se definir matematicamente a quantidade de energia a qual um supercapacitor é capaz de armazenar (E_{sc}):

$$E_{sc} \text{ (Wh)} = 0.5 (C_{sc} V_{sc}^2) \text{ [kWh]} \quad (8)$$

Onde c_{sc} é a capacitância do supercapacitor em Farad (F), e V_{sc} é a tensão sobre o supercapacitor. Além disso, assim como nas baterias, pode-se multiplicar a Equação (8) pelo estado de carga de um supercapacitor, o que resulta em:

$$E_{sc} \text{ (Wh)} = 0.5 (C_{sc} V_{sc}^2) \text{ SoC}_{sc} \text{ [kWh]} \quad (9)$$

Assim como as baterias, os supercapacitores tem um limite de utilização para se preservar a integridade do sistema, entretanto, a restrição é menor, já que se pode considerar o supercapacitor totalmente carregado com 100% do armazenamento, apenas se recomendando um limite inferior de 20% (Servatian, 2021).

Para se obter o número de supercapacitores necessários, basta dividir a quantidade de energia total requisitada pela quantidade de energia que um supercapacitor consegue armazenar, de maneira semelhante ao que se faz com as baterias:

$$N_{sc} = E_{tot}/E_{sc} \quad (10)$$

Além disso, também deve-se avaliar peso e volume do banco de supercapacitores:

$$\text{Peso}_{tot} = N_{sc} \text{ Peso}_{sc} \text{ [kg]} \quad (11)$$

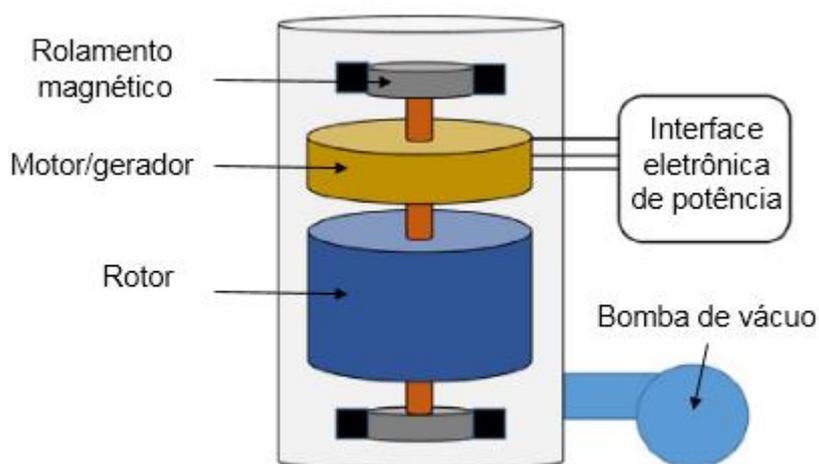
$$\text{Vol}_{tot} = N_{sc} \cdot \text{Vol}_{sc} \text{ [m}^3\text{]} \quad (12)$$

2.7.3 Flywheels

As *flywheels*, também chamadas de “baterias mecânicas”, são dispositivos mecânicos projetados para armazenar energia cinética em um rotor. Esse rotor é

conectado através de um rolamento em uma máquina elétrica, normalmente síncrona, que opera como motor ou gerador, dependendo da *flywheel* estar carregando ou descarregando, e a capacidade de armazenamento é proporcional à inércia do rotor. Em *flywheels* de alta velocidade, esse rolamento usualmente é magnético, uma vez que diminui consideravelmente o atrito e não requer lubrificação, além de uma bomba para gerar vácuo, com o mesmo objetivo (Liu, Li, 2020; Servatian, 2021).

Figura 20: Diagrama esquemático de um *flywheel*.



Fonte: Liu, Li (2020, p. 184), adaptada pelo autor.

Dentre suas vantagens, pode-se destacar sua alta eficiência em conversão de energia, com poucas perdas no processo, sua baixa manutenção e sua longa vida útil, o que torna o investimento rentável em longo prazo, além de rápido processo de carga e descarga. Nas suas desvantagens estão o custo inicial elevado, seu peso elevado, alta taxa de descarga quando comparados com outros métodos de armazenamento de energia, complexidade na montagem de alguns componentes, como rolamentos de ímãs permanentes, além de ter um risco potencial de estilhaçamento explosivo em caso de falha mecânica (Servatian, 2021). Por esses motivos, as *flywheels* não serão consideradas como alternativa de armazenamento de energia no escopo deste trabalho.

3. METODOLOGIA

O presente capítulo apresenta a descrição da obtenção dos dados e os métodos empregados neste trabalho. O estudo da possibilidade de regeneração de energia em locomotivas diesel-elétricas para transporte de carga envolve a definição do atual estado da arte do tema, o detalhamento do sistema, a consideração de variáveis, a definição do escopo da presente análise, além de pontos de avaliação da viabilidade do sistema.

Com o principal objetivo sendo o estudo da viabilidade e requisitos para aplicação do sistema, é importante analisar características de todo o ambiente, o que engloba características tanto do veículo, representadas pela análise bibliográfica e por informações geralmente disponibilizadas pelas fabricantes para as operadoras, quanto da operação, que podem ser expressas através dos dados apontados pelo registrador de eventos e análise do trecho.

3.1. PESQUISA

Para análise do sistema de regeneração e armazenamento de energia, buscou-se em bases de dados, como o Scopus, Google Scholar e Repositório Institucional da UFSC, por exemplo, artigos, dissertações e teses sobre sistemas de regeneração de energia em locomotivas diesel-elétricas. Também se analisou artigos sobre veículos com regeneração de energia alimentados por catenária ou terceiro trilho, porém nestes veículos é usual que não haja sistema interno de armazenamento de energia, então normalmente trabalhos voltados para esse sistema não trazem considerações sobre dimensionamento de bancos de baterias e afins, dificultando suas utilizações como referência principal ao sistema estudado neste trabalho.

Considerando os trabalhos encontrados, observou-se que os principais trabalhos que tratam de sistemas de regeneração de energia em locomotivas sem alimentação externa de energia e que tratam de dimensionamento de sistemas de armazenamento de energia são Amorim (2020), Mayrink *et al.* (2020), Moraes (2020), Kapetanović (2021), Servatian (2021) e Fayad *et al.* (2022). A partir da análise das diversas metodologias utilizadas nos trabalhos acima, definiu-se

metodologia e procedimento para este trabalho, observando as características de cada trabalho citado, comparando com o escopo da proposta apresentada e replicando os métodos considerados pertinentes.

3.2. DADOS UTILIZADOS

Para avaliar o potencial regenerativo do freio dinâmico, é necessário definir quanta energia pode ser recuperada em determinado trecho, além de avaliar outros fatores e condições pertinentes. No caso de locomotivas diesel-elétricas existentes e operantes, pode-se analisar as características da operação através do registrador de eventos, que é um dispositivo eletrônico que registra informações relevantes sobre o funcionamento da locomotiva durante a operação, como velocidade, posição, pressão do ar nos freios, aceleração, desaceleração, ponto do motor, dentre outras informações. A função do registrador de eventos é coletar dados precisos e objetivos sobre a operação da locomotiva para ajudar a garantir a segurança ferroviária, facilitar a manutenção e aprimorar a eficiência operacional (Spiryagin *et al.*, 2022).

O perfil de uso do freio dinâmico em locomotivas previamente existentes pode ser utilizado de maneira individual, com o perfil traçado a partir da utilização em um trecho, como a média de diversas locomotivas em determinado trecho, como apresenta Amorim (2020), ou em diversas operações. Amorim traça o perfil de consumo de certos componentes do circuito auxiliar, como os compressores de ar do freio pneumático e a energia utilizada é confrontada com a utilização do freio dinâmico e consequente regeneração em um modelo híbrido simulado, além da proposição de acumuladores equivalentes.

Além deste, pode-se utilizar a estimativa de consumos através de modelos simulados de consumo, como feito por Moraes (2020). Neste trabalho, utiliza-se de modelagem matemática das forças envolvidas na movimentação de um veículo ferroviário nos momentos em que o freio dinâmico está sendo utilizado para estimar a energia total que será retirada do sistema. Neste tipo de trabalho, para melhor assertividade é útil que se tenha conhecimento de características de operação, como pontos de aceleração e frenagem, além de forças ou pressão de frenagem, dados estes que podem ser traçados com o auxílio de simuladores específicos.

Outra abordagem possível é a simulação através de cálculos, como os apresentados por Hungria (2018). Esse tipo de perfil de utilização do freio dinâmico

pode ser utilizado para modelagem de sistemas de regeneração para determinado perfil de via, como trechos com muita alteração de velocidade ou trechos em serra, por exemplo. Entretanto, tal abordagem depende de diversas suposições que podem afastar o resultado obtido da realidade devido à alta incerteza que é englobada nos cálculos puramente teóricos.

Figura 21: dados do registrador de eventos apresentados em uma planilha do Excel.

1	Data	Hora	km	metros	Alert Pen	Arm Status	ABK [psi]	Bell	BC [psi]	CS CNW	CVE	Dir	Dyn Brake	EIE	Emer Brake
241365	09/02/2021	22:00:51	1609	90	No	On	87	Off	0	DK	Off	For	75	Off	Off
241366	09/02/2021	22:00:52	1609	68	No	On	87	Off	0	DK	Off	For	73	Off	Off
241367	09/02/2021	22:00:53	1609	47	No	On	87	Off	0	DK	Off	For	71	Off	Off
241368	09/02/2021	22:00:54	1609	26	No	On	87	Off	0	DK	Off	For	69	Off	Off
241369	09/02/2021	22:00:55	1609	4	No	On	88	Off	0	DK	Off	For	67	Off	Off
241370	09/02/2021	22:00:56	1608	983	No	On	88	Off	0	DK	Off	For	66	Off	Off
241371	09/02/2021	22:00:57	1608	962	No	On	88	Off	0	DK	Off	For	64	Off	Off
241372	09/02/2021	22:00:58	1608	940	No	On	88	Off	0	DK	Off	For	62	Off	Off
241373	09/02/2021	22:00:59	1608	919	No	On	88	Off	0	DK	Off	For	60	Off	Off
241374	09/02/2021	22:01:00	1608	898	No	On	88	Off	0	DK	Off	For	57	Off	Off
241375	09/02/2021	22:01:01	1608	877	No	On	88	Off	0	DK	Off	For	56	Off	Off
241376	09/02/2021	22:01:02	1608	856	No	On	88	Off	0	DK	Off	For	55	Off	Off
241377	09/02/2021	22:01:03	1608	834	No	On	88	Off	0	DK	Off	For	54	Off	Off
241378	09/02/2021	22:01:04	1608	813	No	On	88	Off	0	DK	Off	For	52	Off	Off
241379	09/02/2021	22:01:05	1608	792	No	On	88	Off	0	DK	Off	For	51	Off	Off
241380	09/02/2021	22:01:06	1608	771	No	On	88	Off	0	DK	Off	For	49	Off	Off

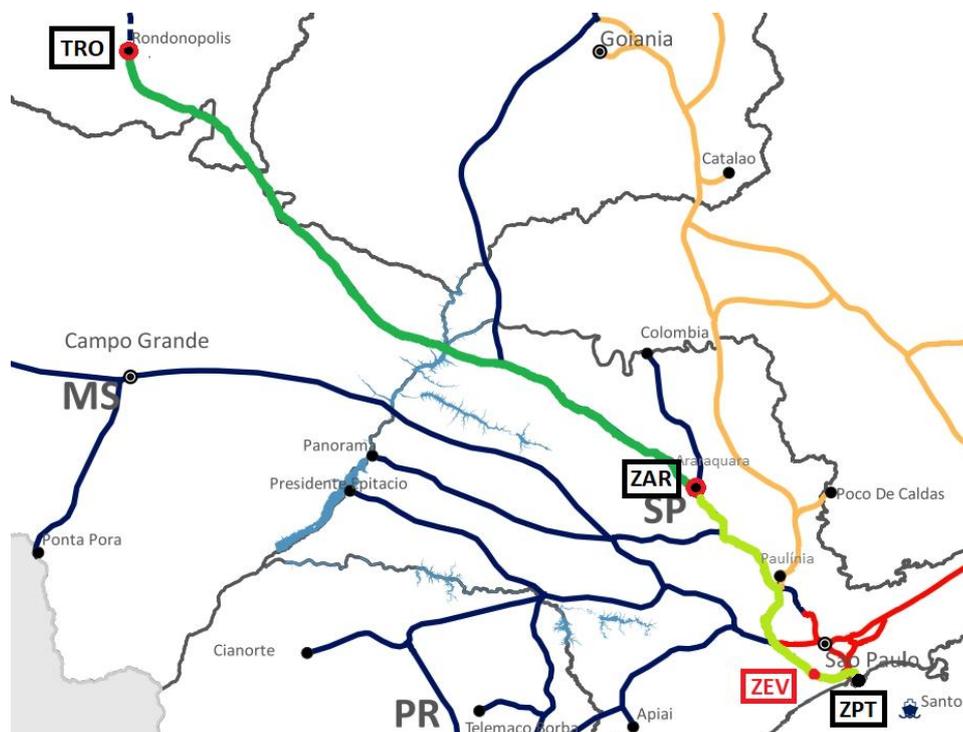
1	EOT Emer Dump	EOT Emer Enable	EOT [psi]	ER [psi]	Horn	PCS	Penalty	Speed [km/h]	Throttle [notch]	TLEM	TE [kN]	CS UP
241365	Off	On	83	89	Off	Closed	Off	76	DB	Off	151	DK
241366	Off	On	83	89	Off	Closed	Off	76	DB	Off	146	DK
241367	Off	On	83	89	Off	Closed	Off	76	DB	Off	146	DK
241368	Off	On	83	89	Off	Closed	Off	76	DB	Off	142	DK
241369	Off	On	83	89	Off	Closed	Off	76	DB	Off	137	DK
241370	Off	On	83	89	Off	Closed	Off	76	DB	Off	133	DK
241371	Off	On	83	89	Off	Closed	Off	76	DB	Off	128	DK
241372	Off	On	83	89	Off	Closed	Off	76	DB	Off	124	DK
241373	Off	On	83	89	Off	Closed	Off	76	DB	Off	124	DK
241374	Off	On	83	89	Off	Closed	Off	76	DB	Off	115	DK
241375	Off	On	83	89	Off	Closed	Off	76	DB	Off	115	DK
241376	Off	On	83	89	Off	Closed	Off	76	DB	Off	111	DK
241377	Off	On	83	89	Off	Closed	Off	76	DB	Off	111	DK
241378	Off	On	83	89	Off	Closed	Off	76	DB	Off	106	DK
241379	Off	On	83	89	Off	Closed	Off	75	DB	Off	102	DK
241380	Off	On	83	89	Off	Closed	Off	75	DB	Off	102	DK

Fonte: Rumo (2023).

No presente trabalho, se utiliza da metodologia através de dados de registrador de eventos de locomotivas GE AC44i, cordialmente cedidos pela Rumo Logística. Os dados são relativos a viagens de locomotivas no trecho entre Rondonópolis – MT e o porto de Santos – SP, com locomotivas podendo ser líder, comandadas, remotas, ou ainda *helpers*, locomotivas que acoplam ao final da composição em determinados trechos com rampa elevada para fornecer auxílio trator. Os dados extraídos do registrador de eventos são apresentados em planilhas

do Microsoft Excel conforme a Figura 21 apresentando o estado do veículo segundo a segundo ao longo do trajeto.

Figura 22: Trechos percorridos pelos trens avaliados neste trabalho



Fonte: ANTF (2024), adaptado pelo autor.

O trecho analisado corresponde ao corredor das ferrovias Rumo Malha Norte, entre Rondonópolis e Aparecida do Taboado – MS, e Rumo Malha Paulista, entre Rubinéia e o Porto de Santos, e pode ser visto na Figura 22. Além disso, na Tabela 1 são apresentadas informações sobre as composições das quais as respectivas locomotivas fizeram parte e trechos percorridos por cada, além de peso e comprimento dos trens. TRO se refere ao terminal de Rondonópolis, ZAR indica o pátio de Araraquara, ZEV indica o pátio de Evangelista de Souza, bairro rural no extremo sul do município de São Paulo, e ZPT é referente ao Porto de Santos.

Tabela 1: Dados sobre os trens analisados.

Referência	Posição	Peso (TB)	Comprimento (m)	Origem	Destino
1	Comandante	14582	2256	TRO	ZPT
2	Comandada	14288	2206	TRO	ZPT
3	Remota	14288	2206	TRO	ZPT
4	Helper	14107	2181	ZAR	ZEV
5	Comandante	2736	1517	ZPT	ZAR
6	Comandante	2723	1490	ZPT	ZAR
7	Comandada	2937	1526	ZPT	ZAR
8	Comandante	2365	1458	ZAR	TRO
9	Comandada	2365	1458	ZAR	TRO

Fonte: Rumo (2023), adaptado pelo autor.

Como pode-se observar, as composições cheias carregam no terminal ferroviário de Rondonópolis (usualmente grãos, líquidos como Álcool e Diesel ou containers), atravessam a malha norte e paulista e descarregam no terminal portuário de Santos (ANTT, 2023a; ANTT, 2023b). No caso das helpers, elas são acionadas em trechos onde haja aclives consideráveis, e atuam para ajudar na tração. Portanto, não se espera valores elevados de frenagem dinâmica na sua atuação.

A avaliação do potencial de economia de energia deve ser feita considerando todo o corredor ferroviário pelo qual o veículo poderá passar. Considera-se como viagem completa a saída do veículo e retorno para o mesmo ponto. Neste caso, pode-se avaliar os veículos em algumas configurações diferentes, a fim de formar uma viagem completa, como por exemplo, considerando as referências 1, 5 e 8 da Tabela 1 com a composição saindo de TRO, indo até ZPT e retorna a TRO.

3.3. INFORMAÇÕES TÉCNICAS DA LOCOMOTIVA GE AC44I

A partir de dados fornecidos pela Rumo, obteve-se os dados da Tabela 2, referentes aos valores de potência dependendo do ponto na qual a locomotiva se encontra no segundo referido. O ponto para operação em frenagem dinâmico é único, com aplicação progressiva que varia o valor de DB a depender da porcentagem de aplicação do freio dinâmico. Estes dados geralmente podem ser extraídos partir de dados presentes no manual da locomotiva.

Tabela 2: Dados de consumo da locomotiva AC44i

Ponto	Potência tração (kW)	Potência aux. (kW)	Consumo (L/h)
Idle	0	7	15
DB	0	Ver Tabela 3	28
T1	142	7	44
T2	360	13	101
T3	739	37	206
T4	1118	39	298
T5	1602	54	415
T6	2137	56	530
T7	2671	59	643
T8	3281	76	792

Fonte: Rumo (2023).

De acordo com a Tabela 2, observa-se que quanto mais alto a marcha em tração, maior o consumo da locomotiva, e maior a potência utilizada, tanto na tração quanto pelo circuito auxiliar (ver Tabela 3). No caso da frenagem dinâmica, a potência consumida pelo circuito auxiliar varia, já que a porcentagem de aplicação do freio dinâmico depende da corrente de armadura. Já a variação de potência dissipada nas resistências de grade ocorre de acordo com a porcentagem de aplicação do freio dinâmico e da velocidade do veículo, como pode ser vista na Figura 23, com DB1 (Dynamic braking 1) indicando utilização de até 12,5% do freio dinâmico, DB2 entre 12,5 e 25%, e assim por diante.

Tabela 3: Dados de potência auxiliar durante uso do freio dinâmico da AC44i

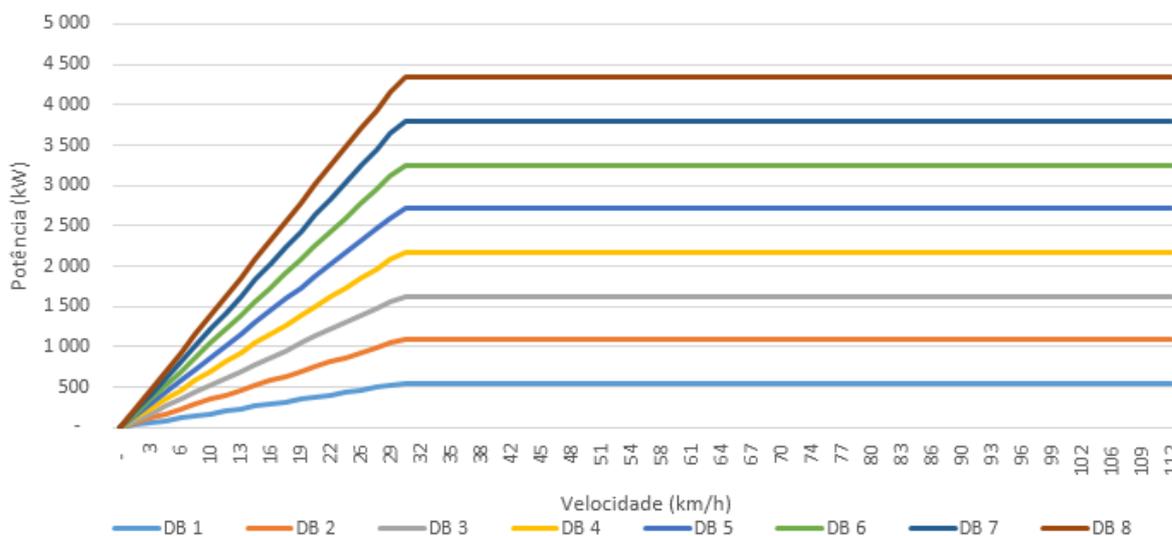
Ponto	Faixa de aplicação (%)	Potência aux. (kW)
DB1	$0 < x \leq 12,5$	14,2
DB2	$12,5 < x \leq 25$	20,1
DB3	$25 < x \leq 37,5$	43,3
DB4	$37,5 < x \leq 50$	43,3
DB5	$50 < x \leq 62,5$	55,1
DB6	$62,5 < x \leq 75$	55,1
DB7	$75 < x \leq 87,5$	61,1
DB8	$87,5 < x \leq 100$	80,5

Fonte: Rumo (2023).

A variação de potência dissipada nas resistências do freio dinâmico, que pode ser vista na Figura 23, aparece na maior necessidade de dissipação de energia para redução de velocidade, ou conservação de velocidade quando percorrendo rampas descendentes. Nela, também pode ser vista a característica principal do freio

dinâmico, que serve para redução de movimento do veículo, não para pará-lo, e também que atua com maior eficiência em velocidades mais altas, especialmente a partir de 30 km/h.

Figura 23: Variação de potência dissipada de acordo com a porcentagem de utilização do freio dinâmico



Fonte: Rumo (2023), adaptado pelo autor.

3.3. CONSIDERAÇÕES SOBRE O SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

Um sistema de armazenamento de energia eficiente deve ser capaz de absorver a máxima quantidade de energia disponível, para assim ter o melhor aproveitamento possível. Entretanto, é importante estar atento às limitações físicas e aos custos e especificações técnicas, uma vez que um sistema superdimensionado e que não seja utilizado de forma adequada, além de poder ser custoso a ponto de não representar uma economia na operação da locomotiva, pode levar a disparidades de utilização e vida útil entre os módulos internos do sistema de armazenamento.

Para a modelagem da capacidade de armazenamento de energia do sistema de regeneração, deve-se conhecer a quantidade de energia que o sistema irá gerar, e confrontar com a quantidade de energia que o sistema de armazenamento é capaz de suportar. Dentro dessa modelagem, diversos fatores deverão ser considerados, como a quantidade de energia que o sistema absorverá em determinado período de

tempo, limites de corrente no qual o sistema poderá trabalhar, limitação de espaço e peso do sistema, entre outros.

Para avaliação do sistema, por não haver disponível dados específicos de características elétricas da locomotiva AC44i, utilizou-se de testes em autocarga fornecidos pela fabricante para a locomotiva ES44ACi, considerada uma sucessora da locomotiva analisada, com a mesma potência de 4500 HP (3356 kW), mas com motor mais econômico. Os testes de carga, apresentando valores relevantes de características elétricas de cada ponto de tração que são relevantes para a definição de sistema de armazenamento com características apropriadas ao sistema, como corrente e tensão, e podem ser visualizados na Tabela 4.

Tabela 4: Valores de teste de potência em uma locomotiva ES44ACi

Ponto	Corrente (A)	Tensão (V)	Pot. bruta (kW)	Pot. Líquida (kW)	Pot. Auxiliares (kW)
1	701	278	223,7	195	18,6
2	1011	400	447,4	404	26,1
3	1472	583	932,1	858	46,2
4	1741	695	1305	1210	55,9
5	2022	812	1752	1642	64,9
6	2307	935	2312	2157	84,3
7	2567	1041	2834	2672	83,5
8	2788	1135	3356	3164	99,2

Fonte: Rumo (2023).

A potência fornecida aos motores de tração é valor progressivo, e irá depender da velocidade de atuação do momento e do ponto da locomotiva. A partir dos valores de potência, pode-se estimar o consumo que a locomotiva terá em cada ponto, tanto no circuito auxiliar quanto na tração.

A necessidade de tamanho do sistema de armazenamento das baterias pode ser avaliada a partir da tensão requisitada e a partir da quantidade de energia armazenada. No caso da avaliação a partir da tensão, pode-se utilizar de conversores, como citado, para manter o nível ideal da tensão requisitada pelo sistema.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, aborda-se todo o desenvolvimento da metodologia para atingir as estimativas de regeneração do sistema. Para isso, avalia-se a operação no trecho, com o objetivo de extrair as características de operação da ferrovia avaliada, avalia-se o modelo regenerativo de maneira ideal, aborda-se a utilização da energia regenerada via motor de tração, circuito auxiliar e modo combinado (alimentação de ambos em paralelo), e avalia-se baterias para o sistema, com definição de modelo e estimativa de economia gerada.

4.1. AVALIAÇÃO DA OPERAÇÃO NO TRECHO

A avaliação da operação é ponto crucial para conhecer a operação ao longo da movimentação. Como as características ideais desse sistema são inertes ao trecho, é necessário extrair e tratar os dados relevantes para essa avaliação, tais como utilização do freio dinâmico ao longo da movimentação. Também é importante avaliar o trecho, formas de operação e demais detalhes relevantes que são abordados ao longo deste tópico.

4.1.1. Filtragem de Dados Úteis Para a Avaliação

O primeiro passo para a avaliação da operação é utilizar os dados dos trens descritos na Tabela 1 para avaliar a utilização dos modos de tração e frenagem de cada veículo ao longo do trajeto. Para isso, além desses dados, avalia-se a posição, horário, velocidade, ponto e aplicação do freio de cada veículo, para definir data e horários de início e final de utilização de cada composição, e assim filtrar o período de utilização dos veículos para otimização dos cálculos.

Considerando a Tabela 1, avalia-se o consumo conjunto dos veículos de acordo com os horários de registro de movimentação das locomotivas, chegou-se ao trem 1, que abrange as referências 1, 2, 3 e 4 no trecho exportação, o trem 2, que abrange as referências 5, 7, 8 e 9 no trecho importação, e o trem 3, que abrange as referências 6, 7, 8 e 9 no trecho importação. Vale ressaltar que nem todos os trens teóricos de fato ocorreram. Por exemplo, no trem 1, as referências 2 e 3

efetivamente fizeram parte do mesmo trem, o que não é verdade para as referências 2 e 4. As referências 8 e 9 também fizeram parte do mesmo trem, mas a 5, 6 e 7 não fizeram.

Para a definição dos valores úteis para avaliar o potencial de economia do sistema, filtrou-se os seguintes valores:

- Dynamic Brake (DB): Refere-se ao freio dinâmico, e indica qual a porcentagem de aplicação quando o modo de frenagem dinâmica está aplicado. Utiliza-se para definição do ponto de aplicação naquele momento (DB1, DB2, [...], DB8);
- Throttle: Marcha. Indica se a locomotiva está em tração e, se sim, em qual marcha (T1, T2, [...], T8), no neutro ou em freio dinâmico;
- Speed: Velocidade. Se relaciona com a marcha e com os dados da Figura 23 para indicar a potência dissipada, que pode ser utilizada para armazenamento nas baterias durante a aplicação do freio dinâmico;
- TE (Tractive Effort): Esforço trator. Neste caso, indicará o consumo dos motores de tração quando o veículo estiver em tração.

A partir da manipulação destes valores, chegou-se aos resultados que serão debatidos nas próximas seções.

4.1.2. Características da Operação no Trecho Exportação

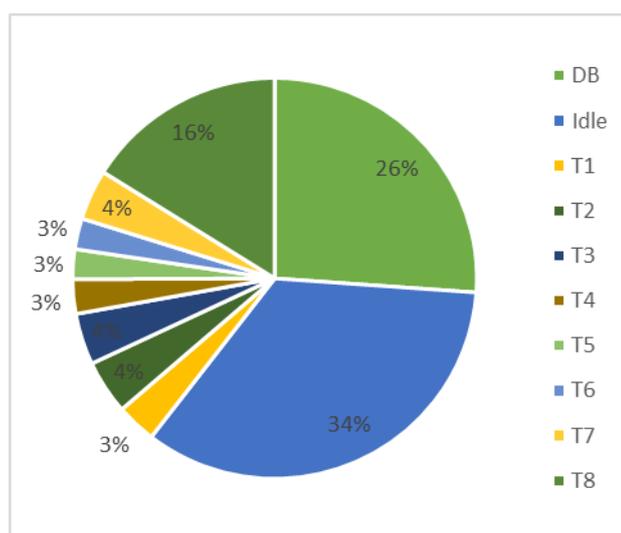
O trecho exportação é onde os trens deste trecho usualmente estão com mais peso na composição, uma vez que cargas como farelo, milho e soja são transportadas em vagões específicos para este transporte (Hopper, neste caso) e somente como exportação, e acabam retornando vazios.

Nos trechos da RMN, a VMA (velocidade máxima autorizada) é de 80 km/h, e observa-se trechos com essa operação ao longo dos dados. No caso da RMP, onde a ferrovia passa por dentro de diversas cidades do interior paulista, a VMA varia entre 20 km/h e 68 km/h. Essa operação máxima é atingida em alguns trechos, mas observa-se que são em trechos específicos. Para a referência 1, a média de velocidade foi maior, com 30,68 km/h. No caso das referências 2 e 3, a velocidade

média foi 27,45 km/h, enquanto na referência 4 (a helper), apresentou velocidade média de 24 km/h.

Avaliando as três primeiras referências, observa-se que em quase 1/3 do tempo o veículo ficou em Idle. Quando no momento da formação do trem, que é uma operação demorada e está inclusa no tempo de viagem, o veículo opera em Idle, T1 e T2, e este tempo tem influência no tempo observado na Figura 24, Figura 25, Figura 26 e Figura 27. Observa-se, analisando os dados, que estes pontos se referem ao veículo parado em 94% das ocorrências, com os outros 6% dos casos ocorrendo em poucos segundos, e geralmente entre um ponto de tração e outro de frenagem dinâmica, o que indica que ocorre o registro como ponto intermediário entre a tração e a frenagem. Também se destaca o tempo de utilização em T8, representando 16% do tempo global e 41% do tempo em tração.

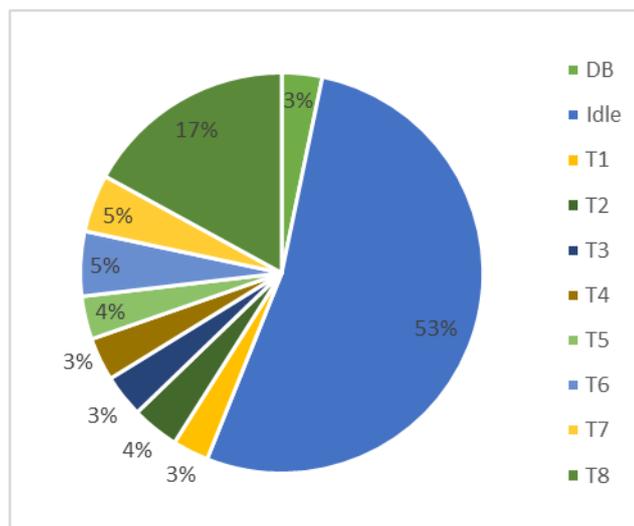
Figura 24: Utilização de cada ponto de marcha para todas as locomotivas no trecho exportação



Fonte: autor.

Além disso, pode-se observar que os veículos estiveram em frenagem dinâmica em 26% do tempo, onde poderia estar gerando energia para ser reaproveitada. No caso da tração, considerando todas as marchas, o veículo esteve nesse modo em 40% do tempo global. A característica de operação, de movimentação carregada, tende a requerer tração mais elevada, o que pode ser observado com a locomotiva líder ter passado mais de 3 horas do percurso aplicando esforço trator acima de 500 kN.

Figura 25: Utilização de cada ponto de marcha para a locomotiva Helper



Fonte: autor.

No caso da Helper, que esteve acoplada entre Araraquara e Evangelista de Souza, observa-se que esteve em Idle por 53% do tempo. Quando analisado o trecho, percebe-se que em diversos pontos se atravessa zonas urbanas, o que tende a reduzir a velocidade de operação. Além disso, o valor elevado de tempo em Idle é resultado da característica de operação da locomotiva Helper, que somente é acionada em trechos de rampas pesadas, com inclinação acima de 1,5% e onde o trem tende a parar sem a presença da Helper auxiliando a tração na cauda da composição.

Quanto à tração, é possível observar que esteve gerando esforço trator em 44% do tempo de utilização, o que não chega a ser surpreendente, uma vez que este é o objetivo da locomotiva Helper no sistema. Também se nota a pouca utilização no tempo de frenagem dinâmica, representando apenas 3% do trecho.

4.1.3. Características da Operação no Trecho Importação

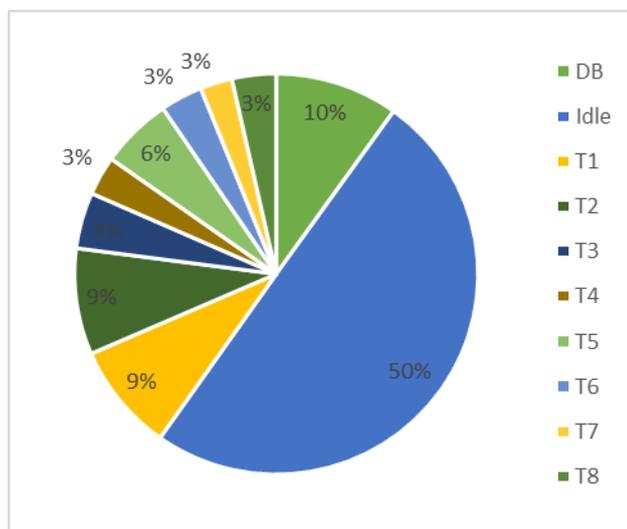
O trecho importação costuma ser de movimentação de menor carga, uma vez que por mais que haja transporte de algumas mercadorias, como contêineres e fertilizantes, também há muito retorno de vagões Helper, para transporte de celulose e tanques, por exemplo.

Observando as referências do sentido importação, observa-se grande diferença entre dois trechos. No trecho ZPT-ZAR (referências 5, 6 e 7), observou-se médias de velocidade de 23,66 km/h, 22,02 km/h e 15,43 km/h, respectivamente (lembrando que os três veículos estiveram em trens diferentes). Tais velocidades não surpreendem ao observar o relevo do trecho, o qual atravessa a serra do mar e tem velocidade reduzida por questões de segurança, apesar de ser um trecho de via dupla. Por exemplo, a estação de Evangelista de Souza está a uma altitude de 756 m, enquanto Araraquara está a 662 m de altitude.

O segundo trecho (referências 8 e 9, mesmo trem) apresentou média de 35,3 km/h. Além do relevo mais favorável e menor passagem por zonas urbanas, o trecho da malha Norte apresenta VMA de 80 km/h, o que colabora com a média mais alta de velocidades em comparação com o trecho até ZAR.

Quando observado a diferença de utilização de ponto em cada parte do trecho, como pode ser visto na Figura 26, mais uma vez a discrepância fica evidente. No caso do trecho ZAR-ZPT, o veículo ficou em Idle por 50% do tempo, 10% em frenagem dinâmica e 40% em tração, sendo metade (20% global) em T1, T2 ou T3, corroborando com a característica de baixa velocidade observada anteriormente.

Figura 26: Utilização de cada ponto de marcha para o trecho ZPT-ZAR

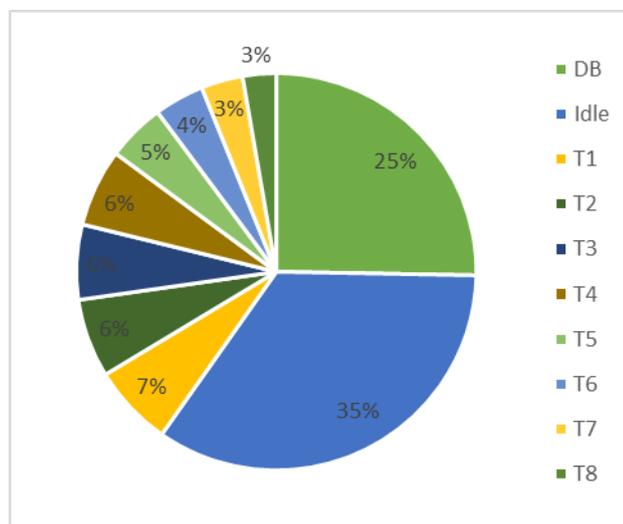


Fonte: autor.

Para o segundo trecho, também observa-se a mesma correlação com as médias de velocidade. Observa-se ocorrência de Idle em 35% do tempo, com 25% de utilização do freio dinâmico. Como no caso anterior, nota-se menor utilização de pontos mais altos de tração, com os pontos de T5 a T8 representando 15% do

tempo de utilização global. Tal característica reflete o menor requisito de tração do trecho na característica de transporte citada.

Figura 27: Utilização de cada ponto de marcha para o trecho ZAR-TRO



Fonte: autor.

4.1.4. Utilização em Tração e Consumo

Um dos pontos que se pode avaliar, para atingir maior assertividade nos cálculos apresentados nos próximos itens, é a utilização do veículo em tração. Esse dado pode ser utilizado para obtenção mais assertiva da eficiência do motor diesel para o veículo através do seu cruzamento com os dados de potência de tração, em kW, e de consumo, em L/h, apresentado na Tabela 2.

Um dos dados apresentados pelo registrador de eventos é o esforço trator, apresentado em kN. Para obtenção do valor equivalente de potência relacionado com esse esforço trator, pode-se utilizar da seguinte equação:

$$P_T = \frac{F_T * v}{3,6} [kW] \quad (13)$$

Nessa equação, a potência relacionada com o esforço trator (kN) é relacionada com a velocidade (apresentada em km/h). O fator 3,6 é utilizado para conversão para watts (J/s = N*m/s). Como se pode observar, essa relação é a

potência produzida em cada segundo, mesmo intervalo de tempo dos registros apresentados. Essa potência pode ser convertida em valores de energia associada, em kWh, dividindo o resultado (ou a soma de todos os resultados em determinado intervalo de tempo) por 3600. Para a praticidade e melhor fluidez do trabalho, os valores de energia serão apresentados em quilowatts-hora [1 kWh = 3,6 MJ].

O valor de consumo, por sua vez, pode ser obtido de forma mais direta, já que está relacionado com o ponto da locomotiva em determinado instante. Os valores de consumo de cada veículo, assim como os dados de energia relacionada com a potência aplicada em cada ponto, são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Energia relacionada ao esforço trator e consumo de cada locomotiva

Ref.	Energia do esforço trator (kWh)	Energia do circuito auxiliar (kWh)	Energia total (kWh)	Consumo (L)
1	54.160	2.793	56.952	16.992
2	36.491	1.857	38.348	11.582
3	63.214	2.765	65.978	19.214
4	17.540	661	18.201	5.477
5	15.397	833	16.230	5.232
6	6.071	358	6.427	2.184
7	3.120	222	3.342	1.417
8	18.178	990	19.168	6260
9	10.763	699	11.463	4.087

Fonte: autor.

Com estes valores, associados com o consumo do circuito auxiliar, os quais são apresentados com mais detalhes em 4.3.1. Modo de Consumo Via Circuito Auxiliar, pode-se obter valor aproximado para a eficiência do motor em cada movimentação:

$$\eta_T = \frac{\text{Energia efetivamente utilizada}}{\text{Energia total do volume de Diesel utilizado}} \quad (14)$$

Este valor aproximado de eficiência do ciclo diesel é calculado como uma proporção da energia equivalente à soma da potência do esforço trator gerado pelo motor de tração (13) ao longo da movimentação e da energia do circuito auxiliar para todos os pontos, e a energia total da soma do volume de Diesel consumido pelo motor de tração no mesmo espaço temporal, que é obtido ao cruzar o ponto da locomotiva no instante i com o consumo apresentado na Tabela 2.

Como exemplo da utilização das equações 13 e 14, considerando um instante com ponto T3, velocidade de 28 km/h e esforço trator de 84 kN (Lembrando que $W=J/s$):

$$P_T = \frac{84 * 28}{3,6} = 653,33 [kW]$$

$$P_{aux}(T3) = 37 [kW] \text{ (Tabela 2)}$$

$$V(T3) = 206 \frac{L}{h} \frac{1h}{3600s} = 0,0572 \frac{L}{s}$$

$$\eta_T = \frac{\left(\frac{653,33 [kW]}{3600 s}\right) + \left(\frac{37 [kW]}{3600 s}\right)}{\left(\frac{3,6 [MJ]}{35,3205 \left[\frac{MJ}{L}\right]}\right) \cdot 0,0572 \left[\frac{L}{s}\right]} = \frac{0,1918}{0,5612} = 34,03\%$$

Esse valor de eficiência é instantâneo, e ao longo do trabalho, para fins de simplificação, se utilizará valores globais de eficiência para as referências. Além disso, o valor de eficiência pode ser utilizado para relacionar um potencial de economia de combustível com a energia utilizada no freio dinâmico de maneira mais direta. Em uma abordagem mais conservadora e detalhada, pode-se incluir a eficiência do circuito elétrico da locomotiva em relação ao sistema de armazenamento e reutilização de energia, que, como sugestão, pode ser analisado em trabalhos posteriores.

Considerando o poder calorífico inferior do Diesel-D1 como 41,3 MJ/kg (Henschel, 2018), ou 35,7 MJ/L, considerando a densidade como 0,835 kg/L (Petrobrás, 2021) e a taxa de conversão de 1 kWh para 3,6 MJ, pode-se obter a equivalência de energia do diesel consumido em kWh através da seguinte fórmula:

$$E_D = V(L) * \frac{1 (kWh) * 35,0675 \left(\frac{MJ}{L}\right)}{3,6 (MJ)} \quad (15)$$

$$E_D(kWh) = V(L) * 9,8113 \left(\frac{kWh}{L}\right)$$

Tabela 6: Dados relacionados à eficiência do ciclo de tração.

Ref.	Energia total (kWh)	Consumo (L)	Energia equivalente (kWh)	η_T (%)
1	56.952	16.992	138.207	34,16
2	38.349	11.582	94.207	33,75
3	65.978	19.214	156.282	35,00
4	18.201	5477	44.549	33,87
5	16.230	5.232	42.559	31,62
6	6.428	2.183	17.761	30,00
7	3.342	1.417	11.528	24,03
8	19.168	6.260	50.918	31,21
9	11.462	4.087	33.244	28,58

Fonte: autor.

Na Tabela 6, apresenta-se os dados relacionados ao ciclo de tração, de maneira compilada. A energia total é a soma da energia aplicada no motor de tração e no circuito auxiliar, apresentado na Tabela 5. A energia consumida é a aplicação da equação (15) no consumo de diesel obtido, e a eficiência é a relação apresentada na equação (14).

Avaliando de maneira global, se obtém média de 31,36% de rendimento, com desvio padrão de 3,47%. Além disso, observa-se maior eficiência e consistência nas locomotivas do trecho exportação (média de 34,19%, com 0,56% de desvio padrão), quando em comparação com as do trecho importação (média de 29,09%, com 3,06% de desvio padrão).

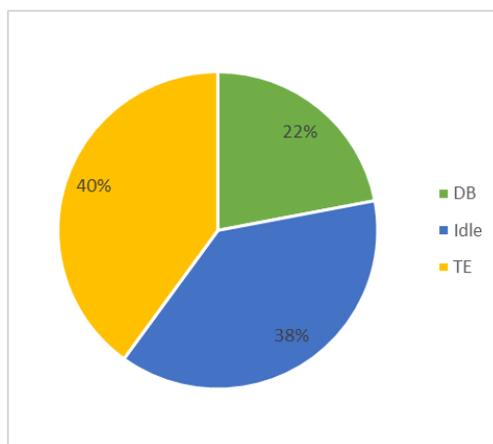
4.1.5. Utilização do Freio Dinâmico

Como discutido anteriormente, a frenagem dinâmica é utilizada para redução da velocidade, uma vez que para velocidades muito baixas, sua eficiência é reduzida, como pode ser observado na Figura 13. Quando se observa o contexto global dos registros analisados, nota-se que em 22% do tempo o veículo esteve em frenagem dinâmica. Ou seja, em cerca de 1/5 da viagem, o veículo poderia estar regenerando energia para ser utilizada posteriormente, na tração (correspondente a 40% do tempo de viagem) ou na alimentação do circuito auxiliar.

Observa-se também a diferença no ponto de aplicação das locomotivas dentro de um mesmo trem. Tal variação é gerada pela diferença entre a aplicação de cada locomotiva dentro do trem através do sistema Trip Optimizer, utilizado pela Rumo como auxílio para planejamento das viagens. Esse sistema correlaciona a

posição esperada de cada locomotiva ao longo da viagem, e gera o ponto esperado para o veículo em cada posição.

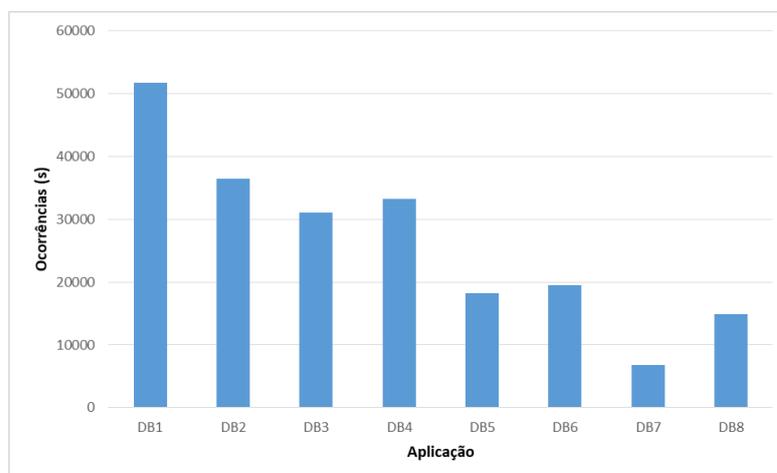
Figura 28: Ocorrência de cada modo dos motores de tração nos dados analisados



Fonte: autor.

Na Figura 29, observa-se maiores ocorrências nos pontos abaixo de 50% (DB1, DB2, DB3 e DB4), com a aplicação em pontos maiores sendo nitidamente mais baixa que nos demais pontos. Este dado demonstra correlação com os dados de velocidade média apresentados em 4.1.2. Características da Operação no Trecho Exportação, com menor dissipação de energia via freio dinâmico em baixas velocidades, devido tanto ao menor requisito de energia cinética a ser dissipada quanto à eficiência do próprio freio dinâmico em velocidades reduzidas.

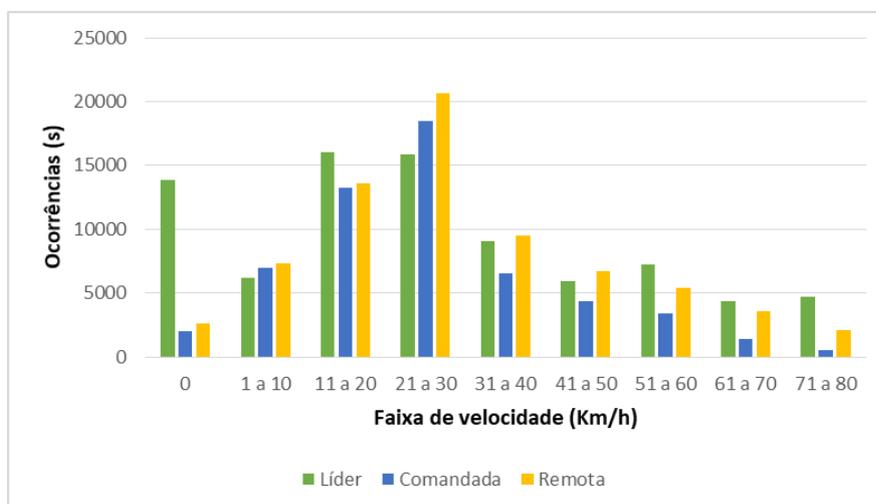
Figura 29: Aplicação do freio dinâmico no trecho exportação



Fonte: autor.

Quando se observa as faixas de velocidade nas quais o freio dinâmico é utilizado no sentido exportação, nota-se o pico de aplicação justamente na faixa de velocidade entre 21 e 30 km/h, no qual está a velocidade média do trajeto. Também se observa na Figura 30 a alta ocorrência de velocidades iguais a zero na locomotiva líder, o que pode apontar que nesta locomotiva há mais alteração do ponto de aceleração do que nas demais, ocasionando o alto registro, que equivale a 16,6% dos registros de aplicação.

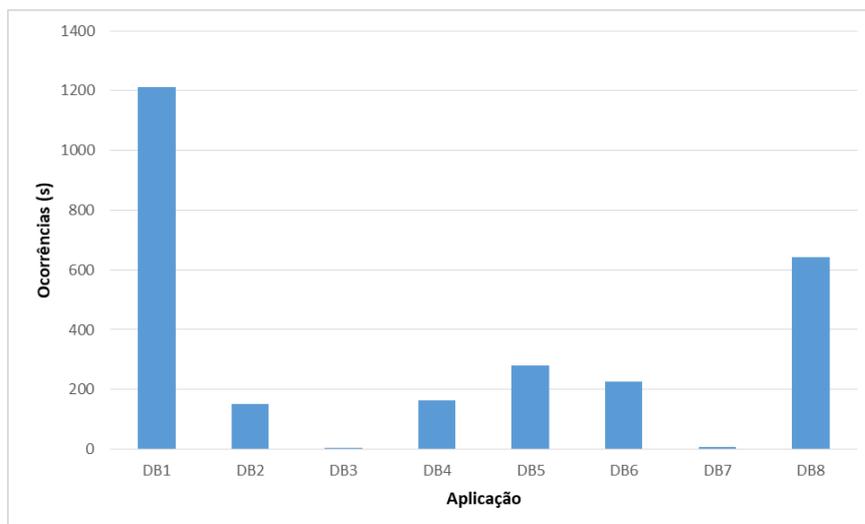
Figura 30: Faixas de velocidade da utilização do freio dinâmico no sentido exportação



Fonte: autor.

No caso da locomotiva Helper, nota-se pouca aplicação do freio dinâmico, conforme esperado, uma vez que ela auxilia em trecho de aumento de elevação antes da descida da serra do mar com veículo carregado, auxiliando principalmente com mais esforço trator para a composição. Assim sendo, não aparenta ser vantajoso aplicar o modelo de regeneração neste veículo, uma vez que seria custoso e pouco utilizado.

Figura 31: Potência de aplicação do freio dinâmico pela locomotiva Helper.

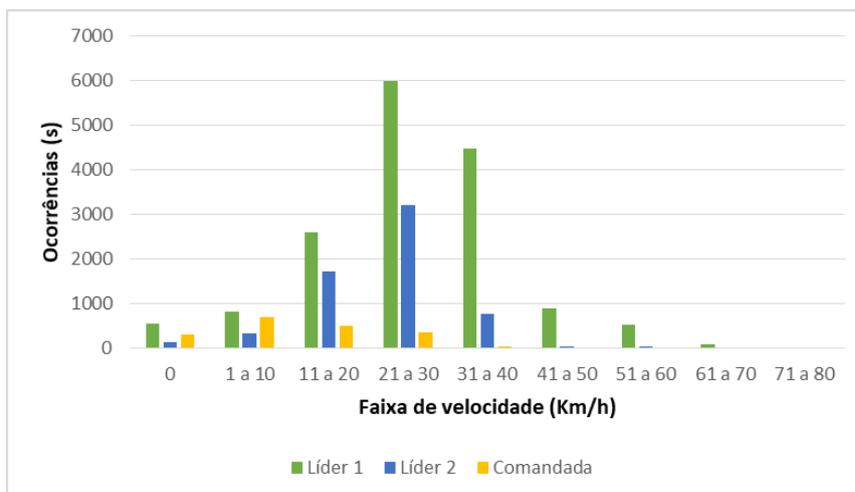


Fonte: autor.

De fato, quando se olha os dados apresentados na Figura 31, observa-se 2686 ocorrências de aplicação do freio dinâmico, correspondentes a 44 minutos e 46 segundos em um intervalo de 23 horas analisados. Além disso, nota-se a elevada aplicação em DB1, com 1212 ocorrências, o equivalente a 20 minutos e 12 segundos, que representam 45% do tempo de utilização do freio dinâmico, ou 1,46% do tempo total de utilização da locomotiva Helper no trecho analisado.

Quando se observa as características do trecho exportação (Figura 32), divide-se em dois trechos, como visto anteriormente. Para o primeiro trecho (ZPT-ZAR), novamente observa-se maior ocorrência nas faixas próximas à velocidade média, especialmente nas líderes (referências 5 e 6, respectivamente). Também se destaca fortemente a ocorrência reduzida ou inexistente em velocidades acima de 40 km/h, uma vez que este trecho de subida de serra há menores velocidades de operação.

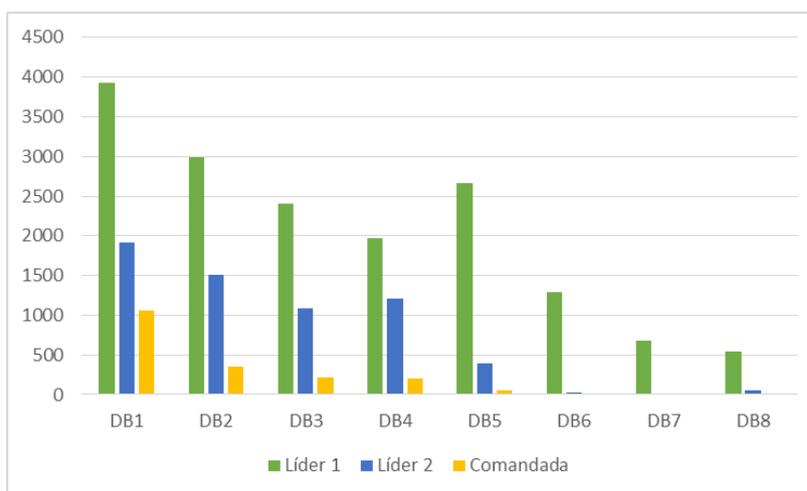
Figura 32: Faixas de velocidade da utilização do freio dinâmico no trecho ZPT-ZAR



Fonte: autor.

Além das características de velocidade apresentadas, pode-se observar na Figura 33 que as ocorrências de frenagem dinâmica para o trecho citado são majoritariamente em baixa aplicação, tendo inclusive pouca ocorrência em faixas acima de DB5. Com o cruzamento de informações, fica explícita a característica de baixo reaproveitamento de energia para essa operação.

Figura 33: Potência de aplicação do freio dinâmico no trecho ZPT-ZAR

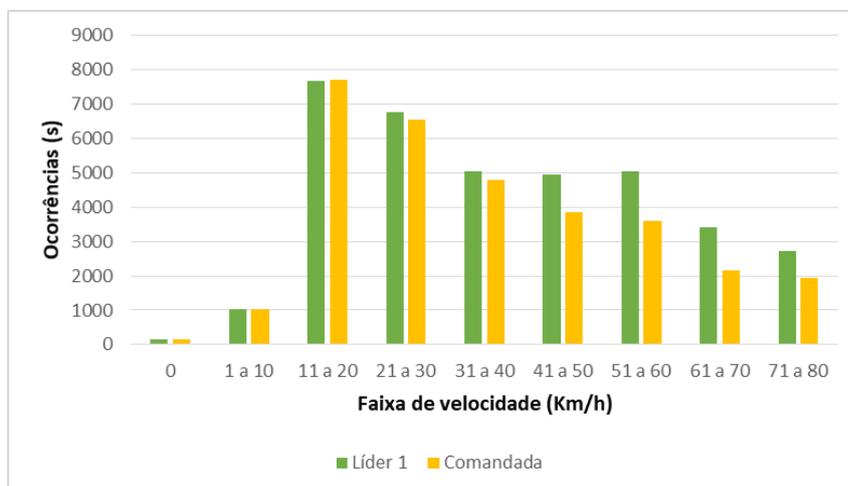


Fonte: autor.

Para o trecho ZAR-TRO, com média de velocidades mais altas, nota-se dispersão mais homogênea entre as faixas de velocidade, com poucas ocorrências até 10 km/h. Nas demais faixas, apesar de haver queda para velocidades maiores,

ainda há grande ocorrência de aplicação em todas as faixas, o que tende a apontar um potencial considerável de regeneração neste trecho.

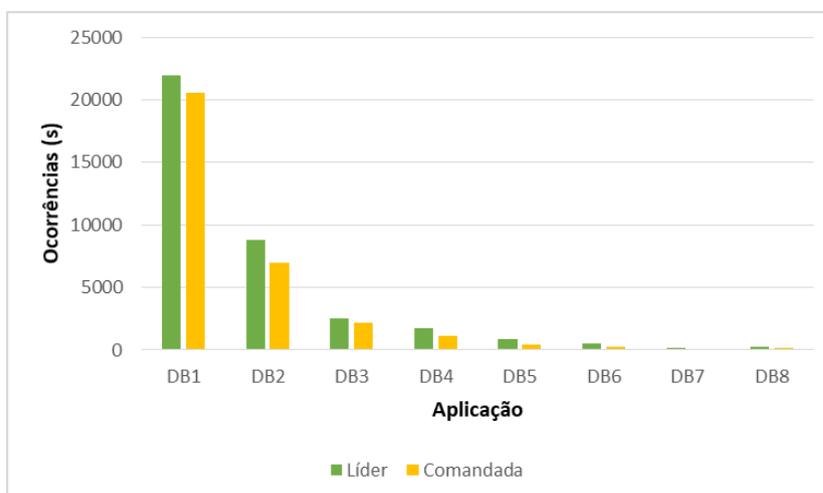
Figura 34: Faixas de velocidade da utilização do freio dinâmico no trecho ZAR-TRO



Fonte: autor.

Apesar da grande utilização, nota-se que não há utilização muito severa do freio dinâmico. Neste trecho, a aplicação apontada como DB1 representa 62% das ocorrências, e DB2 representa 23%, totalizando 85% das ocorrências nesses dois modos. De fato, as faixas mais elevadas (DB5 ou maiores) ocorrem apenas em 4% das ocorrências, o que infere em este trecho, apesar de ter mais ocorrências, estas são suaves e progressivas.

Figura 35: Potência de aplicação do freio dinâmico no trecho ZAR-TRO



Fonte: autor.

Como observa-se nesta sessão, a característica de utilização do veículo, tanto em tração quanto em frenagem dinâmica é variável e diversa ao longo da movimentação do veículo. Este fato é influenciado por diversos fatores, como relevo, ambiente onde há a movimentação (urbano ou rural), características de peso transportado no trecho, função de cada locomotiva no trem e restrições da própria via, que englobam velocidade máxima autorizada, ocorrência de passagens de nível, rampa e raio mínimo de curva.

4.2. ESTIMATIVA IDEAL DA ECONOMIA GERADA PELA ENERGIA REGENERADA

Para uma avaliação primária do potencial de regeneração de cada veículo pode-se aplicar um banco de baterias ideal ao modelo analisado, avaliando a aplicação do freio dinâmico e o acúmulo de carga gerada pelo motor de tração no modo reverso durante essa aplicação ao longo do trecho analisado. Essa avaliação pode considerar apenas o valor regenerado, ou incluir uma simulação de consumo nos trechos onde o veículo estiver em tração e, conseqüentemente, descarregando o banco de baterias. Neste primeiro momento, avalia-se apenas o acúmulo potencial de energia dos veículos, desconsiderando eventuais descargas.

Para avaliação do valor potencial máximo de regeneração, inicialmente considera-se um sistema ideal, sem perdas e sem capacidade máxima de armazenamento. Assim sendo, o total de energia recuperado é equivalente ao total de energia dissipado no banco de resistores. Para chegar a esse valor, utiliza-se da equação:

$$E_{FD} = \sum_{i=0}^n \frac{P_i(v, DB\ notch)}{3600} \text{ [kWh]} \quad (16)$$

Onde E_{FD} representa a soma total de energia gerada pelo motor de tração durante a frenagem dinâmica. $P_i(v, DB\ notch)$ representa a potência gerada no instante i em função da velocidade do veículo e do ponto de aplicação do freio dinâmico naquele instante, em relação aos dados da Figura 23. Para se obter o valor em kWh, divide-se por 3600, uma vez que a potência em Watts equivale a Joules por segundo. Aplicando essa equação para cada instante i em cada um dos veículos

analisados, obtém-se a energia dissipada no freio dinâmico, que é a energia máxima teórica que se pode regenerar nestas condições, e pode ser visto na Tabela 7.

Como exemplo de aplicação da equação 16, para o instante onde há uma aplicação de 53% do freio dinâmico (equivalente a DB5) e velocidade de 32 km/h:

$$E_{FD} = \frac{P_i(v, DB\ notch)}{3600} = \frac{P_i(32\frac{km}{h}, DB5)}{3600} = \frac{2.708,83}{3600} = 0,75 \text{ [kWh]}$$

Replicando para todos os pontos ao longo da movimentação e aplicando a somatória, obtém-se os valores da Tabela 7. Quando o ponto não estiver em frenagem dinâmica, o valor da potência é igual a zero.

Tabela 7: Energia dissipada pelo freio dinâmico nas locomotivas analisadas

Referência	Posição	E _{FD} [kWh]
1	Comandante	26.371
2	Comandada	19.049
3	Remota	24.491
4	Helper	1.273
5	Comandante	6.900
6	Comandante	1.667
7	Comandada	146
8	Comandante	8.049
9	Comandada	5.947

Fonte: autor.

Considerando o total de cada combinação para os trechos, temos uma energia total dissipada de 71.183 kWh para o trecho exportação, 69.911 kWh para o trecho exportação sem a locomotiva Helper, 21.042 kWh para o trecho importação com a referência 5 como líder e 15.810 kWh para o trecho importação com a referência 6 como líder. Vale ressaltar que não se obteve dados de registrador de eventos de locomotivas remotas no trecho importação.

Uma avaliação mais tangível sobre essa economia é valorar essa energia dissipada. Isso pode ser feito convertendo o valor de energia para energia dissipada através de uma rápida manipulação da equação (15), e precificando o volume equivalente a partir de uma referência:

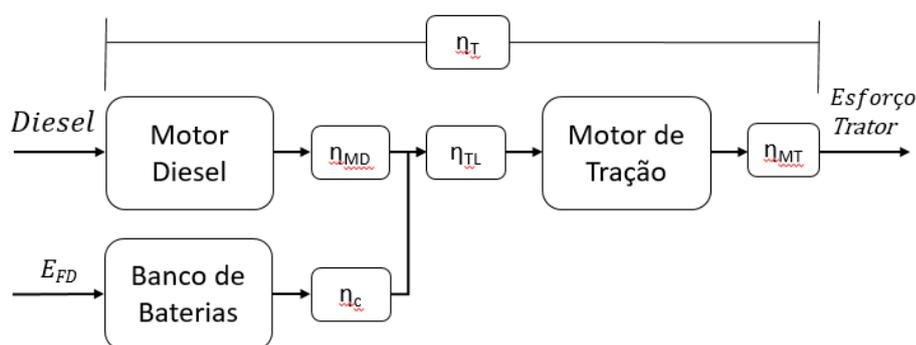
$$V = \frac{E_{FD} \text{ [kWh]} \cdot 3,6 \text{ [MJ]}}{35,0675 \left[\frac{MJ}{L}\right] \cdot 1 \text{ [kWh]}} = \frac{E_{FD}}{9,8113} \text{ [L]} \quad (17)$$

Para estimativa do potencial de economia na operação, o potencial de economia de combustível obtido nos cálculos é a média do custo do diesel da Petrobrás para venda ao consumidor final para o estado de São Paulo (uma vez que a maior parte do combustível consumido pela Rumo neste trecho vem de abastecimentos no pátio de Tutóia, em Araraquara), no mês de junho de 2024, pelo preço médio de R\$ 6,00 (Petrobrás, 2024; Rumo, 2023).

Além disso, para um valor mais realista, a equação é ponderada pela eficiência calculada para o ciclo de tração (η_T), apresentada na Tabela 6, pela eficiência de motor de tração (η_{MT}) ferroviário apresentada por Alekseeva *et al.* (2021), apontada como 69,8% para motores de tração em aplicação na faixa de até 3,3 kV (valor acima do máximo apresentado na Tabela 4), pela eficiência do circuito de conversão (η_c) 92%, valor médio apresentado por Wai *et al.* (2014), e pela eficiência do circuito de transformação de energia da locomotiva (η_{TL}), no valor de 84% (Rumo, 2023).

Tais considerações de eficiência são feitas, uma vez que a energia entrará no sistema saindo do banco de baterias diretamente no circuito de alimentação dos motores de tração, e a eficiência da Tabela 6 é calculada entre o volume de diesel e o esforço trator aplicado pelos motores de tração. Um diagrama simplificado do ciclo de aplicação da energia pode auxiliar a entender a modelagem utilizada.

Figura 36: Fluxo de energia no sistema de tração, com as eficiências relacionadas



Fonte: autor.

Para o equacionamento do fluxo apresentado na figura 36, onde $P_{MT,Diesel}$ aponta a fração da energia gerada pelo motor Diesel que se transforma em esforço

trator, P_{Bat} indica a fração da energia do banco de baterias que se transforma em esforço trator, P_{MD} indica a potência gerada pelo motor diesel e P_{BAT} indica a potência gerada pelo banco de baterias:

$$\begin{aligned}
 P_{MT,Diesel} &= P_{Diesel}\eta_{MD}\eta_{TL}\eta_{MT} \\
 P_{MT,Bat} &= P_{Bat}\eta_c\eta_{TL}\eta_{MT} \\
 \text{Igualando para encontrar a equivalência:} \\
 P_{Diesel}\eta_{MD}\eta_{TL}\eta_{MT} &= P_{Bat}\eta_c\eta_{TL}\eta_{MT} \\
 P_{Diesel} &= \frac{P_{Bat}\eta_c}{\eta_{MD}}
 \end{aligned}$$

Em geral, a eficiência do motor diesel fica em torno de 40% (Rumo, 2023). Entretanto, os valores de eficiência obtidos são equivalentes ao ciclo de tração (η_T), apresentados na Tabela 6, correspondem a todo o ciclo diesel, entre a entrada de diesel no motor e a tração do rodeiro pelo motor de tração (as engrenagens são assumidas como ideal). Assim, para trabalhar com os valores calculados anteriormente, com TE sendo o esforço trator:

$$\begin{aligned}
 TE_{Diesel} &= P_{Diesel}\eta_T, \text{ onde } \eta_T = \eta_{MD}\eta_{TL}\eta_{MT} \\
 TE_{Bat} &= P_{Bat}\eta_c\eta_{TL}\eta_{MT} \\
 \text{Isolando } \eta_{MD} \text{ para } TE_{Diesel}: \\
 \eta_{MD} &= \frac{\eta_T}{\eta_{TL}\eta_{MT}} \\
 \text{Assim: } P_{Diesel} &= \frac{P_{Bat}\eta_c}{\eta_{MD}} = \frac{P_{Bat}\eta_c\eta_{TL}\eta_{MT}}{\eta_T}
 \end{aligned}$$

Convertendo para volume como na equação (15):

$$V_{eq} = V \frac{\eta_{MT}\eta_c\eta_{TL}}{\eta_T} \quad [L] \quad (18)$$

Vale o destaque de que nesse caso o termo E_{FD} indica a energia originada na frenagem dinâmica que foi absorvida pelo banco de baterias, desconsiderando a energia que o sistema de proteção do banco de baterias deve restringir e dissipar nos resistores. Como exemplo, as equações (17) e (18) aplicadas à referência 1, onde a energia dissipada no freio dinâmico é de 26.371 kWh ou 94.935 MJ:

$$V = \frac{E_{FD}}{9,8113} = \frac{26.371}{9,8113} = 2.688 L$$

$$V_{eq} = V \frac{\eta_{MT} \eta_c \eta_{TL}}{\eta_T} = 2.688 \frac{0,698 \ 0,92 \ 0,84}{0,3416} = 4.244 \text{ L}$$

Tabela 8: Conversão de valores da energia dissipada [MJ], Volume [L] e custo [R\$]

Referência	Posição	E _{FD} [MJ]	V _{eq} [L]	Custo [R\$]
1	Comandante	94.935	4.244	25.463,97
2	Comandada	68.57	3.103	18.620,64
3	Remota	88.167	3.847	23.083,28
4	Helper	4.581	206	1.239,42
5	Comandante	24.840	1.200	7.199,48
6	Comandante	6.003	306	1.833,42
7	Comandada	525	33,4	200,33
8	Comandante	28.978	1.418	8.508,53
9	Comandada	21.408	1.144	6.862,66

Fonte: autor.

Observando a Tabela 8, nota-se a elevada economia em alguns trechos, condizente com o visto na Tabela 7. Considerando novamente o total de cada combinação para os trechos, temos uma economia potencial de 11.401 L / R\$ 68.407,31 para o trecho exportação, 11.195 L / R\$ 67.167,89 para o trecho exportação sem a locomotiva Helper, 3.795 L / R\$ 22.771,00 para o trecho importação com a referência 5 como líder e 2.901 L / R\$ 17.404,94 para o trecho importação com a referência 6 como líder.

Assim, nota-se um potencial econômico teórico em cenário ideal para uma viagem completa (saindo e voltando para o mesmo ponto) de 15.196 L de diesel, o equivalente a R\$ 91.138,71. Nos próximos itens, estes dados serão refinados para valores mais próximos da realidade.

4.3. MODOS DE CONSUMO A SEREM CONSIDERADOS

Como observado em outros trabalhos, há diversas configurações de consumo da energia do sistema de regeneração que podem ser considerados. Esses modos englobam a aplicação para suprir o consumo do circuito auxiliar, a distribuição entre um ou vários motores de tração, e a limitação ou não de porcentagem de suprimento à utilização dos motores de tração.

No caso da não limitação da quantidade de energia, teoricamente o MT pode ficar momentaneamente sem suprimento de energia quando o banco de baterias

descarregar. As consequências dessa situação e prevenção de ocorrência são pontos a se considerar em sistemas de controle de energia, que não são alvo de estudo deste trabalho, mas sua ocorrência potencial pode ser considerada como pontos de atenção na escolha do sistema sugerido neste trabalho.

4.3.1. Modo de Consumo Via Circuito Auxiliar

O primeiro modo de consumo avaliado é o consumo via circuito auxiliar. Para a obtenção deste consumo, pode-se cruzar diretamente o ponto da locomotiva em determinado instante com o valor de energia do circuito auxiliar apresentado nas Tabelas Tabela 2 e Tabela 3. O valor de energia do circuito auxiliar (E_{ca}) é uma soma do consumo via circuito auxiliar em cada instante da movimentação para a referência.

$$E_{ca} = \sum_{i=0}^n \frac{P_i (DB, notch)}{3600} \text{ [kWh]} \quad (19)$$

Tabela 9: Dados de consumo do circuito auxiliar para as locomotivas analisadas

Ref.	Posição	E_{ca} [kWh]	V_{eq} [L]	Custo [R\$]
1	Comandante	2.793	149	891,90
2	Comandada	1.858	100	600,45
3	Remota	2.765	144	861,89
4	Helper	661	35,5	212,97
5	Comandante	833	47,9	287,46
6	Comandante	358	21,7	130,10
7	Comandada	222	16,8	100,81
8	Comandante	990	57,7	346,09
9	Comandada	699	44,4	266,71

Fonte: autor.

Como pode-se observar nas tabelas citadas, o consumo tende a ser maior quanto maior o ponto de tração e a aplicação do freio dinâmico. Isso se deve ao nível de uso de equipamentos auxiliares exigidos em cada operação. Na Tabela 9, pode-se observar os valores de energia consumida no circuito auxiliar, seu consumo equivalente em litros (já corrigido pelas eficiências utilizadas em (17) e (18)) e economia potencial.

A partir desses valores, pode-se estimar formas de suprir o consumo de tais circuitos. A partir disso, avalia-se a geração e consumo de energia ao longo das

viagens, o que pode ser feito considerando um valor pré-definido como capacidade total do banco de baterias utilizado, e simulando seu ciclo de carga e descarga ao longo do trajeto.

Outra variável a ser considerada é o estado inicial do banco de baterias, uma vez que pode estar carregado total ou parcialmente no início da viagem. Este ponto é mais difícil de prever, a não ser caso se aponte uma recarga obrigatória do banco antes da viagem, o que pode ser feito por um ponto de recarga nos pátios ou a partir do próprio sistema de geração de energia, quando o veículo estiver com geração de energia sem utilizá-la por completo. Em ambos os casos, são sistemas que dependem de estudos particulares e aprofundados (como a necessidade de tomadas de tensão maiores, para o caso de pontos de recarga fixos, ou de sistemas de controle de energia extras nas locomotivas) e não entram no escopo deste trabalho.

No caso do circuito auxiliar, se busca que o banco seja capaz de suprir o sistema como um todo ao longo da viagem. Isto é, o banco de baterias não pode, em momento algum da viagem, chegar a ficar totalmente descarregado. Obviamente, tanto pela construção atual das locomotivas como por redundância para bom funcionamento do sistema de produção de ar comprimido para os cilindros de freio, o veículo deve continuar contendo o gerador auxiliar, avaliando-se esta característica somente para observar o comportamento do sistema e sua viabilidade para esta rota.

Tabela 10: Energia dissipada nos resistores vs. energia consumida no circuito auxiliar

Ref.	E_{FD} [kWh]	E_{CA} [kWh]
1	26.371	2.793
2	19.049	1.858
3	24.491	2.765
4	1.272	661
5	6.900	833
6	1.667	358
7	146	222
8	8.049	990
9	5.947	699

Fonte: autor.

Ao se comparar diretamente os valores de energia dissipada e energia no circuito auxiliar, observa-se que a única referência que não seria autossuficiente na geração de energia para o circuito auxiliar seria na referência 7, que se refere à locomotiva comandada no trecho ZPT-ZAR. Para esse caso, em análise completa da rota, é possível que haja energia proveniente de trechos anteriores (da referência 2, nesse caso) com capacidade para suprir o consumo, o qual será analisado adiante.

Para melhor organização da análise, acrescenta-se três cenários: referências 1-5-8 e 1-6-8, relativos às locomotivas comandantes, e referências 2-7-9, relativos às locomotivas comandadas. As referências 3 e 4 são adicionadas isoladamente nessa comparação, já que no caso da referência 3 (remota) não se obteve dados de locomotivas remotas no trecho importação, e no caso da referência 4 (helper) sua utilização ocorre em condições específicas de carga total elevada, não sendo utilizada no trecho importação para retorno de vagões vazios.

Tabela 11: Energia dissipada nos resistores vs. energia consumida para cada posição

Referência	E_{FD} [kWh]	E_{CA} [kWh]
1-5-8	41.320	4.616
1-6-8	36.087,79	4.141
2-7-9	25.142	2.779
3	24.491	2.765
4	1.272	661

Fonte: autor.

Na Tabela 11, apresentam-se os mesmos dados da Tabela 10, mas agrupados para cada rota completa que os veículos percorreram. Nota-se que, nesse caso, os valores consumidos no circuito auxiliar para a viagem completa são totalmente superados. Assim, a referência 7, onde não houve regeneração suficiente no caso anterior, seria suprimido por acúmulo de energia em trechos anteriores, a depender do tamanho do banco de baterias.

Para definir o estado instantâneo de energia acumulada, utiliza-se a seguinte correlação (Rumo, 2023, adaptado pelo autor):

$$Eb_i = Eb_{i-1} + (E_{FD_i} \eta_b \eta_c) - (E_{CA_i} / \eta_c) [kWh] \quad (20)$$

Onde E_{b_i} é a energia útil total no banco de baterias no instante i , que varia entre 0 e o tamanho máximo do sistema de armazenamento de energia, $E_{b_{i-1}}$ é a energia total no banco de baterias no instante imediatamente anterior, E_{FD_i} é a energia gerada pelo freio dinâmico no instante i , e E_{CA_i} é a energia consumida pelo circuito auxiliar naquele instante i . η_b se refere à eficiência elétrica da bateria, que como não há definição prévia do modelo de bateria, será considerada como 93,5% (Omar *et al.*, 2012).

Além disso, η_c se refere à eficiência do circuito de conversão entre a saída de energia do banco de baterias e a energia requisitada pelo circuito auxiliar. O circuito de conversão não é englobado neste trabalho devido à sua complexidade. Vale destacar que essa eficiência pode variar, dependendo do nível de energia que está sendo trabalhado no momento. Para circuitos modernos, principalmente de baixa potência, estes valores podem atingir até 97%, mas neste trabalho se considera o valor médio de 92%, apresentado nos estudos de Wai *et al.* (2014).

Tabela 12: Resultado da aplicação da equação (20 nas referências

Ref.	E_{CAa} [kWh]	$E_{bi, max}$ [kWh]	$E_{Bi, final}$ [kWh]
1	6,32	21.634	21.628
2	34,6	15.836	15.832
3	33,1	21.762	21.758
4	26,5	1.027	638
5	107	5.277	5.277
6	73,7	1.266	1256
7	95,5	143	6,03
8	36,5	6.496	6.492
9	35,61	4844	4842
1-5-8	6,32	33.233	33.230
1-6-8	6,32	29.251	29.248
2-7-9	34,6	20.529	20.528

Fonte: autor.

Na Tabela 12 se apresenta os resultados para utilização ao longo da aplicação para um banco de baterias infinito. O termo E_{CAa} indica o consumo antes da regeneração, apresentando o valor consumido pelo circuito auxiliar do início da movimentação até o instante imediatamente anterior à aplicação do freio dinâmico pela primeira vez. Esse valor representa a defasagem entre um banco inicial vazio e

o valor que deveria conter para suprir o consumo de energia antes da regeneração. Vale destacar que esse consumo é superior ao consumo efetivo do circuito auxiliar apresentado na Tabela 10, já que engloba η_c em seu cálculo, referente ao sistema de conversão na saída do circuito e apresenta a soma da energia consumida no circuito auxiliar com a energia dissipada na conversão após sair da bateria.

Observa-se a proximidade dos valores finais ($E_{Bi, \max}$ indicando a energia máxima no banco de baterias, E_{Bfinal} indicando a quantia de energia no banco de baterias ao final da movimentação) com a diferença entre os valores dissipados nos resistores apresentado na Tabela 7, e do consumo no circuito auxiliar, apresentado na Tabela 9. Este resultado é esperado, uma vez que aqui se considera um banco de baterias infinito, sem dissipação de energia no banco de resistores. A diferença entre os valores se dá pelo fato de ter se considerado as baterias vazias no início da viagem.

A avaliação pode incluir otimização de valores, isto é, encontrar os mínimos necessários para que o banco de baterias real consiga alimentar o circuito auxiliar ao longo de todo o percurso. Nesse caso, deixa-se de ter um banco ideal, e se trabalha com um banco mais realista, com limitações de carga e descarga mínimos e máximos.

Tabela 13: Resultados de regeneração para cada veículo

Ref.	E_0 [kWh]	$E_{b, \min}$ [kWh]	E_R [kWh]	Potencial regenerado (%)
1	7,35	149	3.170	12,03
2	40,21	86,3	2.061	10,82
3	38,46	179	3.142	11,84
4	30,79	424	688	54,06
5	124,97	132	913	13,23
6	85,71	144	437	26,22
7	110,97	137	130	89,37
8	42,40	51,9	1.082	13,44
9	41,39	46,0	762	12,82
1-5-8	7,35	149	5.156	12,48
1-6-8	7,35	149	4.639	12,86
2-7-9	40,21	173	3.151	12,53

Fonte: autor.

Na Tabela 13, a carga inicial mínima (E_0) é uma correlação entre o valor de consumo projetado até o início de aplicação do freio dinâmico, a partir de onde

ocorreria regeneração. Na prática, o que se faz é comparar a energia consumida pelo circuito auxiliar até o instante i e a energia regenerada até esse mesmo instante i , e se encontra um valor mínimo de diferença entre esses valores, o que permite uma adição inicial de carga que impede que o banco seja descarregado.

$$E_0 = \frac{E_{CAmin}}{\eta_b \eta_c} [kWh] \quad (21)$$

O termo E_R indica o total regenerado computa toda a energia utilizada no circuito auxiliar, uma vez que, para este caso, ela é oriunda da energia regenerada pelo freio dinâmico. O potencial regenerado é uma relação entre o total regenerado com o total de energia dissipado no freio dinâmico apresentado na Tabela 7, e apresenta média global de 27,09% entre as referências de 1a 9, e de 14,34% desconsiderando as referências 4 e 7, que destoaram das demais. A capacidade mínima necessária é a quantidade mínima de capacidade de energia efetiva que o banco de baterias precisa ter para não ficar vazio em nenhum instante ao longo da movimentação, resultado da avaliação do estado da bateria para cada instante i . Para a capacidade bruta do banco, deve se considerar os fatores apresentados em 2.7.1. Baterias, o que será feito posteriormente.

Observando os dados da Tabela 13, o primeiro ponto que se destaca é a igualdade para carga inicial mínima e capacidade mínima necessária entre as referências 1-5-8 e 1-6-8. Tal fato não surpreende, uma vez que dois dos três trechos analisados em cada são referentes ao mesmo veículo, como aponta a Tabela 1, e mostra que o ponto crítico de consumo se apresenta em uma dessas referências. Apesar da diferença de valores, nota-se total regenerado e potencial regenerado relativamente semelhantes, com exceção das referências 4, 6 e 7 (com as duas últimas fazendo parte do mesmo trecho).

Um ponto importante a se destacar é que não há local cativo para as locomotivas, com cada uma podendo ocupar uma posição diferente no trem, a depender da organização na montagem da composição. Assim sendo, em caso de aplicação do modelo, um ponto de atenção é a locomotiva Helper (referência 4), que sai de ZAR, terminal final do percurso analisado para a referência 7. Não se espera que haja a retirada de uma locomotiva comandada neste ponto, mas vale a atenção ao avaliar a aplicação do sistema.

4.3.2. Modo de Consumo Via Motor de Tração

Neste tópico, se faz as mesmas correlações do tópico anterior, mas considerando o consumo da energia regenerada pelo freio dinâmico exclusivamente pelo motor de tração. Este sistema tem potências mais altas e, conseqüentemente, consome mais energia que o circuito auxiliar, o que o torna mais restritivo quanto ter sua necessidade energética a partir de energia regenerada.

Considerando que os motores de tração consomem muito mais energia do que o circuito auxiliar, conforme apresentado na Tabela 5, a relação é feita comparando a quantidade de energia dissipada pelo freio dinâmico que poderia ser reaproveitada no ciclo de tração. Diante desse cenário, a consideração de limitação de distribuição para os motores de tração torna-se irrelevante em aplicações prolongadas, uma vez que, em média, o sistema de tração requer 31,8 vezes mais potência que o circuito auxiliar, quando em tração, como pode ser visto na Tabela 2.

Tabela 14: comparação entre energia dissipada e energia do esforço trator

Ref.	E_{FD} [kWh]	E_{MT} [kWh]	Relação DB/Tração
1	26.371	54.160	48,69%
2	19.049	36.491	52,20%
3	24.491	63.214	38,74%
4	1.273	17.540	7,26%
5	6.900	15.397	44,81%
6	1.668	6.071	27,47%
7	145,95	3.120	4,68%
8	8.049	18.178	44,28%
9	5.947	10.764	55,25%
1-5-8	41.320	87.735	47,10%
1-6-8	36.088	78.408	46,03%
2-7-9	25.142	50.375	49,91%

Fonte: autor.

Como se pode observar, a energia do esforço trator (E_{MT}) ainda é superior à energia dissipada pelo freio dinâmico. Essa relação é um exemplo, já que a economia real depende de todas as perdas citadas anteriormente, além da capacidade do banco de baterias. Além disso, há uma redução drástica da relação entre a energia do freio dinâmico e o consumo do esforço trator em alguns casos,

como a referência 4 e 7. Essa defasagem pode ser solucionada com a possibilidade de desativação da alimentação pelo banco de baterias em estado de baixa energia, o que poderia ser feito por um sistema de controle, por exemplo.

Na avaliação do consumo exclusivo pelo motor de tração, o sistema de armazenamento sempre estará em um estado exclusivo: ou carregando, quando o veículo estiver em frenagem dinâmica, ou descarregando, quando o veículo estiver tracionando, ou em *stand-by*, quando o veículo estiver em *idle*. Assim sendo, pode-se partir de uma análise primária para dimensionamento do banco de baterias para utilização no motor de tração a partir da variação entre o tamanho do banco e a quantidade de energia disponível para distribuição entre os motores de tração.

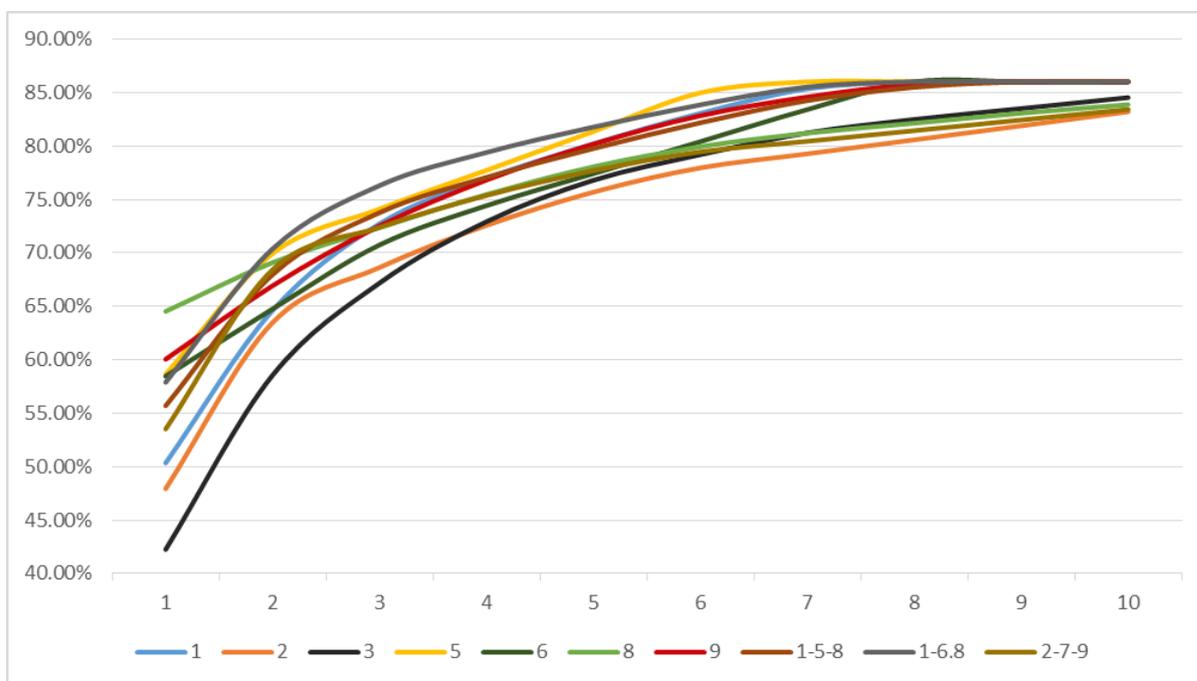
A avaliação foi feita com a avaliação do potencial efetivamente regenerado em cada instante, de maneira semelhante à equação (20), com a substituição do circuito auxiliar pelo motor de tração. As referências foram avaliadas com variações entre 150 e 2500 kWh de capacidade para os bancos de baterias, com exceção da referência 7, com baixa regeneração para essa avaliação, e da referência 4, as quais convergem para o potencial máximo em valores mais baixos (próximos de 500 kWh). Como o potencial de regeneração varia, buscou-se obter 10 pontos com o mesmo espaçamento entre si, respeitando as particularidades de cada referência.

$$Eb_i = Eb_{i-1} + (E_{FD_i} \eta_b \eta_c) - (E_{MT_i} / \eta_c) [kWh] \quad (22)$$

Apesar da variação de tamanho entre os bancos de baterias, pode-se comparar com o percentual regenerado de cada referência. A regeneração máxima, neste caso, será 86.02%, valor correspondente à multiplicação entre a eficiência de conversão e a eficiência de armazenamento da bateria.

Ao avaliar a progressão percentual das referências, observa-se a forma logarítmica de convergência, em maior ou menor grau, conforme aumenta-se a capacidade. Esse gráfico mostra uma tendência de haver uma faixa onde aumentar o tamanho do banco efetivamente implica em maior economia, e uma faixa de atenuação, até um tamanho de banco que absorva toda a energia disponibilizada pelo sistema de regeneração. A convergência de todas é para o valor de 86.02%, máximo teórico de utilização da energia do freio dinâmico, de acordo com as eficiências calculadas.

Figura 37: progressão do total percentual regenerado via motor de tração para as referências



Fonte: autor.

Os valores de 1 a 10 do eixo das abscissas para as referências da Figura 37 podem ser vistos na Tabela 15.

Tabela 15: Valores do eixo das abscissas para a Figura 37, em kWh

Ref.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	250	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2250	2500
2	250	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2250	2500
3	250	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2250	2500
5	250	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2250	2500
6	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600
8	125	150	175	200	225	250	275	300	325	350
9	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600
1-5-8	250	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2250	2500
1-6-8	250	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2250	2500
2-7-9	250	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2250	2500

Fonte: autor.

Para obtenção dos valores da Figura 37 (também válido para a Figura 38), simulou-se banco de baterias em cenário ideal para os valores da Tabela 15, obteve-

se a porcentagem de energia do freio dinâmico absorvida pelo banco de baterias em modo ideal e, com base nesses pontos, traçou-se linhas de tendência para cada referência. As linhas de tendência para a Figura 37 podem ser observadas na Tabela 16.

Também vale o destaque de que há uma eficiência de conversão entre a saída de energia da bateria e a utilização ou na tração ou na alimentação do circuito auxiliar. Entretanto, o efeito dessa eficiência é refletido em maior saída de energia do banco de baterias quando esta estiver sendo descarregada, e não aparece refletida na Figura 37, uma vez que esta reflete a energia líquida disponível nos bancos de bateria, ou seja, toda a energia que saiu, considerando a margem de utilização definida anteriormente.

As referências 5 e 6, as quais representam as locomotivas comandantes do trecho importação, apresentam comportamento levemente diferente das demais. Pode-se observar três comportamentos, com crescimento rápido em um primeiro momento, crescimento suave em trecho intermediário e estabilização no final. No caso da referência 5, para manter-se a coerência de 10 pontos e aumento gradual de tamanho estimado do banco, utilizou-se valores que fazem a curva convergir mais rápido, com o primeiro ponto em níveis também mais altos.

Tabela 16: Linha de tendência e R^2 da regeneração para as referências

Ref.	$E_{FD, \text{máx}}$ (kWh)	Linha de tendência	R^2
1	22.684	$-0,0029x^2 + 11,5x + 11.430$	0,975
2	15.852	$-0,0016x^2 + 6,941x + 8.324,6$	0,951
3	20.704	$-0,0028x^2 + 11,723x + 8.561,4$	0,971
5	5.935	$-0,0006x^2 + 2,2841x + 3.656,6$	0,983
6	1.434	$-0,0024x^2 + 2,8313x + 609,3$	0,997
8	6.752	$-0,0301x^2 + 20,945x + 3.077,2$	0,998
9	5.115	$-0,0101x^2 + 10,906x + 2.192$	0,999
1-5-8	35.543	$-0,0033x^2 + 13,913x + 20.949$	0,972
1-6-8	31.043	$-0,0031x^2 + 12,406x + 19.119$	0,963
2-7-9	20.978	$-0,0019x^2 + 7,9213x + 12.723$	0,927

Fonte: autor.

O termo $E_{FD, \text{máx}}$ da Tabela 16 é a energia máxima recuperada e representa o valor que entrou no banco de baterias durante a movimentação, no modo onde se recupera toda a energia, com a ponderação da eficiência de carregamento da

bateria e do sistema de conversão de energia. As equações de linha de tendência e R^2 apontadas são referentes às curvas de comparação do tamanho do banco versus energia recuperada, as quais apresentam as mesmas formas das curvas da Figura 37, ponderadas pela capacidade bruta do banco de baterias nas quais foram avaliadas.

4.3.3. Modo de Consumo Combinado

Considera-se o consumo combinado como o consumo dos dois casos anteriores, isto é, suprimindo tanto o circuito auxiliar quanto o motor de tração. De maneira semelhante à 4.3.1. Modo de Consumo Via Circuito Auxiliar, buscou-se encontrar níveis de energia suficientes para suprir o consumo do circuito auxiliar ao longo do trecho, com o restante da energia recuperada sendo aplicada no circuito de tração.

Para o funcionamento do sistema nessas condições, torna-se necessário criar uma chave de corte da alimentação do circuito de tração via banco de baterias quando determinado nível de energia for atingido, assim garantido que o circuito auxiliar não fique sem fornecimento em nenhum ponto ao longo do percurso. Também haverá um valor mínimo de carga inicial para o funcionamento do circuito até o início da regeneração, valor este sendo o mesmo apresentado na Tabela 13.

Tabela 17: comparação entre energia dissipada e energia do esforço trator

Ref.	E_{FD} [kWh]	$E_{MT} + E_{CA}$ [kWh]	Relação DB/Tração
1	26.371	56.953	46,30%
2	19.050	38.349	49,67%
3	24.491	65.979	37,12%
4	1.273	18.201	6,99%
5	6.900	16.230	42,51%
6	1.668	6.428	25,94%
7	146	3.342	4,37%
8	8.050	19.168	41,99%
9	5.947	11.463	51,88%
1-5-8	41.320	92.351	44,74%
1-6-8	36.0878	82.549	43,72%
2-7-9	25.142	53.153	47,30%

Fonte: autor.

Como pode-se observar, o valor necessário pelo consumo no modo combinado frente ao valor dissipado no freio dinâmico é semelhante ao caso exclusivo no motor de tração, uma vez que esse modo representa a maior parte do consumo de energia do sistema. Novamente, os casos 4 e 7 são os com menor potencial de regeneração.

A modelagem do sistema ocorreu de maneira semelhante ao tópico anterior, com a análise ocorrendo na mesma variação. A equação que rege o estado instantâneo da bateria é levemente diferente, com a adição do termo relativo ao consumo por parte do circuito auxiliar:

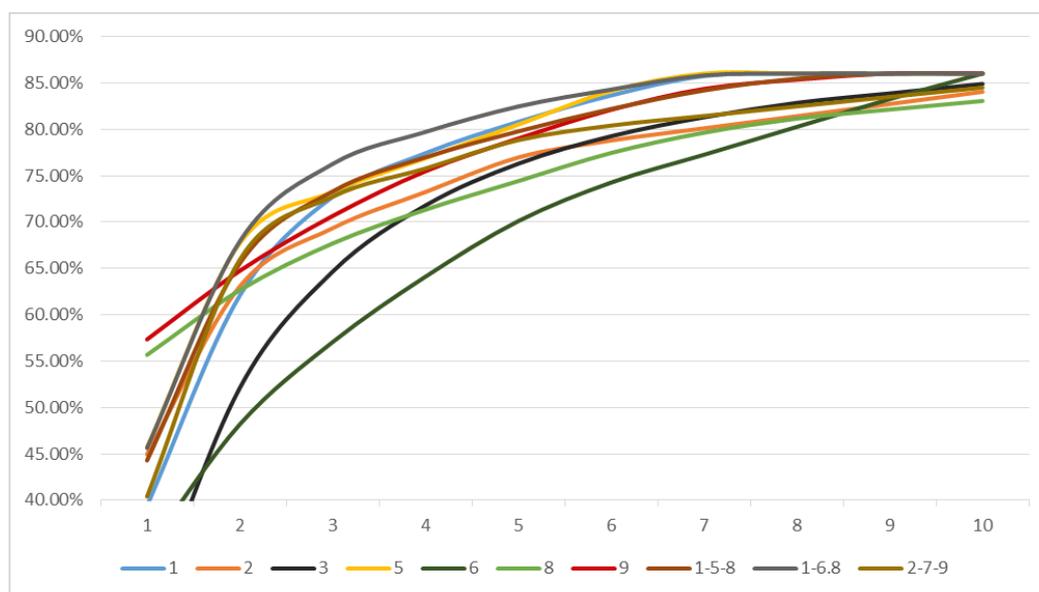
$$Eb_i = Eb_{i-1} + (E_{FD_i} \eta_b \eta_c) - (E_{MT_i} / \eta_c) - (E_{CA_i} / \eta_c) [kWh] \quad (23)$$

Novamente, aplica-se a equação para as mesmas referências (todas as citadas na Tabela 13, menos as referências 4 e 7), onde se obtém as curvas correspondentes.

De maneira semelhante ao caso anterior, as referências tendem a convergir para o valor máximo teórico de 86,02%. Entretanto, a convergência ocorre de maneira mais lenta para o consumo combinado. Isso se deve principalmente ao fato de haver um valor de corte do circuito de tração devido ao requisito avaliado do sistema alimentar o circuito auxiliar ao longo do percurso, o que resulta em haver alimentação do motor de tração somente até esse valor de corte, e não até zero. Isso também resulta na bateria tender a partir de uma certa carga em vez de partir do banco zerado, recarregando mais rapidamente.

A construção do gráfico da Figura 38 foram traçadas de maneira semelhante ao caso anterior, e suas linhas de tendência podem ser vistas na Tabela 18. Os valores de 1 a 10 do eixo das abscissas para as referências da Figura 38 são os mesmos do caso anterior e podem ser vistos na Tabela 15.

Figura 38: progressão do total percentual regenerado no modo combinado para as referências



Fonte: autor.

Essa característica proporciona algumas curvas consideravelmente fora do padrão das demais, como a referência 3 e 6, por exemplo. Além disso, para bancos com baixa capacidade de armazenamento, o consumo no circuito de tração é bem limitado, necessitando de valores maiores para que o sistema assegure a alimentação do circuito auxiliar.

Em contrapartida, o consumo e convergência em algumas referências, especialmente às do trecho exportação, mostram-se mais rápidas que as do primeiro caso. Este fato deve-se ao consumo mais rápido em modo combinado, aliado à alternância entre aplicações de tração e frenagem dinâmica, que recupera mais energia neste caso devido à maior carga das composições.

A energia máxima recuperada ($E_{R, \text{máximo}}$) neste modo tende a ser próxima à energia apresentada na Tabela 16, com algumas diferenças em relação à progressão.

Tabela 18: Linha de tendência e R^2 da regeneração no modo combinado para as referências.

Ref.	$E_{R, \text{máximo}}$ (kWh)	Linha de tendência (kWh)	R^2
1	22.684	$-0,0041x^2 + 15,668x + 8.397,1$	0,943
2	16.011	$-0,0019x^2 + 7,9903x + 7.686,9$	0,94
3	20.794	$-0,0042x^2 + 16,701x + 4.419,6$	0,954
5	5.935	$-0,0009x^2 + 3,3793x + 2.783$	0,933
6	1.434	$-0,0038x^2 + 4.6395x + 6.4804$	0,992
8	6.686	$-0,0426x^2 + 29.572x + 1.518,19$	0,997
9	5.115	$-0,0107x^2 + 11,68x + 1.926,1$	0,999
1-5-8	35.543	$-0,0051x^2 + 20,184x + 16.182$	0,972
1-6-8	31.043	$-0,005x^2 + 18,613x + 14.572$	0,963
2-7-9	21.245	$-0,0033x^2 + 12,61x + 9.322,8$	0,879

Fonte: autor.

De maneira semelhante ao caso anterior, a Tabela 18 apresenta os valores de R^2 e as linhas de tendência para cada referência, incluindo os modos das viagens completas. Além disso, também se registrou valores de reserva mínima de energia antes do corte de alimentação do sistema de tração.

Tabela 19: tamanho dos bancos avaliados e reserva necessária.

Ref.	Tamanho mínimo (kWh)	Reserva necessária (kWh)	Tamanho máximo (kWh)	Reserva necessária (kWh)
1	250	145	2000	120
2	250	84	2500	84,4
3	250	180	2500	1623
5	250	126	1750	127
6	150	125	600	123
8	125	53,4	350	51,9
9	150	46,7	600	45,1
1-5-8	250	145	2250	132
1-6-8	250	145	2000	120
2-7-9	250	159	2500	84,4

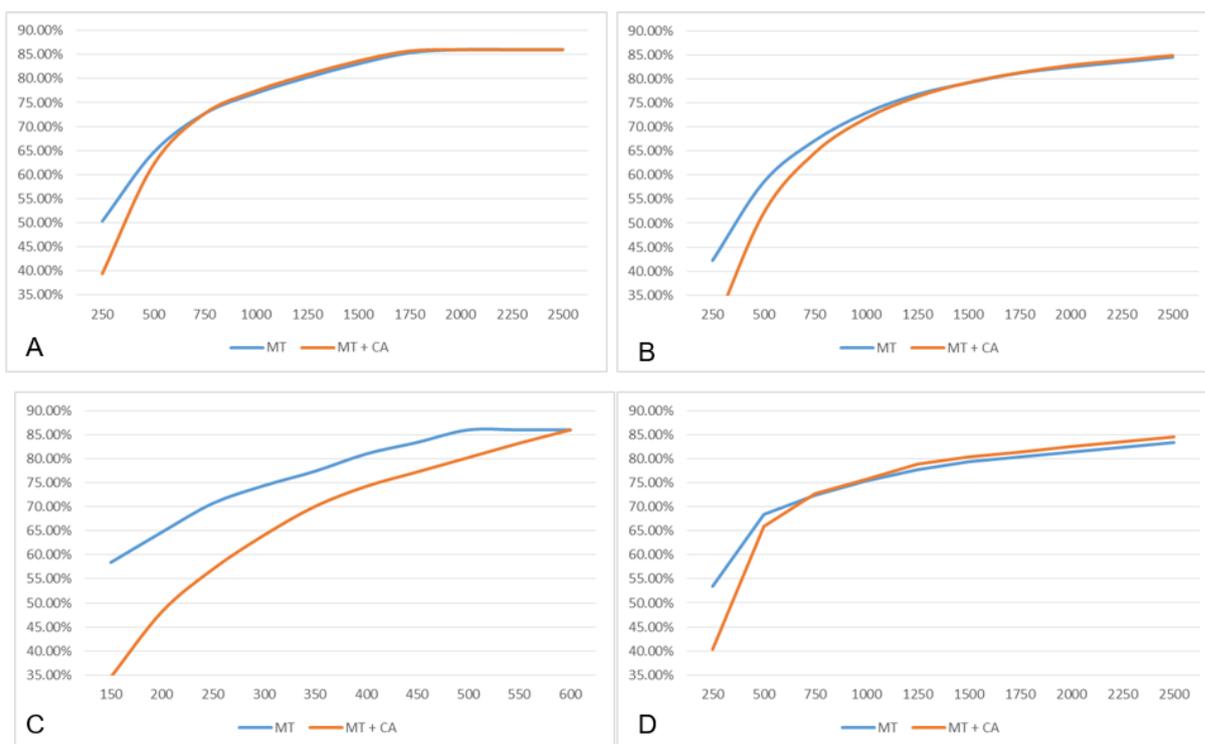
Fonte: autor.

Os tamanhos mínimo e máximo na Tabela 19 se referem aos valores avaliados, citados anteriormente, com o respectivo valor necessário na reserva para cada caso. No caso do valor máximo, este representa o último ponto avaliado ou o ponto onde atingiu o potencial máximo de 86,02%. Os valores da referência 7 foram

suprimidos pelo mesmo motivo anterior, e no caso da referência 4, os valores mínimos para suprimento da alimentação são próximos dos valores máximos avaliados

A diferença entre o uso exclusivo em tração e combinado, com restrição para suprir o circuito auxiliar fica mais clara com comparação entre as referências. Ao avaliar a porcentagem recuperada ao longo do tamanho dos bancos, observa-se melhor o comportamento de recuperação levemente superior do circuito combinado para bancos maiores.

Figura 39: Comparação de comportamento de recarga entre as referências 1 (A), 3 (B), 6 (C) e 2-7-9 (D)



Fonte: autor.

O comportamento observado através das referências demonstra, visualmente, que o ponto onde o uso combinado passa a superar a recuperação do uso exclusivo do motor de tração é em torno de 75% de recuperação de energia. Também evidencia o comportamento diferente ocorrido no trecho ZPT-ZAR, no qual houve menor uso do freio dinâmico e menor carga utilizada.

4.4. AVALIAÇÃO DE BATERIAS E POTENCIAL ECONÔMICO

Para seleção de baterias para armazenamento da energia a ser recuperada, há certos fatores que precisam ser considerados, como a capacidade de armazenamento, o custo, suas dimensões e capacidade de fluxo de energia. Para isso, coloca-se alguns requisitos para um modelo ser considerado como opção:

- **Potência:** o banco de baterias deve, preferencialmente, absorver picos de entrada de 4.334 kW e pico de saída de 3.150 kW, ou os valores mais próximos destes possíveis;
- **Custo:** é necessário que o sistema gere economia de, no mínimo, o seu próprio valor ao longo do ciclo de vida;
- **Dimensões:** o sistema não terá espaço infinito no veículo, é necessária avaliação das dimensões finais do banco;
- **Armazenamento:** Deve suprir os sistemas, conforme avaliado anteriormente.

Como visto anteriormente, as principais tecnologias atuais de baterias comercialmente disponíveis são as lítio-íon, e considerou-se na busca três tecnologias principais: LTO (titanato de lítio), NMC (níquel-manganês-cobalto) e LiFePO₄ (lítio-ferro-fosfato). Os modelos apresentam diferenças de características de operação, como capacidade de armazenamento e taxa de descarga de energia, por exemplo. Os custos consideraram a cotação do dólar comercial em 01/05/2024, equivalente a R\$ 5,19.

Tabela 20: Dados das baterias utilizadas no estudo

ID	Tipo	Tensão Nominal (V)	Capacidade (kWh)	Custo (BRL)	Ciclos	Dimensão (mm)	Peso (kg)
1	LTO	2,4	0,048	190,30	15000	116x22x106	0,515
2	NMC	3,7	0,8658	588,20	3500	208x174x72	3,47
3	LiFePO ₄	3,2	0,896	404,82	6000	207x175x71,7	5,5

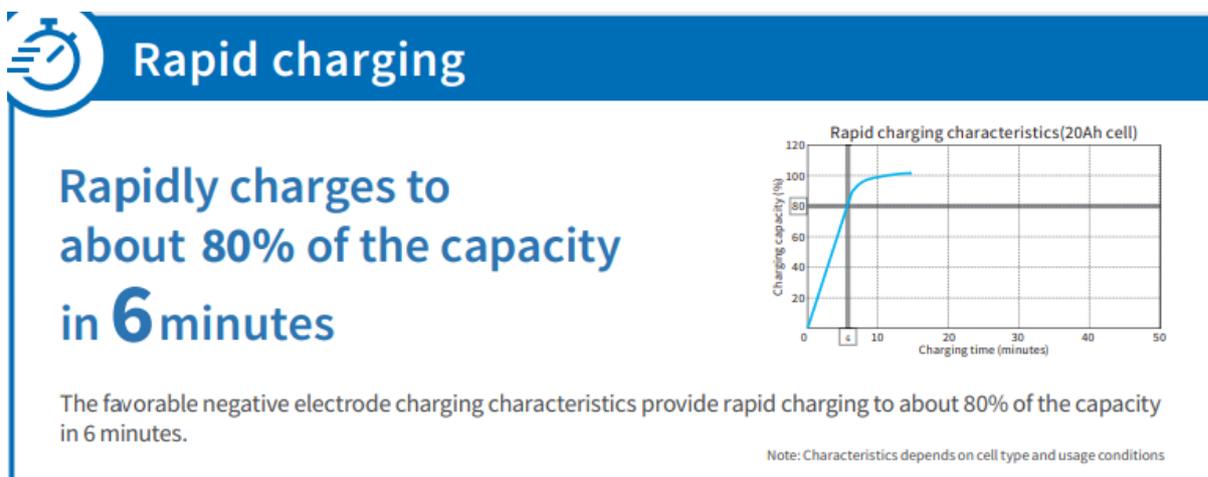
Fonte: autor.

Vale ressaltar que estes valores são exemplos utilizados para valoração do potencial de economia financeira do sistema, e que o ideal é uma negociação

diretamente com um fabricante, onde pode-se obter custos menores em uma aquisição em larga escala para a instalação do sistema em diversas locomotivas.

Os valores de velocidade de carga e descarga, conhecido como Fator C ou C-Rate influenciam na capacidade de absorção de energia do banco de baterias. 1C representa que o sistema leva 1 hora para carregar/descarregar completamente, 2C representa que o sistema leva 30 minutos para carregar/descarregar completamente, e assim por diante. Para as referências, os valores considerados por módulo são de 4C para LTO (Figura 40) (Battery Finds, 2024c, Toshiba, 2024), 1C de carga e para NMC (Figura 41) (Battery Finds, 2024b) e 1,2C para LiFePO4 (Figura 42) (Battery Finds, 2024a).

Figura 40: informação da taxa de carga da bateria LTO



Fonte: Toshiba (2024).

Figura 41: informação da taxa de carga da bateria NMC

电芯温度/℃	0	2	5	7	10	12	15	20	25	45	48	55	60	
最大充电电流 (C)	0%~<80% SOC	0	0.116	0.116	0.372	0.372	0.5	0.5	1.0	1.0	1.0	0.8	0.279	0
	≥80%~100% SOC	0	0.116	0.116	0.372	0.372	0.5	0.5	0.75	0.8	0.8	0.8	0.279	0

Fonte: Battery Finds (2024a).

Para a Figura 41, em tradução livre, a linha 1 apresenta a temperatura de operação, a linha 2 apresenta o fator C para uma carga de 80% da capacidade, e a linha 3 apresenta o fator C para descarga de 80 a 10% da capacidade.

Figura 42: informação da taxa de carga da bateria LiFePO4

4.2.7.1 恒流充电模式 Constant current charge rate

电芯温度 Cell temperature /°C	0<T	0≤T<10	10≤T<15	15≤T<20	20≤T<25	25≤T<45	45≤T<50	50≤T<55	55≤T<60	T≥60	
最大充电倍率(C) Max charge rate (C)	0-100% SOC	0	0.15	0.3	0.4	1.0	1.2	1.0	0.4	0.25	0

Fonte: Battery Finds (2024b).

Para avaliar se os requisitos de fluxo podem ser cumpridos, basta associar este fator C ao tamanho do banco, ponderado pela capacidade de absorção instantânea. Este valor pode ser aumentado ao associar uma quantia maior de baterias. Os valores de capacidade são convertidos a partir do datasheet de cada bateria, e correspondem a 1 módulo.

O ciclo de vida utilizado será o equivalente, onde a ocorrência de carga e descarga equivalente à capacidade total de armazenamento da bateria é considerada como 1 ciclo (por exemplo, para a tecnologia LTO, uma quantia absorvida de 0,048 kWh por módulo é equivalente a 1 ciclo). Também se considera fator C fixo para o sistema. Como se pode observar na Figura 40, Figura 41 e Figura 42, esse valor varia pela temperatura de operação da bateria, que varia dependendo de refrigeradores, ventiladores, aquecimento em razão da própria perda de energia na bateria em forma de calor durante a carga ou descarga, ou até mesmo condições ambientais ao longo da movimentação.

Neste ponto, vale observar o equilíbrio necessário entre espaço físico disponível, quantia de energia regenerada e vida útil consumida da bateria. A longo prazo, o sistema tende a se pagar justamente pela vida útil, mas o custo do sistema também aumenta. Além disso, o valor do fator C é fixo (com tensão fixa) para fins didáticos. Em um cenário real, esse valor pode variar drasticamente em função da temperatura da bateria, que vai ter aquecimento tanto em carga quanto em descarga, em maior ou menor grau. Esse aquecimento pode acarretar em menor fluxo de energia tanto absorvida quanto disponibilizada, e até no desarme do circuito de carga e/ou descarga, em casos extremos.

Para estimar o tamanho dos bancos para os casos de consumo via motor de tração e circuito auxiliar, aplica-se a fórmula de Bhaskara nas linhas de tendência das referências correspondentes à viagem completa, para uma regeneração de 80%

do valor dissipado no freio dinâmico, e faz-se a média entre estas. No caso de consumo exclusivo do circuito auxiliar, utiliza-se um banco com 200 kWh de capacidade líquida, o que supre todas as referências, com exceção da locomotiva helper, que é avaliada separadamente, com um banco de 460 kWh.

Tabela 21: Tamanhos considerados para cada caso

Consumo	E _{bat, líquido} (kWh)	(E _{bat, bruto}) (kWh)
Motor de tração	1.150	1.437,5
Circuito Auxiliar	200	250
Combinado	1.192	1.490
Circuito Auxiliar (helper)	460	575

Fonte: autor.

O tamanho bruto (E_{bat, bruto}) é considerado como mínimo, uma vez que vai depender do valor equivalente em relação ao apresentado na Tabela 20. Para o custo, considera-se o tamanho bruto, já constando a faixa de 20% de energia desconsiderada anteriormente, quando se trabalhou com o tamanho líquido (E_{bat, líquido}). A partir disso, aplica-se os valores líquidos para as viagens completas, para a remota e helper, e se avalia cada estado para obter a energia equivalente.

A validação do fluxo de energia pode ser feita a partir da Tabela 21 com a seguinte equação:

$$e = \frac{C \left[\frac{1}{h}\right] E_{bat} [kWh]}{P [kw]} \quad (24)$$

Onde valores acima de 1 indicam absorção total do pico de energia, enquanto valores abaixo de 1 indicam a porcentagem do valor de pico que o sistema pode absorver. Como exemplo, para a tecnologia LTO via motor de tração:

$$e = \frac{C \left[\frac{1}{h}\right] E_{bat} [kWh]}{P [kw]} = \frac{(4)(1437,5)}{4334} = 1,326$$

Neste exemplo, o banco de baterias poderia, em teoria, absorver toda a energia de pico dissipada pelo freio dinâmico, desde que o banco não estivesse cheio. De fato, apenas a tecnologia LTO via motor de tração e modo combinado é capaz de absorver todo o fluxo de potência dissipada. Valores podem ser observados na Tabela 22.

Tabela 22: Porcentagem de absorção de pico de energia

Tipo	MT	CA	MT+CA	CA Helper
LTO	100%	34,03%	100%	53,07%
NMC	33,17%	8,51%	34,38%	13,27%
LiFePO4	39,80%	10,21%	41,25%	15,92%

Fonte: autor.

Como este valor está diretamente ligado ao tamanho do banco de baterias, nota-se a baixa absorção para o circuito auxiliar, devido a seu tamanho reduzido.

Também é possível avaliar a quantidade de células correspondentes para os bancos da Tabela 21. Estes valores são com base na capacidade de armazenamento de cada módulo, apresentadas na Tabela 20.

Tabela 23: Quantidade de células necessárias para cumprir o requisito energético

Tipo	MT	CA	MT+CA	CA Helper
LTO	31.250	5.435	32.392	12.500
NMC	1.661	289	1.721	665
LiFePO4	1.605	280	1.663	642

Fonte: autor.

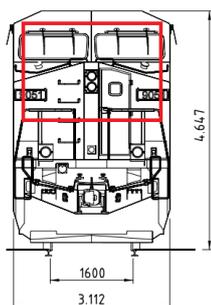
A partir disso, e dos dados dimensionais da Tabela 20, pode-se avaliar as dimensões e peso de cada banco de baterias considerados. Baseado em desenho aproximado da locomotiva (Figura 43), considera-se um espaço físico de 2,8x2m, com comprimento adicional a depender do tamanho avaliado de cada banco, o que é apresentado na Tabela 24. As dimensões correspondem somente ao sistema de armazenamento, desconsiderando demais sistemas necessários. É possível que essa dimensão cause alteração no comprimento total das locomotivas (21,142 m entre as testeiras).

Tabela 24: comprimento do banco, baseado na dimensão disponível

Tipo	MT	CA	MT+CA	CA Helper
LTO	1,584	0,264	1,628	0,616
NMC	0,792	0,144	0,792	0,288
LiFePO4	0,789	0,072	0,789	0,287

Fonte: autor.

Figura 43: Posição aproximada do banco de baterias na locomotiva



Fonte: Rumo (2023), adaptado pelo autor.

Outro valor que pode ser avaliado a partir da Tabela 23 é o peso equivalente do banco de baterias, dado apresentado individualmente na Tabela 20. Esse valor é apresentado considerando o peso de cada modelo apresentado, e considerando a quantidade de células necessárias em cada caso específico.

Tabela 25: Peso equivalente do banco de baterias (em kg)

Tipo	MT	CA	MT+CA	CA Helper
LTO	16.094	2.799	16.682	6.438
NMC	5.764	1.003	5.972	2.308
LiFePO4	8.828	1.540	9147	3.531

Fonte: autor.

Nos dados da Tabela 25, nota-se a variação de peso elevada no caso da LTO, onde chega a 16,7 toneladas, equivalente a 8,9% do peso da locomotiva. Esse peso adicional pode alterar características de tração e aplicação do motor de tração. Para simplificação da análise, desconsidera-se esse efeito.

Também pode-se obter o custo de aquisição (Tabela 26) para o banco de baterias apresentado na Tabela 23, baseado no custo por célula apresentado na Tabela 20.

Tabela 26: Custo de aquisição das baterias para cada caso, em reais

Tipo	MT	CA	MT+CA	CA Helper
LTO	5.946.875,00	1.034.280,50	6.164.197,60	2.378.750,00
NMC	977.000,20	169.989,80	1.012.292,20	391.153,00
LiFePO4	649.736,10	113.349,60	673.215,66	259.894,44

Fonte: autor.

Para melhor apresentação, aplica-se os valores do banco de bateria da Tabela 21 para a viagem completa como comandante, como comandada, na locomotiva remota (com o ponto de atenção que só há dados no trecho exportação para essa aplicação) e na locomotiva helper, e se avalia a recuperação de energia nas formas aplicadas em 4.3. Para a definição de economia de combustível, utilizou-se a eficiência média global do sistema, apresentado na Tabela 6 (31,36%) e considerou-se o valor que efetivamente chega no motor de tração (considerando a eficiência de conversão de 92%).

Tabela 27: Valores de economia via circuito auxiliar, para os bancos da Tabela 21

	Ref.	E_R (kWh)	V_{eq} [L]	Economia (R\$)	Suprimento aux.
LTO	1-5-8	5065	888	5.327	Sim
	2-7-9	3068	538	3.228	Sim
	3	3097	543	3.258	Sim
	4	605	106	637	Sim
NMC	1-5-8	4849	850	5.101	Sim
	2-7-9	3038	533	3.196	Não
	3	2498	438	2.627	Não
	4	205	36,0	216	Não
LiFePO4	1-5-8	4985	874	5.243	Sim
	2-7-9	3046	534	3.204	Não
	3	2692	472	2.833	Não
	4	243	42,6	256	Sim

Fonte: autor.

Na Tabela 27 observa-se os valores elevados regenerados (E_R) em combustível para esse sistema, somente via circuito auxiliar. Essa economia é correspondente a uma viagem completa para as referências 1-5-8 e 2-7-9, apenas o trecho exportação para a referência 3, e apenas o trecho ZAR-ZEV para a helper. O volume equivalente (V_{eq}) é calculado conforme a equação (18). A coluna 5 (Suprimento aux.) apresenta uma validação se o tamanho foi suficiente para cumprir

o requisito de alimentação completa do circuito auxiliar, isto é, se o sistema foi suprido ao longo de toda a viagem. Pode-se observar que nem sempre esse requisito foi cumprido, com exceção da referência 1-5-8, que apresenta a viagem completa para a locomotiva comandante.

Também observa-se a variação de energia recuperada devido à capacidade de absorção de cada tecnologia. Essa diferença também será percebida nas demais, e influencia a absorção de energia do sistema, especialmente em sistemas com tamanhos elevados.

Tabela 28: Dados relacionados à vida útil das baterias, consumo via circuito auxiliar

	Ref.	C/V	Viagens até a troca	Custo por viagem (R\$)	Economia total por viagem (R\$)
LTO	1-5-8	20,26	740	2.061,67	3.265,69
	2-7-9	12,27	1.222	1.248,47	1.979,13
	3	12,39	1.210	1.260,86	1.996,79
	4	2,42	6.195	383,98	252,71
NMC	1-5-8	19,40	180	1.392,07	3.708,81
	2-7-9	12,15	288	870,05	2.325,58
	3	9,99	350	715,92	1.911,31
	4	0,82	4.264	91,73	124,09
LiFePO4	1-5-8	19,94	300	555,95	4.687,53
	2-7-9	12,18	492	339,00	2.865,18
	3	10,77	557	299,44	2.533,11
	4	0,97	6.169	42,13	213,64

Fonte: autor.

Os ciclos por viagem (C/V), equação (25), se referem aos ciclos de vida das baterias, os quais são avaliados pelo método equivalente, onde uma carga equivalente ao tamanho do banco de baterias equivale a um ciclo. Com base nisso, avalia-se ciclos por viagem, viagens até uma eventual troca (com base nos valores da Tabela 20), o custo por viagem do banco de baterias (com base nos valores da Tabela 26) e a economia total por viagem, sendo esta a diferença entre o custo do diesel economizado para o modo de consumo e o custo do banco de baterias por viagem.

$$C/V = \frac{E_{FD}}{E_{bat,bruto}} \quad (25)$$

$$Viagens = \frac{C/V}{Ciclos} \quad (26)$$

Como exemplo para a tabela 27 (as tabelas correspondentes para o consumo via motor de tração e no modo combinado são calculadas da mesma maneira), considerando a referência 1-5-8 para a tecnologia LTO (15000 ciclos, Tabela 20) e o maior valor inteiro:

$$\frac{C}{V} = \frac{E_{FD}}{E_{bat,bruto}} = \frac{5064,52}{250} = 20,26 \text{ ciclos}$$

$$Viagens = \frac{Ciclos}{C/V} = \frac{15000}{20,26} = 740 \text{ Viagens}$$

A seguir, os mesmos resultados para o consumo via motor de tração são apresentados nas tabelas Tabela 29 e Tabela 30.

Tabela 29: Valores de economia via motor de tração, para os bancos da Tabela 21

	Ref.	E_R (kWh)	V_{eq} [L]	Economia (R\$)
LTO	1-5-8	27.599	4.839	29.031,87
	2-7-9	15.928	2.792	16.754,44
	3	16.630	2.915	17.492,85
NMC	1-5-8	16.016	2.808	16.846,69
	2-7-9	7.876	1.381	8.284,44
	3	12.266	2.150	12.901,07
LiFePO4	1-5-8	19.158	3.359	20.151,88
	2-7-9	10.413	1.825	10.953,21
	3	13.602	2.385	14.307,46

Fonte: autor.

Para a referência 1-5-8, nota-se os valores elevados de E_{FD} . Isso se deve em grande parte ao fator C elevado da tecnologia LTO em relação às demais, permitindo maior fluxo energético, especialmente na carga do sistema ao ter maior capacidade de absorção da energia do freio dinâmico. Como este trabalho considera um cenário ideal, com tensão e temperatura fixas, em uma situação real esse valor

deve ficar abaixo dos demais. Tal consideração também é válida para o modo combinado, como será visto posteriormente.

Tabela 30: Dados relacionados à vida útil das baterias, consumo via motor de tração

	Ref.	Ciclos por viagem	Viagens até a troca	Custo por viagem (R\$)	Economia total por viagem (R\$)
LTO	1-5-8	19,20	781	1.953,44	27.078,44
	2-7-9	11,08	1.353	1.127,59	15.626,85
	3	11,57	1.296	1.177,19	16.315,67
NMC	1-5-8	11,14	314	798,00	16.048,69
	2-7-9	5,48	638	392,75	7891,69
	3	8,53	410	611,15	12.289,92
LiFePO4	1-5-8	13,33	450	370,64	19.781,25
	2-7-9	7,24	828	201,43	10.751,78
	3	9,46	634	263,07	14.044,39

Fonte: autor.

Ao observar as viagens até a troca na Tabela 30, destaca-se valores elevados para a tecnologia LTO, mas não sendo na mesma proporção do caso anterior. As variações dependem muito das condições de regeneração de cada caso específico, além da capacidade de absorção de energia por parte dos três sistemas.

A seguir, os mesmos resultados para o consumo via motor de tração são apresentados nas tabelas Tabela 31 e Tabela 32.

Tabela 31: Valores de economia no modo combinado, para os bancos da Tabela 20

	Ref.	E_R (kWh)	V_{eq} [L]	Economia (R\$)	Suprimento aux.
LTO	1-5-8	28.433	4.985	29.908,35	Sim
	2-7-9	16.413	2.878	17.265,17	Sim
	3	14.879	2.609	15.651,16	Sim
NMC	1-5-8	19.411	3.403	20.418,68	Sim
	2-7-9	10.883	1.908	11.447,95	Sim
	3	11.920	2.090	12.538,19	Não
LiFePO4	1-5-8	22.130	3.880	23.278,18	Sim
	2-7-9	12.966	2.273	13.639,34	Sim
	3	13.252	2.323	13.939,25	Não

Fonte: autor.

Os valores novamente se apresentam mais elevados para a tecnologia LTO. Destaca-se o suprimento do circuito auxiliar para as referências 1-5-8 e 2-7-9 em ambas as tecnologias.

Tabela 32: Dados relacionados à vida útil das baterias, consumo combinado

	Ref.	Ciclos por viagem	Viagens até a troca	Custo por viagem (R\$)	Economia total por viagem (R\$)
LTO	1-5-8	19,08	786	1.941,01	27.967,34
	2-7-9	11,02	1.361	1.120,97	16.144,20
	3	9,99	1.502	1.015,74	14.635,42
NMC	1-5-8	13,03	268	934,97	19.483,70
	2-7-9	7,30	479	523,12	10.924,83
	3	8,00	437	573,39	11.964,79
LiFeP O4	1-5-8	14,85	403	413,86	22.864,32
	2-7-9	8,70	689	242,07	13.397,27
	3	8,89	674	247,46	13.691,79

Fonte: autor.

Ao se avaliar o valor regenerado, observam-se cifras mais altas para os ciclos incluindo o motor de tração, em comparação ao ciclo do circuito auxiliar, muito devido aos níveis elevados de energia recuperada e ao tamanho do banco de baterias. Entretanto, é possível observar semelhanças entre os ciclos por viagem, e em viagens por troca, quando comparando o mesmo tipo de bateria e a mesma utilização. Neste caso, pode-se fazer uma avaliação de consumo pela distância percorrida, ou temporalmente, e estabelecer pontos ao longo do tempo ou distância para verificação do estado de conservação do sistema de armazenamento.

Outro ponto interessante de se observar é que nos três casos observa-se valores economizados superiores no caso da tecnologia LTO, com valores um pouco abaixo para o caso da LiFePO4. O caso da LTO mantém as considerações de temperatura, uma vez que o fluxo de energia para obter tais valores será elevado. Além disso, como visto anteriormente, seu peso e volume consideravelmente superior ao das demais tecnologias pode ser um empecilho relevante para o caso de aplicação prática.

Quanto ao peso e volume ocupados, a tecnologia NMC demonstra ser mais promissora, sendo 34,7% mais leve que o banco de LiFePO4. A tecnologia LTO, para a bateria considerada, apresenta a vantagem de ter um ciclo de vida superior, considerado 15.000 ciclos como valor conservador para avaliar com 80% da

capacidade original, com o fabricante apontando até mais ciclos de utilização (na faixa dos 20.000 ciclos), mas com menores capacidades (Toshiba, 2024). Por outro lado, suas dimensões consideravelmente elevadas em volume demonstram a necessidade de adaptação da locomotiva para receber o sistema

Tabela 33: Dados utilizados para o cálculo das porcentagens

Referência	E_{FD} [MJ]	V_{FD} [L]	Custo [R\$]
1-5-8	92.351	28.485	170.907,36
2-7-9	53.153	17.087	102.521,34
3	65.978	19.214	115.284,96
4	18.201	5477	32.862,78

Fonte: autor.

Ao final, pode-se fazer um resumo comparativo entre os valores de consumo encontrados para as operações, custos e potenciais de economia em caso de aplicação do sistema nas locomotivas. Para correlação das porcentagens, resgata-se os valores apresentados novamente na Tabela 33. Os dados foram apresentados anteriormente na Tabela 8, mas neste caso foram agrupados para fins didáticos.

$$E_s = \frac{E_R}{E_{FD}} \quad (27)$$

$$Diesel_s = \frac{V_{eq}}{V_{FD}} \quad (28)$$

$$E_{financeira} = \frac{Economia}{Custo} \quad (29)$$

As equações (27), (28) e (29) são replicadas para as demais tabelas equivalentes para os demais modos de consumo. E_s indica economia de energia e $Diesel_s$ indica economia de combustível.

Tabela 34: Resumo de economia estimada via circuito auxiliar

	Ref.	E_s	Diesel_s	E_{financeira}
LTO	1-5-8	5,48%	3,12%	1,91%
	2-7-9	5,77%	3,15%	1,93%
	3	4,69%	2,83%	1,73%
	4	3,33%	1,94%	0,77%
NMC	1-5-8	5,25%	2,98%	2,17%
	2-7-9	5,72%	3,12%	2,27%
	3	3,79%	2,28%	1,66%
	4	1,13%	0,66%	0,38%
LiFePO4	1-5-8	5,40%	3,07%	2,74%
	2-7-9	5,73%	3,13%	2,79%
	3	4,08%	2,46%	2,20%
	4	1,34%	0,78%	0,65%

Fonte: autor.

Como exemplo de aplicação, para a Referência 1-5-8, tecnologia LTO:

$$E_s = \frac{E_R}{E_{FD}} = \frac{5.064,51}{92.350,69} = 5,48\%$$

$$Diesel_s = \frac{V_{eq}}{V_{FD}} = \frac{887,893}{28.484,56} = 3,12\%$$

$$E_{financeira} = \frac{Economia}{Custo} = \frac{3.265,38}{170.907,36} = 1,91\%$$

O termo E_s da Tabela 34 representa a relação entre energia economizada e a energia consumida ao longo do ciclo. De maneira semelhante, o termo Diesel_s correlaciona o combustível equivalente à energia economizada, em comparação com o consumo apresentado para o trecho, e o termo E_{financeira} apresenta a economia potencial, dentro do escopo apresentado ao longo do trabalho e já considerando a distribuição do custo de aquisição do banco de baterias ao longo da vida útil.

No caso via circuito auxiliar, nota-se valores mais baixos, como visto anteriormente. Como já observado, o circuito auxiliar de fato representa uma fração menor do consumo total do veículo. Desconsiderando a referência 4 (helper), apresenta-se potencial médio de 5,10% de economia de energia, 2,90% de economia de combustível e 2,16% de economia financeira.

Tabela 35: Resumo de economia estimada via motor de tração

	Ref.	E_s	Diesel_s	E_{financeira}
LTO	1-5-8	25,71%	16,99%	15,84%
	2-7-9	25,78%	16,34%	15,24%
	3	21,68%	15,17%	14,15%
NMC	1-5-8	14,92%	9,86%	9,39%
	2-7-9	12,75%	8,08%	7,70%
	3	15,99%	11,19%	10,66%
LiFePO4	1-5-8	17,84%	11,79%	11,57%
	2-7-9	16,85%	10,68%	10,49%
	3	17,73%	12,41%	12,18%

Fonte: autor.

No caso via motor de tração (Tabela 35) pode-se observar de forma mais explícita a porcentagem elevada de regeneração de energia para o caso da tecnologia LTO em relação às demais tecnologias avaliadas, conforme considerações anteriores. Neste caso, apresenta-se potencial médio de 18,81% de economia de energia, 12,50% de economia de combustível e 11,91% de economia financeira.

Tabela 36: Resumo de economia estimada via modo combinado

	Ref.	E_s	Diesel _s	$E_{financeira}$
LTO	1-5-8	26,48%	17,50%	16,36%
	2-7-9	26,56%	16,84%	15,75%
	3	19,40%	13,58%	12,69%
NMC	1-5-8	18,08%	11,95%	11,40%
	2-7-9	17,61%	11,17%	10,66%
	3	15,54%	10,88%	10,38%
LiFePO4	1-5-8	20,61%	13,62%	13,38%
	2-7-9	20,98%	13,30%	13,07%
	3	17,28%	12,09%	11,88%

Fonte: autor.

O caso combinado é apresentado na Tabela 36 e pode-se observar a tendência de apresentar maior consumo na avaliação da rota completa. Neste caso, apresenta-se potencial médio de 20,28% de economia de energia, 13,44% de economia de combustível e 12,84% de economia financeira.

Apesar dos testes avaliarem o suprimento do circuito auxiliar, esta não precisa ser uma condição presente neste modo, uma vez que continua havendo o gerador auxiliar no veículo. O efeito que o suprimento do circuito auxiliar proporciona é ter um estado de corte, onde abaixo de determinado nível da bateria, não haverá alimentação ao motor de tração.

Avaliando os três modos de consumo, os tamanhos de banco recomendados e as três tecnologias avaliadas, sugere-se a utilização da tecnologia LiFePO4, a qual contém um custo inicial menor, excelente potencial de economia e dimensional mais compacto. Apesar da longa durabilidade da tecnologia LTO e de seu excelente potencial econômico, seu elevado investimento inicial, economia menor em comparação às demais tecnologias e incertezas dos valores apresentados em relação à temperatura de operação podem ser um entrave para a obtenção destes resultados e também em caso de aplicação em larga escala.

Já a tecnologia NMC, apesar de ser mais leve que as demais, ter dimensões totais menores e apresentar bom desempenho para a regeneração, apresenta-se mais custosa que a LiFePO4, apresenta menor capacidade de absorção de energia e trabalha idealmente em uma faixa de temperatura mais restritiva que as demais, o que pode se apresentar como um problema na aplicação ferroviária. Em todo caso,

obteve-se grande quantidade de dados, e a percepção e avaliação de modos de aplicação podem ser subjetivos ao avaliador e ponderados por necessidades não abordadas neste trabalho.

Quanto à aplicação, recomenda-se a aplicação via motor de tração de maneira parcial, estando atento que isso requer um sistema de controle para distribuição da energia no circuito de tração em paralelo ao sistema de alimentação original da locomotiva. Apesar do sistema via circuito auxiliar ter apresentado capacidade de suprir a alimentação deste, a necessidade de atenção ao nível de carga das baterias, especialmente pelo fato de alimentar sistemas críticos como os compressores do freio pneumático é um ponto de atenção que pode ser difícil de implementar. Em caso dessa aplicação, recomenda-se manter o gerador auxiliar para potenciais emergências, que podem ocorrer tanto por um eventual descarregamento completo do banco de baterias, quanto por eventual superaquecimento do sistema.

5. CONCLUSÃO

A avaliação de reaproveitamento da energia gerada pelo freio dinâmico e dissipada no banco de resistores foi avaliada a partir de metodologia definida pela avaliação de diversos trabalhos que trataram do assunto anteriormente. A partir de dados do registrador de eventos de nove locomotivas que operaram em 2021 e 2022 entre Rondonópolis – MT e o porto de Santos – SP e de informações sobre as locomotivas, obteve-se as características de operação de tração e frenagem dinâmica do trecho, além de valores de energia dissipada, consumo de combustível e consumo de energia via motor de tração e circuito auxiliar.

A avaliação das locomotivas no trecho exportação apresentou utilização do freio dinâmico em 26% do tempo total da viagem, incluindo aplicações em neutro, que representaram 34% do total. Para a locomotiva helper, essa aplicação cai drasticamente, representando 3% do total, contra 53% do tempo em neutro. Já no trecho importação, observa-se utilização do freio dinâmico em 10% do tempo no trecho ZPT-ZAR e de 25% no trecho ZAR-TRO. A eficiência do ciclo de tração para todas as locomotivas variou entre 28,58% e 35%, com média de 31,36% e desvio padrão de 3,47%. Em ambos os sentidos, o freio dinâmico mostrou-se ser mais utilizado na faixa entre 21 e 30 km/h.

Avaliando as tecnologias, observou-se que a opção mais promissora disponível é a tecnologia LiFePO₄, que apresenta menor investimento inicial e maior valor economizado a longo prazo. Sugere-se como aplicação da alimentação no motor de tração, suprimindo parcialmente a demanda em paralelo à energia gerada no motor diesel. Vale ressaltar que é preciso avaliar sistemas de conversão e controle para aplicação do sistema de armazenamento.

O tamanho bruto do banco de baterias considerado ideal para alimentar o sistema é de 1.437,5 kWh via motor de tração, 250 kWh via circuito auxiliar, 1.490 kWh no modo combinado e 575 kWh para a locomotiva Helper. O sistema demonstrou potencial de economia de combustível de 2,90% via circuito auxiliar, 12,50% via motor de tração e 13,44% no modo combinado, e economia financeira de 2,16% via circuito auxiliar, 11,91% via motor de tração e 12,84% no modo combinado. Custos e requisitos relacionados ao sistema de conversão e controle de energia não foram considerados.

A partir dos dados deste trabalho, pode-se avaliar o circuito de conversão da energia reutilizada de maneira mais aprofundada, ficando como sugestão de trabalho futuro. Outra possibilidade de continuidade deste trabalho é avaliar o controle dos níveis de energia da bateria em suprimento ao circuito auxiliar de maneira mais aprofundada, avaliar a operação do motor de tração com energia via circuito auxiliar, diferenças na operação, caso alimente somente um dos motores e avaliar a operação do motor de tração em limites de baixa energia do banco de baterias. Também sugere-se avaliação mais restritiva deste mesmo sistema, avaliando a influência do aumento de temperatura devido à dissipação de energia das baterias e demais circuitos, variação de tensão ao longo da operação e bancos de baterias mistos, com um estágio intermediário paralelo com maior capacidade de absorção de energia e posterior distribuição dessa energia em banco com menor capacidade de absorção.

REFERÊNCIAS

AHMAD, H. A. **Dynamic Braking Control for Accurate Train Braking Distance Estimation under Different Operating Conditions**. 135 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Virginia Polytechnic Institute and State University, 2013.

AGÊNCIA ESTADUAL DE NOTÍCIAS – AEN. **Paraná será pioneiro no teste de locomotivas híbridas com menor impacto ambiental**. 03 out. 2023. Disponível em: <https://www.aen.pr.gov.br/Noticia/Parana-sera-pioneiro-no-teste-de-locomotivas-hibridas-com-menor-impacto-ambiental>. Acesso em 21/03/2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES - ANTT. **Declaração de Rede 2023 - RMN**. Disponível em: <https://www.gov.br/antt/pt-br/assuntos/ferrovias/declaracao-de-rede/declaracao-de-rede-2022/declaracao-de-rede-2022-rmn.xlsx/view>. Acesso em 11/05/2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES. **Declaração de Rede 2023 - RMP**. Disponível em: <https://www.gov.br/antt/pt-br/assuntos/ferrovias/declaracao-de-rede/declaracao-de-rede-2022/declaracao-de-rede-2022-rmp.xlsx/view>. Acesso em 11/05/2024.

ALEKSEEVA, T. L. *et al.* Improving the Efficiency of the Railway Electric Power System. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. 1151, p. 1-8.

AMORIM, J. C. **Modelagem Híbrida de um Sistema de Regeneração de Energia de Frenagem em Locomotivas Diesel-Elétricas**. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal do Espírito Santo, 2020. Disponível em: <https://eletrica.ufes.br/pt-br/pos-graduacao/PPGEE/detalhes-da-tese?id=14901>. Acesso em 26/03/2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES. **Declaração de Rede 2023 - RMP**. Disponível em: <https://www.gov.br/antt/pt-br/assuntos/ferrovias/declaracao-de-rede/declaracao-de-rede-2022/declaracao-de-rede-2022-rmp.xlsx/view>. Acesso em 11/05/2024.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES FERROVIÁRIOS – ANTF. **Mapa Ferroviário**. Disponível em: <https://www.antf.org.br/mapa-ferroviario/>. Acesso em 29/04/2024.

BATTERY FINDS. **3.2V 280Ah LiFePO4 Prismatic Battery BATTERO Cells-4pcs**. Disponível em: <https://batteryfinds.com/product/eu-stock-battero-280ah-lifepo4-prismatic-battery-cells-4pcs/>. Acesso em 10/05/2024.

BATTERY FINDS. **3.7V 234Ah Lithium-ion NMC Battery CATL Cells -3pcs**. Disponível em: <https://batteryfinds.com/product/catl-3-7v-234ah-lithium-ion-nmc-battery-cells/>. Acesso em 10/05/2024.

BATTERY FINDS. **2.4V 20Ah LTO Battery Toshiba Cells -6pcs**. Disponível em: <https://batteryfinds.com/product/toshiba-2-4v-20ah-lto-battery-cells-6pcs/>. Acesso em 24/06/2024.

BLEWITT, R. T. India develops a partially solar-powered train in order to save on diesel. **Neowin**, 19 jul. 2017. Disponível em: <https://www.neowin.net/news/india-develops-a-partially-solar-powered-train-in-order-to-save-on-diesel/>. Acesso em 01/05/2023.

BORBA, J. L. **Dinâmica Ferroviária**. Belo Horizonte: Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, 2009.

BORBA, J. L. **Mecânica de Locomotivas**. Belo Horizonte: Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, 2011.

BRASIL. Lei Complementar Nº 192, de 11 de março de 2022. Define os combustíveis sobre os quais incidirá uma única vez o Imposto sobre Operações Relativas à Circulação de Mercadorias e sobre Prestações de Serviços de Transporte Interestadual e Intermunicipal e de Comunicação (ICMS), ainda que as operações se iniciem no exterior; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, ano 160, nº 48-D, pg. 1, 11 mar. 2022. LCP 192/2022.

BRENNAN, M., FOIADELLI, F., ZANINELLI, D. **Electrical Railway Transportation Systems**. Piscataway: IEEE Press, 2018.

BUCHMANN, I. BU-1003: Electric Vehicle (EV). **Battery University**, 2019. Disponível em: <https://batteryuniversity.com/article/bu-1003-electric-vehicle-ev>. Acesso em 10/04/2023.

CASTRO, G. B. *et al.* Metodologia de Análise de Falhas em Rolamentos Ferroviários. *In*: 73º Congresso da ABM. **Anais [...]** São Paulo, 2 a 4 de outubro de 2018. Disponível em: <https://abmproceedings.com.br/en/article/download-pdf/metodologia-de-analise-de-falhas-em-rolamentos-ferrovirios#:~:text=Para%20o%20bom%20funcionamento%20dos,como%20base%20r%C3%ADgida%20do%20truque>. Acesso em 02/05/2023.

CONZEN, J. *et al.* Lithium ion battery energy storage systems (BESS) hazards. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**. v. 81, 104932, fev. 2023.

CRRC. **HXN6 Diesel Locomotive**. 16 jul. 2021. Disponível em: <https://www.crrccg.com/zyjcen/g11520/s36022/t322760.aspx>. Acesso em 02/05/2023.

CTCN. **Regenerative braking in trains**. Disponível em: https://www.ctcn.org/technologies/regenerative-braking-trains_. Acesso em 01/05/2023.

FAYAD, A. *et al.* Energy Recovering Using Regenerative Braking in Diesel–Electric Passenger Trains: Economical and Technical Analysis of Fuel Savings and GHG Emission Reductions. **Energies**, v. 15, n. 1, 37, 2022.

FERREIRA, B.; MERWE, W. V. **The Principles of Electronic and Electromechanical Power Conversions: A Systems Approach**. Hoboken: Wiley, 2014.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY Jr, C.; UMANS, S. **Máquinas Elétricas**. Porto Alegre: Bookman, 2006.

HENSCHERL Jr., J. A. **Análise da Injeção de Combustível nos Parâmetros de Operação de um Motor Diesel Tipo Ferroviário**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Santa Catarina, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/192081>. Acesso em 21/06/2024.

HUNGRIA, L. F. **Segurança Operacional de Trens de Carga**. São Paulo: ALL Print, 2018.

KAPETANOVIĆ, M. *et al.* Reducing fuel consumption and related emissions through optimal sizing of energy storage systems for diesel-electric trains. **Applied Energy**, v. 294, 117018, 2021.

LOBO, R. Novos trens da CPTM reduziram consumo de energia em 12% em 4 anos. **Viatrolebus**, 5 jun. 2019. Disponível em: <https://viatrolebus.com.br/2019/06/novos-trens-da-cptm-reduziram-consumo-de-energia-em-12-em-4-anos/>. Acesso em 28/03/2023.

LIU, X., LI, K. Energy storage devices in electrified railway systems: A review. **Transportation Safety and Environment**, V. 2, N. 3, p. 183–201, 2020.

MARTINS, J. **Motores de Combustão Interna**. Porto: Publindústria, 2013.

MAYRINK, S. Jr., *et al.* Regenerative Braking for Energy Recovering in Diesel-Electric Freight Trains: A Technical and Economic Evaluation. **Energies**, v. 13, 963, 2020.

MORAES, C. G. S. **Análise e Concepção de um Sistema Híbrido de Armazenamento de Energia para Aplicação em Locomotivas Diesel-Elétricas**. 232 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Santa Catarina, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/216618>. Acesso em 25/03/2023.

MORAES, C. G. S. *et al.* Power Conversion Technologies for a Hybrid Energy Storage System in Diesel-Electric Locomotives. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 68, n. 10, p. 9081-9091, out. 2021.

NOGUEIRA NETO, B. **Identificação do Comportamento da Temperatura do Retificador Principal de uma Locomotiva Diesel-Elétrica**. Dissertação (Mestrado em Automação e Controle). Universidade Federal do Maranhão, 2020. Disponível em: <https://tedebc.ufma.br/jspui/handle/tede/442>. Acesso em 25/03/2023.

NORMAN, H. Progress Rail to provide hybrid diesel/battery electric locomotives in Brazil. **Electric & Hybrid Rail Technology**. 21 set. 2022. Disponível em: <https://www.electriconhybridrail.com/content/news/progress-rail-to-provide-hybrid-diesel-battery-electric-locomotives-in-brazil>. Acesso em 02/05/2023.

OMAR, N. *et al.* Rechargeable Energy Storage Systems for Plug-in Hybrid Electric Vehicles—Assessment of Electrical Characteristics. **Energies**, v. 5, p. 2952-2988, 2012.

PAN, Y. *et al.* Modeling and onboard test of an electromagnetic energy harvester for railway cars. **Applied Energy**, v. 250, p. 568-581, dez. 2019.

PAN, L. *et al.* Kinetic energy harvesting technologies for applications in land transportation: A comprehensive review. **Applied Energy**, v. 286, 116518, mar. 2021.

PETROBRÁS. **Ficha de Informações de Segurança de Produto Químico – FISPQ**. 14 mai. 2021. Disponível em: [fispq-comb-oleodiesel-auto-oleodiesel-b-s10_REV](https://br-petrobras.com.br/fispq-comb-oleodiesel-auto-oleodiesel-b-s10_REV) (br-petrobras.com.br). Acesso em 14/05/2024.

PETROBRÁS. **Preço Médio do Diesel - SP**. Disponível em: <https://precos.petrobras.com.br/web/precos-dos-combustiveis/w/diesel/sp>. Acesso em 24/06/2024.

PIRES, C. L. **Engenharia Elétrica Ferroviária e Metroviária: do trólebus ao trem de alta velocidade**. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

PROFILLIDIS, V. A. **Railway Management and Engineering**. 3. Ed. Farnham: Ashgate, 2006.

PROGRESS RAIL. **Locomotive Engine**. Disponível em: https://www.progressrail.com/en/Segments/Engines/Locomotive_Engines.html. Acesso em 30/04/2023.

QI, L., *et al.* A review of vibration energy harvesting in rail transportation field. **iScience**, v. 25, 103849, mar. 2022.

RAMSEY, D. *et al.* Comparison of Energy Recovery Solutions on a Suburban DC Railway System. **IEEE Transactions on Transportation Electrification**, v. 7, n. 3, p. 1849-1857, set. 2021.

RASHID, M. H. **Eletrônica de Potência**. 4. Ed. São Paulo: Pearson, 2014.

RUMO. **Dados internos**. 2023.

RUSCELLI, A. L., CECCHETTI, G., CASTOLDI, P. Energy harvesting for on-board railway systems. *In*: IEEE International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems (MT-ITS), Napoli, 2017, p. 397-402. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8005704>. Acesso em 01/05/2023.

SERVATIAN, D. **Methods for the Characterisation of Hybrid Energy Storage System for Independently Powered Trains**. 272 f. Tese (Doutorado) - Department of Electronic, Electrical and Systems Engineering, University of Birmingham, Birmingham, 2021. Disponível em: <https://etheses.bham.ac.uk/id/eprint/11381/1/Servatian2021PhD.pdf>. Acesso em 26/03/2023.

SPIRYAGIN, M. *et al.* **Design and Simulation of Rail Vehicles**. Boca Raton: CRC Press, 2014.

SPIRYAGIN, M. *et al.* **Design and Simulation of Heavy Haul Locomotives**. Boca Raton: CRC Press, 2017.

SPIRYAGIN, M. *et al.* **Rail Vehicle Mechatronics**. Boca Raton: CRC Press, 2022.

TOSHIBA. **Hybrid Locomotives**. Disponível em:
<https://www.global.toshiba/ww/products-solutions/railway/locomotives/hybrid.html>.
Acesso em 02/05/2023.

TOSHIBA. **High-Energy Type Cells**. Disponível em:
<https://www.global.toshiba/ww/products-solutions/battery/scib/product/cell/high-energy.html>. Acesso em 24/06/2024.

WABTEC. **Traction Motors**. 2023. Disponível em:
<https://www.wabteccorp.com/locomotive/electric-motors/traction-motors>. Acesso em 02/05/2023.

WAI, R. *et al.* High-efficiency bidirectional single-input multiple-output power converter. **IET Power Electronics**, v. 7, n. 5, p. 1278-1293, mai. 2014.

WANG, Z.; PALAZOLLO, A; PARK, J. Hybrid Train Power with Diesel Locomotive and SlugCar–Based Flywheels for NO_x and Fuel Reduction. **Journal of Energy Engineering**, v. 138, n. 4, p. 215-236, dez. 2012.

ZHANG, J. *et al.* Yttrium substituting in Mn site to improve electrochemical kinetics activity of sol-gel synthesized LiMnPO₄/C as cathode for lithium ion battery. **Journal of Solid State Electrochemistry**, v. 21, p. 3189–3194, 2017.

ZHANG, X. *et al.* A portable high-efficiency electromagnetic energy harvesting system using supercapacitors for renewable energy applications in railroads. **Energy Conversion and Management**. v. 118, p. 287-294, 2016.